

MultHyFuel Projekt – rövid ismertető és az eredmények elérhetősége

hidrogén üzemanyag biztonsági és engedélyezési vonatkozásai multi-üzemanyag töltőállomásokon

A MultHyFuel nevet viselő, EU-s projekt 2021 tavaszán indult útjára azzal az alapvető céllal, hogy vizsgálja a hidrogén üzemanyag, illetve -töltőállomások biztonságos integrálhatóságát más, hagyományos (benzin/dízel), valamint egyéb alternatív üzemanyag (pl. CNG, elektromos) töltőállomásokhoz, azaz kifejezetten multi-üzemanyag töltő-állomások kialakításának, engedélyeztetettségének segítése a fő célja. A projektben összesen tizennégy EU tagállam, illetve Norvégia vett részt. Magyaror partnerként Egyesületünk a WP-1 (kiindulási) munkafeladatban, azaz a tagállamok meglévő jogszabályi hátterének felmérésében vett részt. A projekt feladatainak dandárját azon tagállamok, illetve cégek végezték, ahol jelentős számú hidrogén-töltőállomás (HRS) van, és kellően nagy mennyiségű engedélyezési tapasztalat gyűlt már össze eddig is, illetve ambiciózus célok léteznek a H₂-töltőinfrastruktúra fejlesztésére.



2025 júniusára végéhez ért a MultHyFuel projekt, elkészült több fontos riportja, köztük a végső jelentés, amely a „Developing Good Practice Guidelines in Project MultHyFuel” (Deliverables 3.7 and 3.8, 2025) címet viseli. Jelen összefoglaló célja, hogy megismertesse a hazai szakmai közvéleménnyel is a MultHyFuel projekt eredményeit, közte főként a hivatkozott „3.7/3.8 jó gyakorlatok” útmutatót, mert ez segítheti a hidrogén-töltőállomásokhoz kapcsolódó hazai szabályozási, engedélyezési háttér fejlődését. A projekt dokumentumokban leírtakat azért is tartjuk értékes információforrásnak, mert egyes esetekben valós kísérleti eredményeken alapulnak, például 1:1 modell hidrogén-töltőállomásokon bekövetkező hidrogénszivárgás és tűz hatásait modellezzik biztonságos tesztkörnyezetben, ami értékes tapasztalatokat szolgáltat pl. a szükséges, hidrogén-specifikus védőtávolságok megállapításához. Jelen összefoglalót, illetve a MultHyFuel projekt eredményeit főként a hidrogén-töltőállomások tervezőinek, a beruházóknak, engedélyező hatóság képviselőinek, illetve a szakterületi jogalkotóknak ajánljuk és gondoljuk hasznosnak.

A MultHyFuel projekt támogatást kapott a Clean Hydrogen Partnership-től (CHP) a **101006794** számú támogatási megállapodáson keresztül.



A projekt koordinátora a Hydrogen Europe, a projekt konzorcium tagjai a következő cégek:

EU COVERAGE & REPRESENTATIVENESS		
COUNTRY	ORGANIZATION	
AT	Austrian Energy Agency	
BE	WaterstofNet vzw	
BG	Bulgarian Hydrogen, Fuel Cell and Energy Storage Association	
FI	VTT Technical Research Centre of Finland LTD	
FR	France Hydrogene	
DE	ZSW Center for Solar Energy and Hydrogen Research	
HU	Hungarian Hydrogen & Fuel Cell Association	
IT	H2IT - Italian Hydrogen and Fuel Cell Association	
NL	NEN	
PL	NEXUS Consultants	
ES	Aragon Hydrogen Foundation	
SE	Hydrogen Sweden	
UK	ITM Power	
NO	Greenstat	

A projekt weboldala, illetve a keretében kidolgozott, nyilvánosan elérhető tanulmányok:

www.multhyfuel.eu

<https://multhyfuel.eu/progress>

A MultHyFuel projekt keretében készített és nyilvánosan elérhető szakmai anyagok

E rövid összefoglaló keretében még a fő forrásnak számító D3.7 / D3.8. útmutatót sem tudjuk minden részletében áttekinteni, de törekedtünk néhány érdemi rész bemutatására, hogy a téma iránt érdeklődő szakemberek gyors áttekintést kaphassanak és a megadottak alapján akár tovább tudjanak kutatni. Ezen túlmenően a következőkben felsoroljuk a projekt keretében publikált különböző tanulmányokat, útmutatókat, vizsgálatokat, amelyek szintén hasznosak lehetnek; ezek a következő linken érhetők el közvetlenül:

