

Riziko přepravy a skladování vodíku a směsi zemní plyn – vodík

Risk of Transportation and Storage of Hydrogen and Natural Gas – Hydrogen Mixture

Autoři: doc. Ing. Otto Severýn, Ph.D.

TU Liberec, Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Souhrn:

Článek podává souhrn výsledků, kterých bylo na pracovišti autora dosaženo při řešení zakázky na posouzení rizika přepravy a skladování vodíku a směsi vodíku a zemního plynu. V první kapitole článku je stručně představena metodika pro posuzování rizika v okolí plynovodů, publikovaná v roce 2013 pracovníky TU Liberec. Ve druhé kapitole jsou popsány úpravy této metodiky pro výpočet rizika přepravy vodíku a směsi. Třetí kapitola shrnuje hlavní výsledky provedených výpočtů rizika pro různé situace požadované zadavatelem. V závěru je na základě dosažených výsledků konstatováno, že změna přepravovaného a skladovaného plynu nebude mít za následek zvýšení rizika v okolí plynovodů a podzemních zásobníků plynu, stávající ochranná pásma a odstupové vzdálenosti objektů není nutno upravovat.

Summary:

The article provides a summary of the results achieved during a project focused on assessing the risks associated with the transport and storage of hydrogen and a mixture of hydrogen and natural gas. The first chapter of the article briefly presents a risk assessment methodology for areas surrounding gas pipelines, published in 2013 by researchers from the Technical University of Liberec. The second chapter describes the modifications made to this methodology for calculating the risk associated with transporting hydrogen and mixture of hydrogen and natural gas. The third chapter summarizes the main results of the risk calculations carried out for various scenarios as requested by the client. In conclusion, based on the obtained results, it is stated that the change in the type of transported and stored gas will not lead to an increased risk in the vicinity of gas pipelines and underground gas storage facilities, and that there is no need to modify existing protection zones or safety distances from buildings.

Klíčová slova

vodíková tranzice, blendování zemního plynu, odstupové vzdálenosti, riziko plynovodů, riziko podzemních zásobníků plynu, tryskový požár, ohnivá koule, bleskový požár

Key Words

hydrogen transition, natural gas blending, safety distances, risk of gas pipelines, risk of underground gas storage, jetfire, fireball, flashfire

Úvod

Probíhající proces dekarbonizace plynárenství přináší řadu úkolů, které je nutno včas vyřešit, aby proces náhrady fosilních paliv palivy syntetickými byl bezproblémový a bezpečný. Jednou z klíčových otázek bezpečnosti je, jaký vliv bude mít nejprve částečná, později pak v některých případech i úplná náhrada zemního plynu vodíkem na riziko v okolí plynovodů a podzemních zásobníků plynu (PZP).

Zodpovězením této otázky pověřily společnosti sdružené v ČPS v závěru roku 2023 pracovníky Technické univerzity v Liberci zpracováním studie na dané téma. Studie byla dokončena v listopadu 2024 a výsledky předány zadavateli ve zprávě (1) – dále jen Studie.

Tento článek shrnuje práce provedené v rámci zpracování Studie a její hlavní výsledky.

Metodika

Základním dokumentem, který sloužil pro zde představený výpočet přijatelnosti rizika, je zpráva (2) – dále jen Metodika – vytvořená v roce 2013 kolektivem odborníků z Technické univerzity v Liberci a firem K.B.K. fire, s.r.o., a TLP, s.r.o., pro ČPS. Tato Metodika byla následovně přijata jako závazný předpis v normě TPG 702 04. V roce 2016 byla doplněna zprávou (3).

Metodika byla představena v časopise Plyn ve článku (4).

Základní rysy postupu stanovení rizika popsaného v Metodice jsou následující:

- Vycházejí z hodnocení rizika úmrtí pro člověka, souvisejícího s požárem vzniklým v důsledku narušení plynovodu.
- Netýká se hodnocení škod zdraví a na objektech a nezahrnuje rizika dominových efektů.
- Nezahrnuje riziko výbuchu plynu, které je při úniku do volného prostoru velmi nízké.

Principem je kvantifikace společenského rizika jako součinu frekvence ztráty integrity plynovodu spojené se vznikem požáru a veličiny RNIR (redukované normované individuální riziko). RNIR je vypočteno pro tři druhy reprezentativních událostí (tryskový požár, ohnivá koule a bleskový požár). Pro každou z reprezentativních událostí je nejprve provedeno fyzikální modelování, na základě jehož výsledků je vypočteno riziko úmrtí nechráněné osoby – takzvané jednotkové individuální riziko (JIR). Z něho je dalšími výpočetními kroky vypočteno RNIR. Schéma výpočtu rizika dle Metodiky je na obrázku 1.

Přestože již v době vzniku Metodiky byly připravovány a rozpracovány plány na postupnou dekarbonizaci plynárenství, tyto plány nebyly natolik konkrétní, aby je bylo možno v Metodice zohlednit, proto byla sestavena pouze pro zemní plyn, respektive pro metan.

Aplikace a úpravy Metodiky pro výpočet rizika přepravy vodíku a směsi zemní plyn – vodík (blendu)¹

Fyzikálně–chemické vlastnosti transportovaných plynů

Přestože blendování plynu v plynárenské síti bude postupné a koncentrace vodíku v zemním plynu bude časově i místně velmi proměnlivá, v rámci Studie jsme pracovali pouze s jednou úrovní blendování, maximální uvažovanou koncentrací 20 % molárních vodíku v zemním plynu, resp. metanu. V dalším textu článku tedy pojem „blend“ označuje pouze tuto směs.

Hodnoty veličin použitých pro výpočty byly převzaty z (5) a shrnuje je tabulka 1.

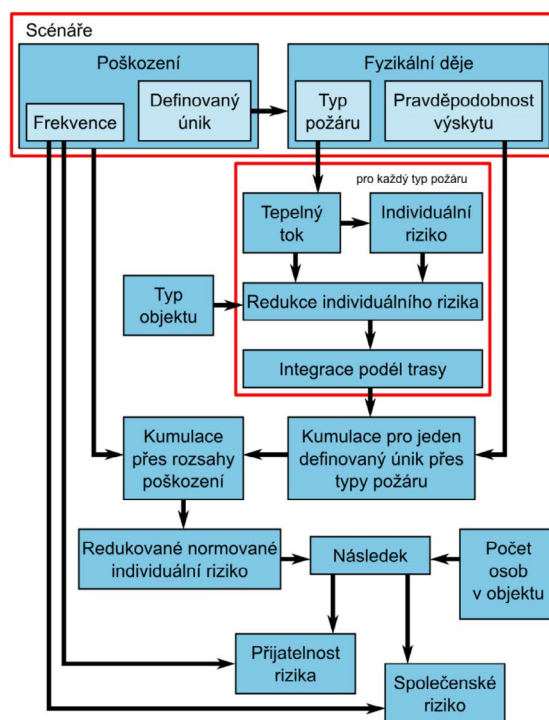
Definovaný únik plynu

Vztahy pro výpočet hmotnostního toku z porušeného plynovodu byly do Metodiky převzaty z TNO Yellow Book

Tabulka 1: Fyzikálně–chemické vlastnosti posuzovaných plynů

Veličina	Značka	Jednotka	Metan	Vodík	Blend
Molární hmotnost	M_w	[g mol ⁻¹]	16,04	2,00	13,23
Měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku	C_p	[kJ kg ⁻¹ K ⁻¹]	2,201	14,310	2,567
Poměr měrných tepelných kapacit C_p/C_v	γ	[1]	1,314	1,405	1,317
Výhřevnost	H_c	[MJ kg ⁻¹]	50,0	119,0	52,1
Měrné skupenské teplo varu	H_v	[kJ kg ⁻¹]	511	454	509
Teplota plamene	T_p	[°C]	1940	2060	1944

1) Abychom se vyhnuli zdoluhavému a neohrabanému pojmu „směs zemního plynu a vodíku“, budeme v tomto článku používat pojem „blendovaný plyn“ či pouze „blend“, který se postupně stává zatím neformální, ale pevnou součástí české i mezinárodní plynárenské terminologie.



Obrázek 1: Postup výpočtu rizika plynovodů dle Metodiky. Převzato z (2)

(6) a jsou obecně použitelné pro všechny druhy plynů běžně přepravovaných plynovody. Hodnoty hmotnostních toků při ruptuře plynovodů DN 100 až DN 1000 pro tlaky 4 a 10 MPa shrnuje tabulka 2. Hodnoty hmotnostních toků

při porušení typu „díra“ (v souladu s Metodikou uvažujeme díru o velikosti 25 % průměru potrubí) jsou přibližně sedmkrát menší než při ruptuře plynovodu stejných parametrů. Z toho vyplývá jen malý příspěvek poruch typu

Tabulka 2: Hmotnostní toky při poškození typu „ruptura“ VTL plynovodů DN 100 až DN 1000

Hmotnostní tok q [kg s ⁻¹]	DN 100	DN 300	DN 500	DN 700	DN 1000
P = 4 MPa					
Metan	54	490	1400	2700	5400
Blend	49	450	1200	2400	4900
Vodík	20	180	490	960	2000
P = 10 MPa					
Metan	140	1200	3400	6700	14 000
Blend	120	1100	3100	6100	12 000
Vodík	49	440	1200	2400	4900

Tabulka 3: Frekvence poškození plynovodů dle světlosti a typu poškození pro roky 1970–2019

Frekvence Standard [km ⁻¹ ·rok ⁻¹]								
D [inch]	D00–05	D05–11	D11–17	D17–23	D23–29	D29–35	D35–41	D41+
DN [mm]	0–127	127–280	280–432	432–584	584–737	737–889	889–1041	1041+
HOLE	4,76E–05	3,54E–05	1,74E–05	8,43E–06	4,99E–06	7,50E–07	1,27E–06	4,84E–07
RUP	2,38E–05	1,17E–05	7,15E–06	5,74E–06	2,91E–06	2,25E–06	4,24E–07	4,84E–07

díra k celkovému riziku plynovodů, byť frekvence vzniku díry je obecně vyšší, než frekvence vzniku ruptury.

Frekvence úniků

Jako výchozí data o frekvencích úniků byly ve Studii využity informace z dokumentu (7). Data byla zpracována postupem popsaným ve Studii, hlavním výsledkem tohoto procesu je tabulka 3. Data v této tabulce obsažená byla použita pro výpočty přijatelnosti rizika a odstupových vzdáleností, popsané v následující kapitole tohoto článku.

Křehnutí oceli

Při přepravě blendu nebo čistého vodíku může docházet k materiálovým změnám s vlivem na frekvenci poškození plynovodu. Na základě technické zprávy (8) se očekává

navýšení frekvencí poruch v závislosti na příčině porušení plynovodu dle následující tabulky 4.

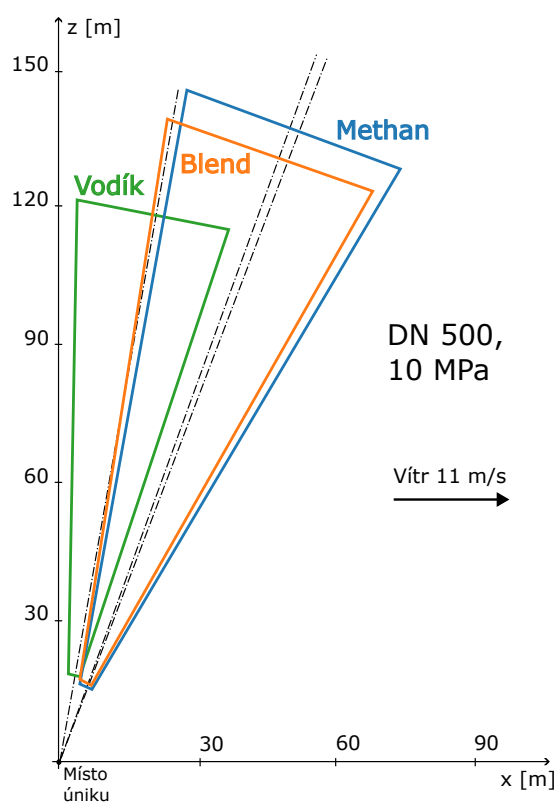
Z výše uvedených koeficientů pro jednotlivé příčiny pak výsledné koeficienty navýšení frekvencí celkové frekvence porušení plynovodu vycházejí následovně:

- Pro blend je koeficient navýšení 1,075,
- pro vodík je koeficient navýšení 1,092.

Tryskavý požár

Tryskavý požár je nejčastěji se vyskytujícím druhem požáru při haváriích plynovodů a jeho následky mají dominantní vliv na celkovou úroveň rizika.

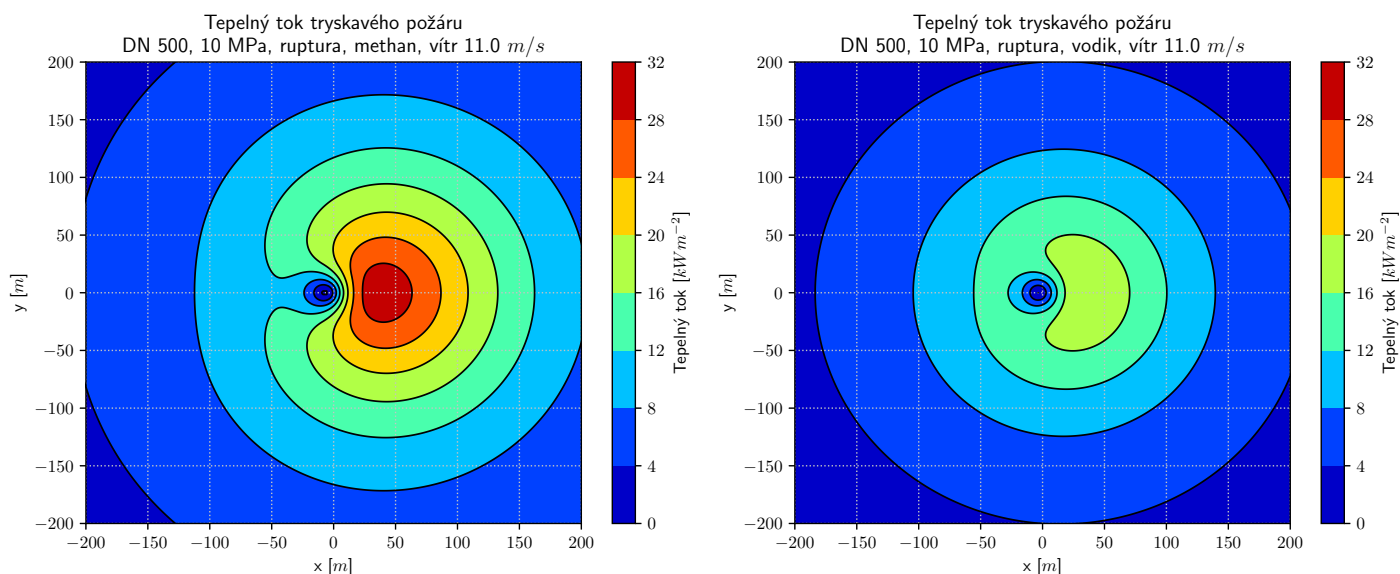
Výpočet fyzikálních následků tryskavého požáru kodifikovaný Metodikou vychází z modelu „Thornton“ (9). Ten nahrazuje



Obrázek 2: Porovnání geometrie plamene tryskavého požáru posuzovaných plynů

Tabulka 4: Koeficienty navýšení frekvencí porušení plynovodů pro blend a vodík

Příčina	Výskyt [%] pro metan	Koeficient navýšení pro blend vůči metanu [–]	Koeficient navýšení pro vodík vůči metanu [–]
Externí zásah	48,4	1	1
Chyba konstrukce / chyba materiálu	16,7	1,2	1,25
Koroze	16,1	1,15	1,2
Pohyb půdy	7,4	1,1	1,12
Chybná navrtávka	4,8	1,2	1,2
Ostatní, neznámá	6,6	1	1



Obrázek 3: Srovnání tepelných polí při tryskavém požáru metanu a vodíku

ohňovou obálku plamene komolým kuželem, jehož plášť vyzářuje tepelné záření. Rozměry a poloha kužele závisí na parametrech plynovodu a meteorologické situaci. Hodnota tepelného toku v daném místě povrchu závisí na zorném úhlu, pod kterým je plášť kužele z tohoto místa viditelný.