<https://multhyfuel.eu/progress>

Dokumentum kód	Eredménytermék címe
D 1.2	Engedélyezési követelmények és kockázatértékelési módszertanok a hidrogén-töltőállomásokra (HRS) vonatkozóan az Európai Unióban (első változat) <i>Permitting requirements and Risk assessment methodologies for HRS in the EU (First version)</i>
D 1.4	Engedélyezési követelmények és kockázatértékelési módszertanok a hidrogén-töltőállomásokra (HRS) vonatkozóan az Európai Unióban (végső változat) <i>Permitting requirements and Risk assessment methodologies for HRS in the EU (Final version)</i>
D 2.2	Nagy nyomású H ₂ diszperziójának vizsgálata <i>Assessment of dispersion for high pressure H₂</i>
D 2.4	Tűz- és robbanásveszély vizsgálatának összefoglaló jelentése <i>Fire and explosion hazard assessment summary report</i>
D 3.1	Legkorszerűbb technológiák <i>State of the art – technologies</i>
D 3.2	A töltőállomásokon alkalmazott kockázatértékelési módszertan összehasonlító vizsgálata <i>Benchmarking of risk assessment methodology applied to refuelling stations</i>
D 3.6	Multi-üzemanyag töltőállomások kialakítására vonatkozó ajánlások (elhelyezési távolságok / veszélyes zónák kategorizálása) <i>Layout recommendations for multi fuel stations (separation distances/hazardous areas classification)</i>
D 3.7 & 3.8	Jó gyakorlat útmutató fejlesztése a MultHyFuel projekthez. 2025.06.13. <i>Developing Good Practice Guidelines in Project MultHyFuel</i>
D 4.6	A fő érdekelt felek aláírt támogató nyilatkozat a közös szabályok megalkotására a hidrogén-töltőállomások kockázatértékelésére és engedélyezésére multi-üzemanyag töltőállomásokon <i>Signed endorsement of key stakeholders to strive for the adoption of common rules for the risk assessment and permitting of hydrogen refuelling stations in multi-fuel environment</i>
D 5.1	Kommunikációs, disszeminációs és hasznosítási terv <i>Communication, dissemination and exploitation plan</i>

Jelen összegzés további része dominánsan a projekt szempontjából a legfontosabb, összegző jellegű és egyben a legfrissebb jelentés, a D 3.7 & 3.8 útmutatóból, illetve a projekt weboldaláról származik.

Általános célok

A MultHyFuel projekt általános célja, hogy támogassa a hidrogén-töltőállomások (HRS) multi-üzemanyag töltőállomások keretében történő megvalósítását, segítse egy lehetőleg EU szinten harmonizált, közös műszaki, engedélyezési keretrendszer kidolgozását. A projekt egyik erőssége, hogy nem csak szakirodalmi, vagy modellszámítási adatokból dolgozik, hanem például hidrogénszivárgásokra vonatkozó kulcsfontosságú kísérleti adatokat is generáltak valós tesztkörnyezetben és ezeket megosztották az érintett érdekelt felekkel, többek között a kockázatértékelési modellek validálása céljából. A kockázatértékelési (*Risk Assessment*) technikákat több esettanulmányon tesztelték a projektben, a kockázatkezelési intézkedések, biztonsági korlátok hatásának tanulmányozása érdekében. A WP-2 feladatcsomag tartalmazta a gyakorlati kutatási és kísérleti laboratóriumi munkákat, amelyek a szabályok, szabványok megalkotásához hiányoztak. A projekt egyik feladata (3.7) egy ún. „Jó gyakorlat útmutató” (*Good Practice Guideline*) megalkotása, amely fő alapját képezi jelen összegzésnek.