Použitelnost modelu pro blend nebylo nutno zkoumat, veškeré dosud provedené práce prokázaly blízkost vlastností metanu a blendu v procesu hoření. Otázkou byla použitelnost tohoto modelu hoření pro vodík. Ta byla řešena v článku (10), kde bylo konstatováno, že model „Thornton“ je pro tryskavý požár vodíku použitelný a co se výsledků týče konzervativní na straně bezpečnosti. Z toho důvodu jsme tento model použili i v našich výpočtech.

Na obrázku 2 je znázorněno srovnání tvaru a polohy plamene pro posuzované plyny.

Obrázek 3 srovnává tepelná pole při tryskavém požáru metanu a vodíku². Z obrázku je patrné, že požár vodíku zasáhne významně menší plochu a též tepelné toky v zasažené oblasti jsou výrazně nižší.

Kroky vedoucí k výpočtu průběhu RNIR z polí tepelného toku byly podrobně popsány v Metodice. Jedná se postupně o: Stanovení doby expozice, výpočet tepelné expoziční dávky, výpočet hodnoty probitové funkce, výpočet pravděpodobnosti úmrtí jako pole pro danou meteorologickou situaci, průměrování radiální integrací k získání JIR jako funkce vzdálenosti od místa havárie, redukce JIR dle typu objektu, sloučení meteorologických situací a následná normalizace, tedy přechod od bodového k liniovému zdroji rizika integrací rizika dle trasy plynovodu, jejímž výsledkem je průběh RNIR.

Tento postup zůstal zachován i při provedeném výpočtu v rámci posouzení rizika přepravy blendu a vodíku. Jedinou změnou byla úprava časů expozice pro požár vodíku. Protože doby expozice byly v Metodice stanoveny tabelárně jako funkce průměru havarovaného plynovodu a hodnoty tepelného toku (tabulka 9.2 na straně 55 v Metodice), byla z důvodu menšího rozsahu oblasti zasažené požárem vodíku provedena korekce těchto hodnot, neboť lze předpokládat rychlejší únik osob z prostoru zasaženého požárem. Ostatní kroky výpočtu nebyly měněny.

Obrázek 4 srovnává průběh JIR a RNIR pro všechny zkoumané plyny v referenční situaci. Na obrázcích je jasně patrné nižší, ale srovnatelně velké riziko požáru blendu oproti požáru metanu a významně nižší riziko při požáru vodíku vůči ostatním dvěma plynům.

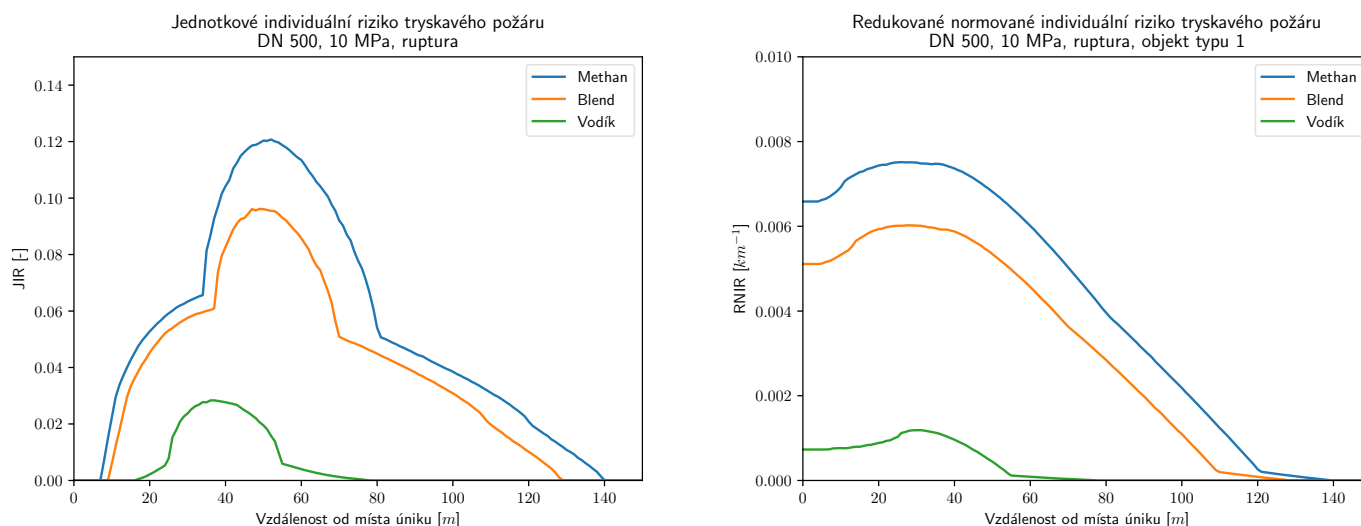
Ohnivá koule

Charakteristika, příčiny vzniku, průběh a následky požáru typu „ohnivá koule“ byly popsány v Metodice. Pro havárie VTL plynovodů je vznik ohnivě koule možný, ale méně pravděpodobný scénář. Požár tohoto typu je typický krátkého trvání, ovšem energie při něm vyzářená do okolí je značná. Pole tepelného toku a tím i dalších veličin jsou radiálně symetrická.

Základní výpočetní postup stanovení rizika ohnivě koule byl při posouzení rizika přepravy blendu a vodíku převzat z Metodiky s těmito úpravami:

- Ohnivá koule nevznikne pro vodík.
- Výška středu ohnivě koule nad povrchem je funkcí průměru plynovodu.

2) Rupturu plynovodu DN 500 při tlaku 10 MPa budeme v dalším textu označovat jako „referenční situaci“, na které budeme ukazovat průběh a rozložení jednotlivých zkoumaných veličin, aby obrázky a grafy v této kapitole uvedené byly pro čtenáře snadno srovnatelné a informativní. Tam, kde je to relevantní, uvažujeme dále vítr 11 ms^{-1} , objekt typu 1 a kategorii plynovodu VII.



Obrázek 4: Srovnání průběhu veličin JIR a RNIR pro posuzované plyny při tryskavém požáru

Důvodem druhé úpravy je skutečnost, že model ohnivé koule, uvedený v (6), má tendence počítat zanedbatelně nízké riziko (vzhledem k ostatním typům požárů) pro plynovody malých rozměrů a naopak neúměrně vysoké riziko pro plynovody velkých průměrů.

Bleskový požár

Pojmem „bleskový požár“ rozumíme situace, kdy nedojde k okamžitému vznícení unikajícího plynu, který se z místa havárie šíří v atmosféře, a pokud oblak plynu s koncentrací v mezích výbušnosti narazí na zdroj tepla, dojde k hoření, které je velmi rychlé, v extrémních případech může přejít i v deflagrační hoření.

V námi uvažovaných případech, tedy pro rupturu tranzitního plynovodu velkého průměru, je pravděpodobnost vzniku tohoto typu požáru ve srovnání s tryskavým požárem relativně nízká.

Parametry výpočtu bleskového požáru byly použity stejné jako v Metodice.

V případě bleskového požáru vodíku bylo nutno zohlednit skutečnost, že na rozdíl od zemního plynu či blendy se mrak vodíku šíří v důsledku jeho nižší měrné hmotnosti převážně ve vertikálním směru. Předpokládali jsme přitom opět konzervativně vertikální rychlost oblaku $0,5 \text{ ms}^{-1}$. Z výsledků modelování rizika je možno říct, že pro metan a blend se bleskový požár vyznačuje velkým prostorovým dosahem, ale pro vodík je tento rozsah zanedbatelný, vzhledem k jeho stoupavosti.

Výbuch

V souladu s Metodikou jsme ani v provedené studii neuvažovali o fyzikálním ději typu výbuchu plynu. Tento jev se váže k úniku do úplně či částečně uzavřeného prostoru a je charakteristický pro poškození přípojek do jednotlivých domů. Při poškození vysokotlakého plynovodu dochází

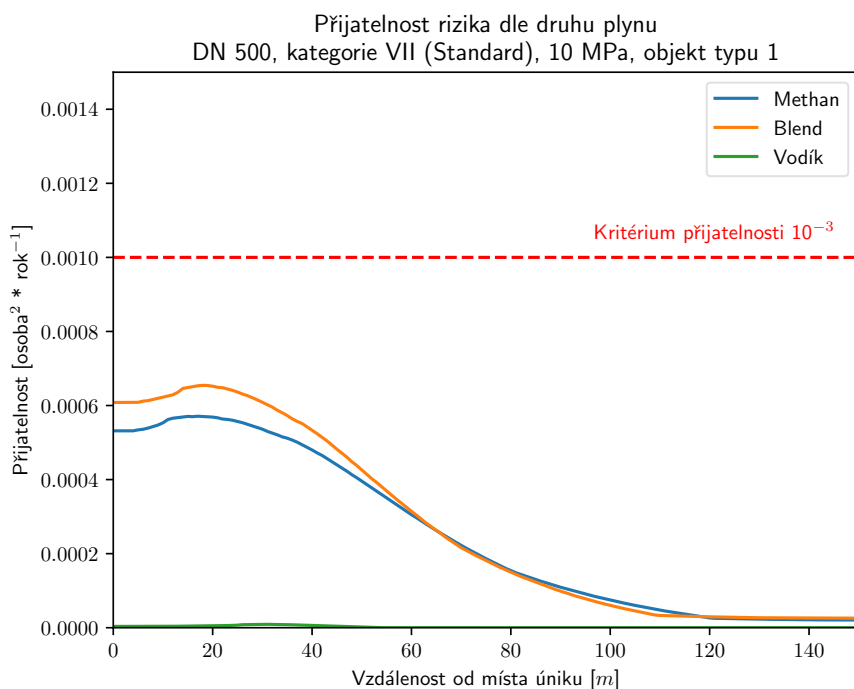
k úniku do volného prostoru. Výbuch by zde ve vzácných případech mohl být spojen s bleskovým požárem, kdy při výskytu překážek na cestě mraku plynu může dojít při zrychlení hoření až k deflagraci. Protože frekvence deflagrace je nejméně o dva řády nižší než frekvence vznícení a riziko takového výbuchu se příliš neliší od rizika bleskového požáru.

Souhrnné riziko provozu VTL plynovodů bylo stanoveno jako vážený součet RNIR jednotlivých typů požárů a následně porovnáno s legislativním limitem přijatelnosti. Výsledky ukázaly, že pro referenční případ jsou odstupové vzdálenosti nulové pro všechny posuzované plyny.

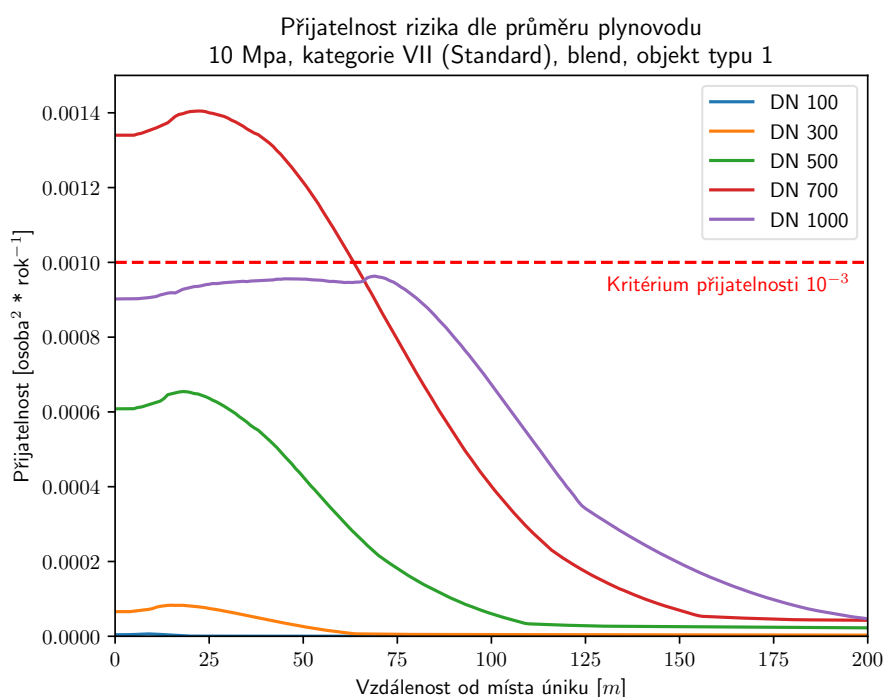
V případě vodíku byla možnost detonačního hoření experimentálně zkoumána, viz (11) a literatura v tomto článku citovaná, závěry těchto studií ukazují, že při úniku vodíku z plynovodu při zahoření bleskovým požárem bude s velkou pravděpodobností docházet při běžných podmínkách (okolní teplota a tlak) k deflagračnímu hoření ve volném prostoru. Dalším faktorem kromě atmosférických podmínek může být i okolní porost. Podle jedné z teorií může – i když s velmi malou pravděpodobností – dojít při průchodu plamene hustým podrostem k jeho zrychlení, což může vést k následné detonaci. Praktická verifikace (natožpak kvantifikace) tohoto hypotetického jevu však zatím chybí.

Výpočet přijatelnosti

Postupy stručně popsány v předchozích podkapitolách, jsme vypočetli průběh RNIR pro tři druhy požárů. Dalším krokem je sloučení RNIR z jednotlivých typů požárů, které proběhlo shodně s Metodikou jako vážený součet dílčích RNIR, kde váhy určuje tabulka 7.2 na straně 45 Metodiky.



Obrázek 5: Přijatelnost rizika referenční situace pro zkoumané plyny



Obrázek 6: Přijatelnost rizika blendu pro objekty typu 1 dle průměru plynovodu

Následný výpočet přijatelnosti rizika proběhl vyčíslením vztahu:

$$A = F_{PR}(RNIR_R H)^2 + F_{PD}(RNIR_D H)^2,$$

kde index R označuje poškození typu ruptura a index D poškození typu díra, H je počet osob v objektu daného typu (dáno tabulkou 12.7 v Metodice) a F_p je frekvence

ztráty integrity plynovodu se vznikem požáru, která se vypočte jako:

$$F_p = FIGK$$

kde F je frekvence ztráty integrity plynovodu převzatá z tabulky 3, I je pravděpodobnost vznícení přepravovaného plynu (0,5 pro metan, 0,7 pro blend, 1,0 pro vodík),

Odstupové vzdálenosti [m] pro objekty typu 1 dle DN, tlaku, plynu a kategorie plynovodu

DN [mm]	P [MPa]	Plyn	Kategorie plynovodu							
			I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
500	4	Methan	0	0	0	0	0	0	0	0
		Blend	0	0	0	0	0	0	0	0
		Vodík	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	Methan	90	70	30	50	0	0	0	0
		Blend	90	70	40	50	0	0	0	0
		Vodík	0	0	0	0	0	0	0	0
700	4	Methan	40	0	0	0	0	0	0	0
		Blend	40	0	0	0	0	0	0	0
		Vodík	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	Methan	140	120	90	100	70	70	50	0
		Blend	140	120	90	100	80	70	60	0
		Vodík	0	0	0	0	0	0	0	0
1000	4	Methan	0	0	0	0	0	0	0	0
		Blend	0	0	0	0	0	0	0	0
		Vodík	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	Methan	170	150	110	130	100	90	0	0
		Blend	170	150	110	120	100	90	0	0
		Vodík	0	0	0	0	0	0	0	0

V některých případech vychází odstupové vzdálenosti pro blend vyšší než pro metan, což je dáno konzervativním předpokladem vyšší pravděpodobnosti vznícení. U plynovodů DN 700 může riziko vycházet vyšší než u DN 1000, a to v důsledku rozdílné četnosti historických havárií v databázi EGIG.

G je koeficient vodíkové křehkosti – viz výše a K je koeficient kategorie plynovodu (Zpráva, tabulka 5.20).

Takto vypočtená veličina A je funkcí kolmé vzdálenosti od plynovodu a při zkoumání odstupových vzdáleností hledáme takovou vzdálenost, za kterou je její hodnota trvale menší než zákonem 227/2015 Sb. daný limit 10^{-3} osoba² rok⁻¹ km⁻¹.

Průběh veličiny A pro referenční případ je znázorněn na obrázku 5, kde je též vyznačena hodnota kritéria přijatelnosti. Pro tento případ jsou tedy odstupové vzdálenosti nulové pro všechny zkoumané plyny.

Posuzované případy

VTL plynovody

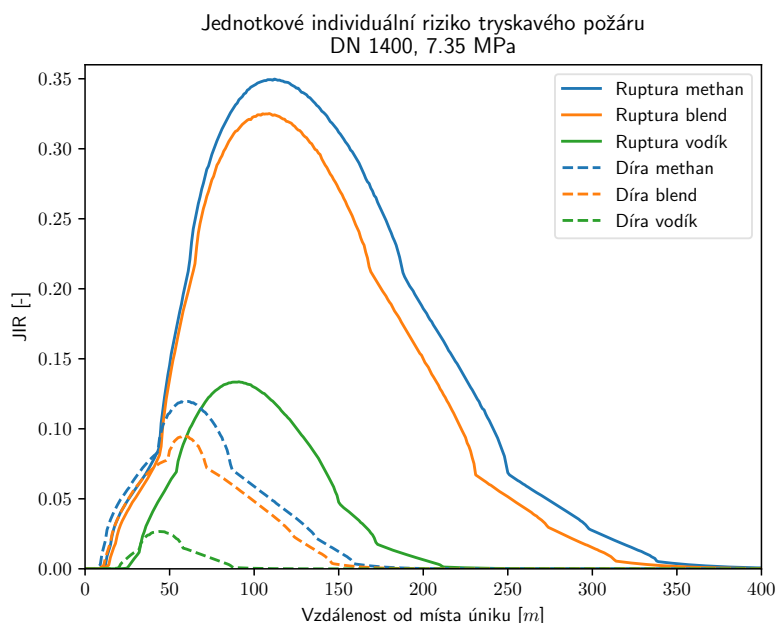
Scénáře: V rámci této hlavní části posouzení rizika přepravy blendu a vodíku byl proveden výpočet pro stejné situace jako v Metodice, to znamená plynovody DN 100, DN 300, DN 500, DN 700 a DN 1000, a to na tlakových hladinách 4 a 10 MPa (přetlak vůči atmosférickému tlaku). Uvažovány byly plynovody kategorií I až VIII, poškození typu díra a ruptura.

Provedení výpočtu: Změny, které bylo nutné učinit v Metodice pro stanovení rizika přepravy blendu a vodíku, byly popsány výše spolu s ukázkami některých výsledků.

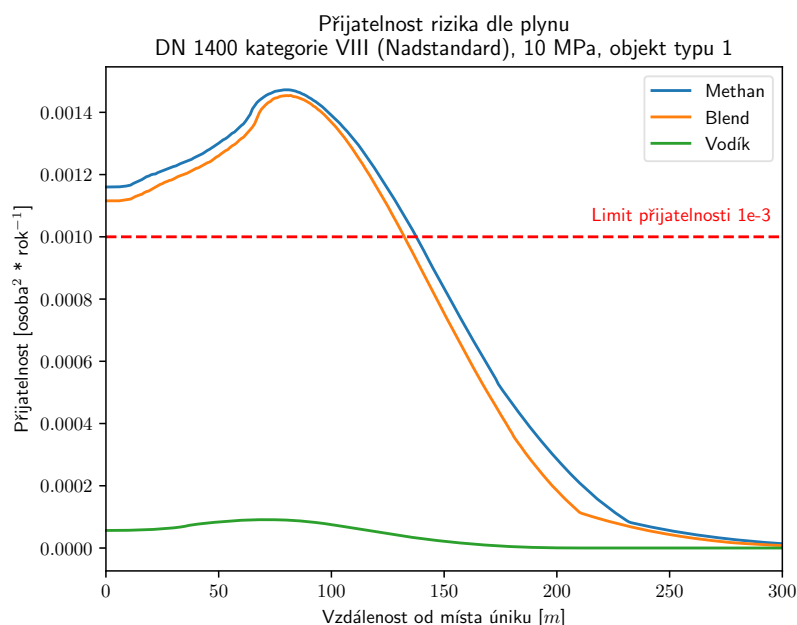
Přijatelnost rizika: Hlavními výsledky provedených výpočtů jsou grafy průběhu přijatelnosti rizika, jejichž ukázka je na obrázcích 5 a 6 a tabulky odstupových vzdáleností pro jednotlivé typy objektů. Tabulka 5 ukazuje odstupové vzdálenosti pro objekty typu 1 a plynovody DN 500 až DN 1000.

Výsledky výpočtů můžeme shrnout takto – Nulové odstupové vzdálenosti vyšly pro:

- Všechny posuzované případy plynovodů DN 100 a DN 300,
- všechny plynovody kategorie VIII,
- objekty typu 4
- všechny zkoumané případy, kdy byl přepravováným médiem čistý vodík.



Obrázek 7: JIR tryskavého požáru plynovodu DN 1400 při tlaku 7,35 MPa



Obrázek 8 Přijatelnost rizika plynovodu DN 1400 kategorie VIII, 10 MPa, objekt typu 1

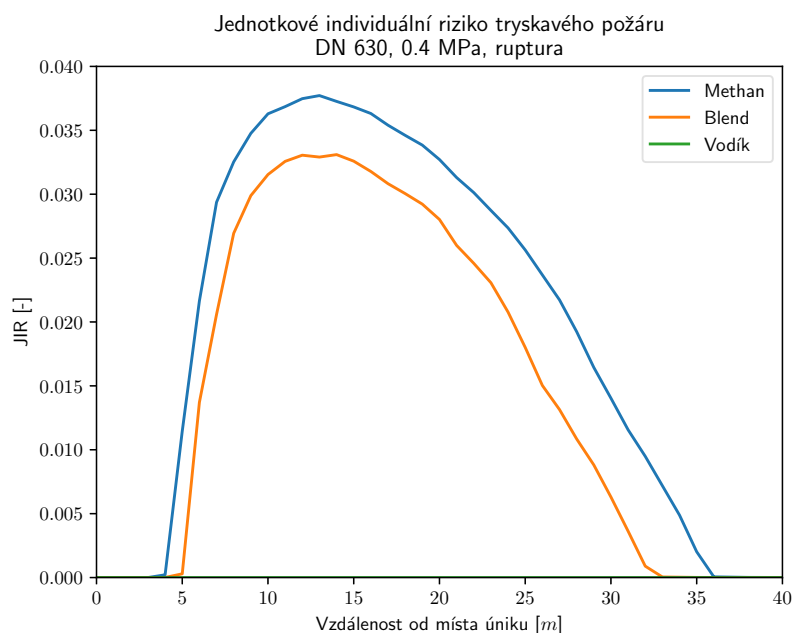
Veškeré nenulové odstupové vzdálenosti vyšly nižší než vzdálenosti stanovené v normě TPG 704 02.

Rádi bychom poukázali na dvě skutečnosti:

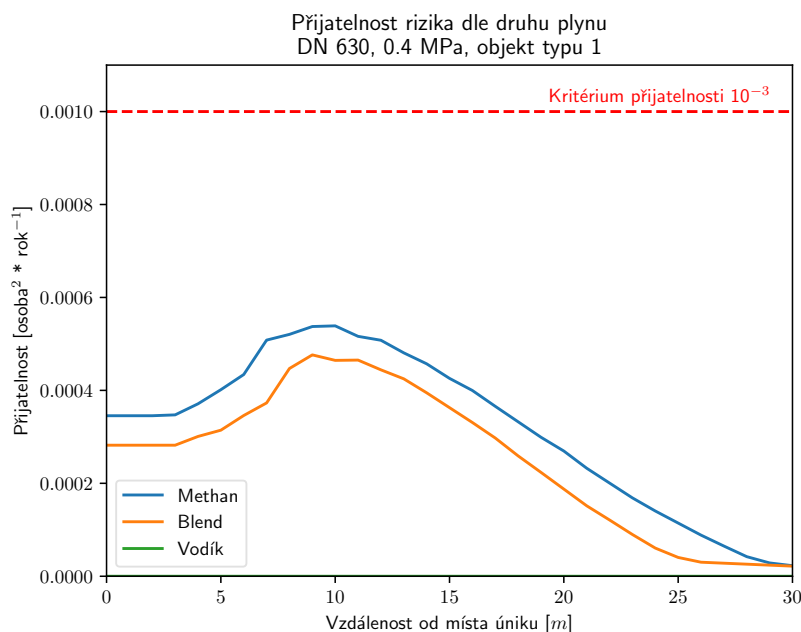
- V některých případech vyšly odstupové vzdálenosti pro blend vyšší než pro metan, přestože veškeré výpočty rizika včetně celkového RNIR prokazují nižší riziko požáru blendu oproti metanu. Toto nižší riziko je dáno menší výhřevností blendovaného plynu. Ovšem při stanovení přijatelnosti rizika uvažujeme konzervativně pravděpodobnost vznícení havarovaného plynovodu přepravujícího blend jako 70 %, zatímco pro metan uvažujeme shodně s Metodikou 50 %. Toto navýšení pravděpodobnosti vznícení způsobí zvýšení

celkového rizika a tím i odstupových vzdáleností.

- Odstupové vzdálenosti pro plynovody DN 700 vycházejí v některých případech větší než pro plynovody DN 1000 stejné kategorie při stejném tlaku. Tento výsledek je dán hodnotami frekvencí nežádoucích událostí. Přestože tyto frekvence s rostoucím průměrem plynovodu klesají, jak ukazuje tabulka 3, tak tento pokles není rovnoměrný. Pro plynovody DN 700 je v databázi EGIG evidováno celkem sedm událostí typu ruptura, pro plynovody DN 1000 je to událost jediná (obdobně dvanáct událostí typu díra pro DN 700 vs. tři takovéto události pro DN 1000). Z tohoto důvodu je vypočtené riziko plynovodu DN 700 v některých případech vyšší než plynovodu DN 1000.



Obrázek 9: JIR tryskavého požáru ruptury plynovodu DN 630 při tlaku 0,4 MPa



Obrázek 10: Přijatelnost rizika plynovodu DN 630 při tlaku 0,4 MPa pro objekty typu 1

Plynovody DN 1400

Nad rámec Metodiky bylo v této studii dle požadavků zadavatelů provedeno posouzení rizika plynovodů DN 1400 při přepravě metanu, blendu a vodíku.

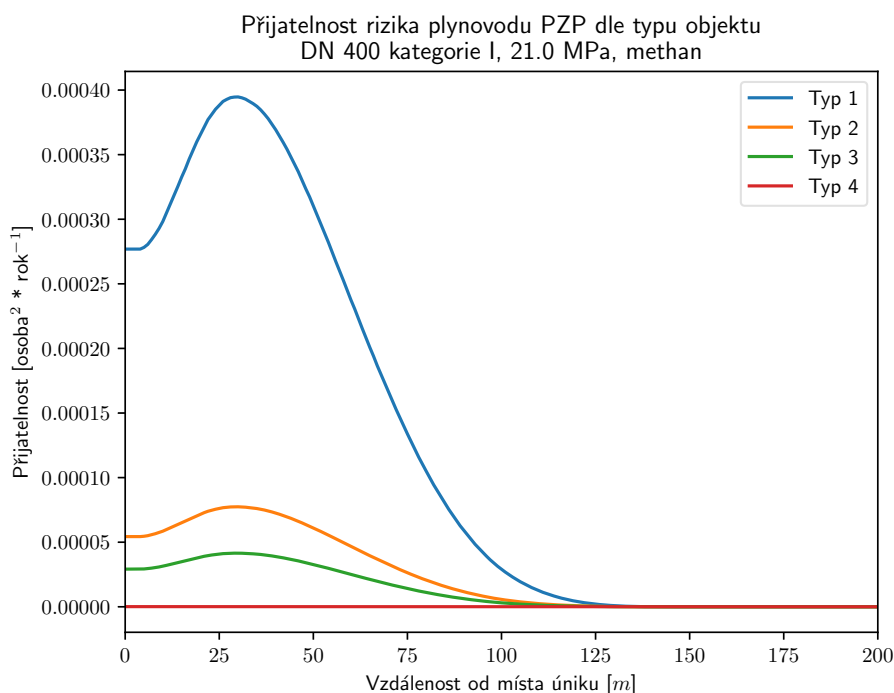
Scénáře: Posuzovány byly následující scénáře plynovodů DN 1400: Plynovody kategorií I až VIII s tlakem 4 MPa, plynovody kategorií I až VI s tlakem 7,35 MPa, plynovody kategorie VII s tlakem 8,5 MPa a plynovody kategorie VIII s tlakem 10 MPa.

Provedení výpočtu: Výpočet byl proveden v souladu s Metodikou a jejími úpravami popsány výše. Frekvence havárií byly převzaty z databáze EGIG. Obrázek 7 ukazuje

průběh JIR tryskavého požáru plynovodu DN 1400 při tlaku 7,35 MPa. Povšimněme si téměř třikrát vyšší hodnoty rizika oproti požáru DN 500 z obrázku 4 a více než dvojnásobného dosahu nenulových hodnot rizika.

U plynovodů DN 1400 vyšly nenulové odstupové vzdálenosti pro metan a blend v části scénářů, avšak vždy pod limity normy TPG 704 02. Pro vodík byly odstupové vzdálenosti ve všech případech nulové.

Přijatelnost rizika: Pro plynovody DN 1400 samozřejmě vyšly nenulové odstupové vzdálenosti pro metan i pro blend v deseti ze šestnácti posuzovaných scénářů pro objekty typu 1, ve dvou scénářích pro objekty typu 2



Obrázek 11: Přijatelnost rizika plynovodu PZP dle typu objektu – DN 400, kat. I, 21 MPa, metan

a v jednom pro objekty typu 3. Nicméně všechny odstupové vzdálenosti pro v ČR reálně provozované kombinace kategorie a tlaku vyšly nižší než vzdálenosti stanovené v normě TPG 704 02. Pro vodík vyšly odstupové vzdálenosti ve všech posuzovaných případech nulové.

Ukázka průběhu přijatelnosti rizika pro plynovody DN 1400 je na obrázku 8.

STL a NTL plynovody

Dle zadání Studie bylo provedeno také posouzení rizika středotlakých a nízkotlakých plynovodů při přepravě blendu a vodíku. Ani tento výpočet nebyl v Metodice prováděn.

Scénáře: Posuzovány byly plynovody DN 100 až DN 630 při tlaku 0,4 MPa.

Provedení výpočtu: Výpočet byl proveden v souladu s Metodikou a jejími úpravami popsány výše.

Frekvence havárií byly stanoveny převzetím hodnot pro odpovídající průměr plynovodu z databáze EGIG, uvažováním kategorie plynovodu I a z důvodu konzervativnosti při stanovení rizika ještě vynásobením koeficientem 10. Výsledné hodnoty frekvencí použité pro výpočet byly v rozsahu $7,14 \cdot 10^{-3} \text{ km}^{-1} \text{ rok}^{-1}$ pro DN 100 po $7,90 \cdot 10^{-4} \text{ km}^{-1} \text{ rok}^{-1}$ pro DN 630.

Na obrázku 9 je pro ilustraci znázorněn průběh JIR tryskavého požáru pro plynovod DN 630, přepravující blend. Za pozornost stojí měřítko vodorovné osy, ze kterého je patrné, že riziko takového požáru STL plynovodu i relativně velkého průměru dosahuje pouze nižších desítek metrů.

Přijatelnost rizika: V žádném z posuzovaných scénářů nebylo dosaženo úrovně přijatelnosti rizika $10^{-3} \text{ osoba}^2 \text{ rok}^{-1} \text{ km}^{-1}$ či vyšší. Jako nejrizikovější se dle očekávání projevil plynovod DN 630 při přepravě metanu s hodnotou maxima přijatelnosti rizika $5,39 \cdot 10^{-4} \text{ osoba}^2 \text{ rok}^{-1} \text{ km}^{-1}$ ve vzdálenosti 10 m od plynovodu.

Pro ostatní posuzované plynovody byly hodnoty maxima přijatelnosti úměrně nižší, pro DN 100 činila tato hodnota pro metan $1,50 \cdot 10^{-5} \text{ osoba}^2 \text{ rok}^{-1} \text{ km}^{-1}$. Hodnoty pro blend vyšly vždy nižší než pro metan. Rozdíl mezi těmito plyny se dále navyšuje s klesajícím průměrem plynovodu. Zatímco pro DN 630 je hodnota pro blend 88 % hodnoty pro metan, v případě DN 100 činí rozdíl více než dva řády. Hodnoty maxima přijatelnosti pro vodík vyšla v řádech $10^{-10} \text{ osoba}^2 \text{ rok}^{-1} \text{ km}^{-1}$ a nižších. Takto nízké hodnoty jsou způsobeny silnými nelinearitami ve výpočtu rizika, především charakterem probitové funkce.

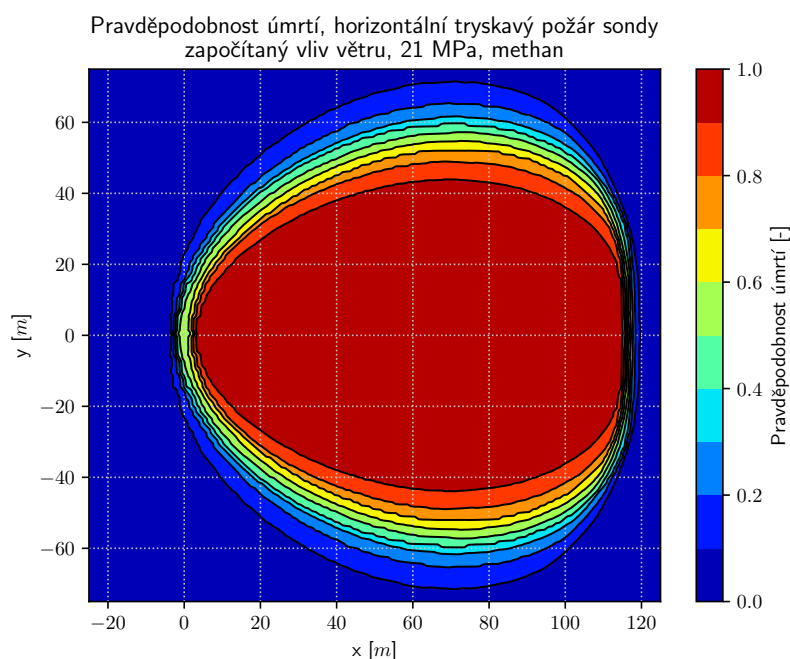
Na obrázku 10 je znázorněn průběh přijatelnosti rizika pro nejrizikovější posuzovanou situaci.

Posouzení pro tlaky nižší než 0,4 MPa nebylo nutno provádět, neboť při stejných frekvencích porušení klesá riziko s tlakem.

Tryskavý požár plynovodů PZP

Další z událostí posuzovaných v rámci Studie bylo riziko havárie plynovodních přípojek sond a plynovodů PZP se vznikem tryskavého požáru.

Scénáře: Dle zadání provozovatelů PZP byly posuzovány plynovody DN 400 s tlakem 21 MPa délky 1,62 km,



Obrázek 12: Pravděpodobnost úmrtí při horizontálním požáru sondy po započítání vlivu větru

Tabulka 6: Odstupové vzdálenosti pro sondy PZP

Odstupové vzdálenosti [m]	Objekty typu 1	Objekty typu 2	Objekty typu 3	Objekty typu 4
10 MPa				
Metan	77	75	75	0
Blend	74	72	72	0
Vodík	63	60	59	0
21 MPa				
Metan	107	105	105	0
Blend	104	101	101	0
Vodík	88	84	84	0

DN 500 s tlakem 13 MPa délky 1,57 km a DN 600 s tlakem 6,3 MPa délky 3,27 km.

Provedení výpočtu: Výpočet byl proveden jen se zanedbatelnými změnami vůči Metodice a jejím úpravám pro různé plyny popsaným výše. Malá délka posuzovaných plynovodů a předpoklad jejich rychlého uzavření po havárii se promítla do doby trvání tryskavého požáru, kterou jsme stanovili na 30 s. Vzhledem k velmi odlišným provedením plynovodů PZP, která jsou dána různou dobou jejich výstavby (od roku 1965 do roku 2016), jsme uvažovali kategorie plynovodů I a VII. Frekvence nežádoucích událostí byly shodné s frekvencemi pro VTL plynovody odpovídajících průměrů.

Přijatelnost rizika: V žádném z posuzovaných scénářů nebylo dosaženo úrovně přijatelnosti rizika 10^{-3} osoba²

rok⁻¹ km⁻¹ či vyšší. Jako nejrizikovější se projevil plynovod DN 400 kategorie I, přepravující metan, kde maximum přijatelnosti dosáhlo $3,95 \cdot 10^{-4}$ osoba² rok⁻¹ km⁻¹ pro objekty typu 1. Pro blend a pro vodík byly hodnoty nižší – v případě blendu o asi 30 %, v případě vodíku o dva řády. Ukázka průběhu přijatelnosti rizika pro tento případ je na obrázku 11. Na tomto obrázku jsou zároveň ukázány typické rozdíly průběhu přijatelnosti pro jednotlivé posuzované typy objektů.

Sondy PZP

Poslední z posuzovaných situací byla havárie sondy PZP s následným tryskavým požárem.

Scénáře: Výpočet byl proveden ve dvou variantách, pro sondy s maximálními provozními tlaky 10 MPa a 21 MPa.

Oproti všem výše popsaným případům se tento odlišuje tím, že se z principu jedná o bodový, nikoliv liniový zdroj rizika. Proto při výpočtu vynecháváme krok normalizace a přijatelnost rizika odvozujeme od veličiny RJIR, nikoliv RNIR.

Při havárii sondy s erupcí plynu do atmosféry může dojít ke dvěma základním situacím – proud erupujícího plynu směřuje svisle vzhůru z horního ramena produkčního kříže či z otevřené stupačkové kolony, nebo vodorovně z některého bočního ramena produkčního kříže.

Dále je nutno odděleně posoudit situace, kdy podpovrchový bezpečnostní ventil při havárii uzavře ložisko nebo selže. V prvním případě hoří plyn z přípojky sondy, kterého je relativně malé množství, přičemž dochází k rychlému poklesu tlaku a zmenšení plamene, případně k jeho uhasnutí. V případě selhání PBV hoří plyn z ložiska, k poklesu tlaku a zmenšení plamene nedochází (v časovém měřítku relevantním pro posuzování rizika).

Celkem tedy může dojít ke čtyřem možným situacím – tryskavý požár vodorovný / svislý, při kterém hoří plyn z ložiska / z přípojky. Pravděpodobnost vodorovného a svislého směru požáru jsme uvažovali jako stejnou, pravděpodobnost selhání PBV byla po konzultacích s provozovateli PZP a výrobní dokumentací stanovena na 2,2 %.

Celkové RJIR je tedy součtem čtyř dílčích RJIR s vahami danými pravděpodobnostmi vzniku jednotlivých scénářů. Frekvence vzniku nežádoucích událostí: Na PZP provozovaných v ČR došlo za celou jejich provozní historii pouze k jediné nežádoucí události – pád stromu na produkční kříž sondy PZP Lobodice v roce 2010. To netvoří dostatečný statistický vzorek pro výpočet střední doby mezi nežádoucími událostmi, proto pro stanovení frekvencí byla použita hodnota meze jednostranného konfidenčního intervalu s konzervativně nastavenou konfidenční úrovní 95 %. Tato hodnota pro jednu sondu vyšla a pro další výpočty byla uvažována jako $4,0 \cdot 10^{-4} \text{ rok}^{-1}$.

Provedení výpočtu: Vlastní výpočet rizika při tryskavém požáru sondy probíhal stejně jako u výše popsaných případů pro situaci svislého směru požáru, pouze se zohledněním konstantního hmotnostního toku při požáru plynu z ložiska a zohledněním kratších délek plynovodních přípojek PZP.

Pro situaci vodorovného požáru byl do numerického modelu zaveden sklon plamene vůči svislici 90° a ovlivnění plamene větrem zavedeno ve vodorovném směru.

Ukázka pole pravděpodobnosti úmrtí při vodorovném požáru přípojky je na obrázku 12.

Po výpočtu JIR, jeho redukci a sumarizaci dostáváme výslednou křivku RJIR pro danou posuzovanou situaci.

Přijatelnost rizika: Výpočet přijatelnosti rizika proběhl stejným způsobem jako v předchozích popisovaných

Výsledky ukázaly, že bezpečnostní pásma sond PZP není nutné měnit ani při skladování vodíku, protože dominantní riziko představuje horizontální požár přípojky. Upozornění si však zaslouží vysoké hodnoty přijatelnosti rizika dané četností havárií a nutnost individuálního posouzení v případě blízkého umístění více sond.

situacích. Výsledné odstupové vzdálenosti pro sondy PZP pro jednotlivé plyny a typy objektů shrnuje tabulka 6.

Výsledky výpočtu ukázaly, že současná bezpečnostní pásma sond PZP definovaná zákonem 458/2000 Sb. není se změnou skladovaného média nutno upravovat.

Oproti situacím posuzovaným na plynovodech nedochází v případě sond PZP k významnému snížení rizika pro vodík. To je dáno tím, že dominantní vliv na úroveň rizika má horizontální požár přípojky, kdy je plášť komolého kužele reprezentujícího ohňovou obálku v kontaktu se zemí, přičemž délka plamene pro vodík není významně kratší než pro metan či blend – to je ukázáno i na obrázku 2.

Dále musíme poukázat na vysoké hodnoty přijatelnosti rizika (v řádu až $10^{-1} \text{ osoba}^2 \text{ rok}^{-1} \text{ km}^{-1}$), které jsou dány vysokými hodnotami frekvencí nežádoucích událostí použitými pro výpočet (10^{-4} rok^{-1} ve srovnání s 10^{-6} rok^{-1} pro plynovody)

Musíme upozornit též na skutečnost, že provedený výpočet se týká rizika od jedné sondy. Pokud se v daném prostoru nachází více sond ve vzdálenostech menších než jejich ochranná pásma (například sondy vrtané z jedné platformy), je nutno provést výpočet rizika individuálně dle konkrétní situace a lokalizace sond.

Závěr

Výsledky řešení Studie je možno shrnout do následujících bodů:

- Blendovaný plyn i vodík je z hlediska úrovně rizika možné přepravovat plynovody všech stávajících kategorií VTL, STL i NTL plynovodů, bez nutnosti jejich dodatečných úprav a změn odstupových vzdáleností či bezpečnostních pásem.
- Riziko potrubní přepravy blendu je kvantitativně takřka totožné s rizikem přepravy zemního plynu. Předpokládaná větší pravděpodobnost vznícení blendu je vyváжена jeho menší energetickou hustotou a tím i menšími následky případného požáru.
- Riziko potrubní přepravy vodíku je významně menší než riziko přepravy zemního plynu, což je dáno jeho výrazně nižší energetickou hustotou.

- Výpočetní postupy a algoritmy použité pro stanovení rizika blendu a vodíku by bylo vhodné kodifikovat a ukotvit v plynárenských předpisech, případně legislativě, a provést aktualizaci Metodiky v tomto směru.
- V oblasti výpočtu rizika jednotlivých typů požárů existuje značný prostor pro jejich zpřesňování – pokrok v numerických metodách a rostoucí výkon výpočetní techniky umožňují postupy, které byly v době tvorby Metodiky nepraktické pro svoji výpočetní náročnost. Jde například o výpočet tryskavého požáru s plamenem proměnným v čase, bleskového požáru s klesajícím výtokem z potrubí či postupná integrace tepelné expoziční dávky s měnícím se tepelným tokem a pohybem zasažené osoby od zdroje rizika.
- Riziko posuzovaných plynovodů PZP při skladování blendu a vodíku je přijatelné, odstupové vzdálenosti objektů všech typů vyšly nulové.
- Při havárii sondy je PZP největším zdrojem rizika horizontální tryskavý požár přípojky. Při něm není velký rozdíl mezi jednotlivými posuzovanými plyny.
- Vypočtené odstupové vzdálenosti sond PZP při skladování blendu a vodíku jsou menší než jejich současná bezpečnostní pásma stanovená Energetickým zákonem.

Literatura

- [1] Severýn O., Kamenický J., Novák J., Zajíček J.: Výpočet rizika při přepravě a skladování vodíku a směsi vodík – zemní plyn. FM TUL, Liberec, 2024.
- [2] Kolektiv autorů: Metodika pro stanovení rizika v okolí plynovodu. Český plynárenský svaz, 2013.
- [3] Novák J., al., et.: Stanovení minimální vzdálenosti staveb od plynovodů. AMMA, s.r.o., Liberec, 2016.
- [4] Novák J.: Postup stanovení rizika v okolí plynovodu. Plyn XCIV, str. 100–107, Praha, 2014.
- [5] Koutský B., Malecha J.: Stavové a transportní vlastnosti topných plynů. Plynárenská příručka. GAS, s.r.o., Praha, 1997.

Studie potvrdila, že přeprava blendu i vodíku je bezpečná ve všech kategoriích plynovodů bez nutnosti dodatečných úprav či změn bezpečnostních pásem. Riziko je u blendu srovnatelné se zemním plynem a u vodíku dokonce nižší, což otevírá prostor pro zakotvení aktualizovaných výpočetních postupů do legislativy.

- [6] Committee for the Prevention of Disasters (CPR), Directorate – General of Labour of the Ministry of Social Affairs: Methods for the calculation of physical effects resulting from releases of hazardous materials (liquids and gases). (TNO Yellow Book). Hague, 2005.
- [7] European Gas Pipeline Incident Data Group: Gas Pipeline Incidents (period 1970–2019). EGIG, Groningen, 2020.
- [8] Kec J., Šperl M.: Posouzení příčin poruch plynovodů při přimíchání vodíku do zemního plynu. SVÚM, a. s., Čelákovice, 2024.
- [9] Johnson A. D., Brightwell H. M., Carsley A. J.: A model for predicting the thermal radiation hazards from large-scale horizontally released natural gas jet fires. Process safety and environmental protection 72, 1994.
- [10] Froeling H. A. J., Droge M. T., Nane G. F., Van Wijk A. J. M.: Quantitative risk analysis of a hazardous jet fire event for hydrogen transport in natural gas transmission pipelines. International Journal of Hydrogen Energy 46, Elsevier, 2021.
- [11] Groethe M., Merilo E., Colton J., Chiba S., Sato Y., Iwabuchi H.: Large-scale hydrogen deflagrations and detonations. International Journal of Hydrogen Energy 32, Elsevier, 2007.



doc. Ing. Otto Severýn, Ph.D. (*1994)

Vystudoval Fakultu strojní Technické univerzity v Liberci, obor ASŘ ve strojírenství (1997). V rámci doktorského studia (ukončeno 2002) se věnoval problematice numerického modelování podzemního proudění a transportu látek. V roce 2003 začal spolupracovat se s.p. Transgas, oddělením Geo Services v oblasti modelování a simulace vícefázového proudění při výstavbě a provozu podzemních zásobníků plynu. V roce 2022 se začal zabývat problematikou spolehlivosti a rizika v plynárenství. Je autorem či spoluautorem několika článků v oboru numerického modelování pohybu fluid v horninovém prostředí.