Számos EU tagállam HRS engedélyeztetésében a kockázatértékelés a központi fogalom és elvárás. Míg a valószínűség és a súlyosság határozza meg a kockázat szintjét, a súlyosság meghatározására szolgáló technikák (azaz az ártalomnak kitett népesség becslésére szolgáló módszerek) nem képezik e munka részét; ehelyett a kockázatértékelési folyamat részét képező következményértékelési technikákra összpontosít a projekt. A veszélyek azonosítása vitathatatlanul a kockázatértékelési folyamat legfontosabb része. Minden azonosított veszélyre vonatkozóan megfelelő és elégséges kockázatértékelést kell készíteni. A nyilvántartásban fel kell tüntetni azokat az intézkedéseket, amelyek a kockázatok megfelelő ellenőrzéséhez szükségesek, kockázatcsökkentő, védelmi intézkedések, biztonsági korlátok révén.

Lehatárolások: a feladat nagyságrendje és a projekt véges időtartama, véges erőforrásai miatt bizonyos lehatárolások is vannak. A projekt részletes kutatási fázisának középpontjában a H₂-töltőállomás diszpenzereinek (kútoszlopok) kockázatainak vizsgálata állt; a nagy mennyiségű H₂-tárolás, a H₂ helyszíni előállítása vagy kezelése (pl. tisztítása) nem képezte a projekt tárgyát. A kísérleti program nem terjedt ki továbbá cseppfolyós hidrogénnel kapcsolatos kibocsátásokra sem, mert ilyen töltőállomás egyelőre csak elvétve létezik. A lehatárolások részletesen az (3.7 & 3.8) útmutató 2.2 fejezetében találhatók.

A hidrogén-töltőállomás berendezéseiből hidrogén szivárgás esetén a következő következmények adódhatnak:

- azonnali gyulladás esetén **jet fire** (lángsugár, szúróláng) jellegű égés, ami hőhatásokkal jár
- a hidrogénfelhő késői begyulladás esetén **flash fire** (lobbanásos tűz, villámégés), ami hőhatásokkal jár
- **szabadban térben bekövetkező gőzfelhő-robbanás (UVCE)**, amennyiben a hidrogénfelhő késleltetve gyullad meg, túlnyomáshullámokat idézve elő
- **zárt térben bekövetkező gőzfelhő-robbanás (VCE)**, amennyiben a gyújtás zárt térben (pl. tartályban, adagolóberendezésben [esetünkben a diszpenzerben]) késleltetve történik, túlnyomáshullámokat idéz elő. Detonáció valószínűleg nem következik be, mivel a tipikus HRS diszpenzerek nem biztosítanak elegendő zárttságot – például az alsó nyitott panelek vagy a szellőzőnyílásaik miatt –, és a diszpenzerek valószínűleg nem rendelkeznek elég nagy L/D (hossz/átmérő) aránnyal ahhoz, hogy kialakuljon a DDT azaz a deflagrációból detonációba való átmenet állapota. Továbbá a gyújtóforrások sem elég erősek ahhoz, hogy túlhajtsák a folyamatot detonációig. Érdemes azonban megjegyezni, hogy a keletkező túlnyomás mértéke több tényezőtől függ, például az diszpenzeren belüli szerkezetek, alkatrészek „zsúfoltságától”, a szellőzés (vagy gyenge szerkezeti elemek általi nyomáscsökkentés) lehetőségétől, a gyúlékony gáz koncentrációjától, a gyújtóforrás erősségétől, valamint a gyújtás késleltetésének idejétől stb.

A MultHyFuel projekt részletes kockázatértékelésében használt **ártalom (harm) kritériumok** az 1. táblázatban találhatók.

1. táblázat: ártalom (harm) kritériumok a hidrogén-szivárgási szcenáriók vizsgálatához a projektben

	Radiative heat fluxes	Overpressures	Whipping
Significant Lethal Effects (5%)	8 kW.m ⁻²	200 mbar	-
First Lethal Effects (1%)	5 kW.m ⁻² or 100% LFL	140 mbar	100% hose length
Irreversible Effects	3 kW.m ⁻² or 110% LFL	50 mbar	110% hose length
Indirect Effects (glass break)	-	20 mbar	-

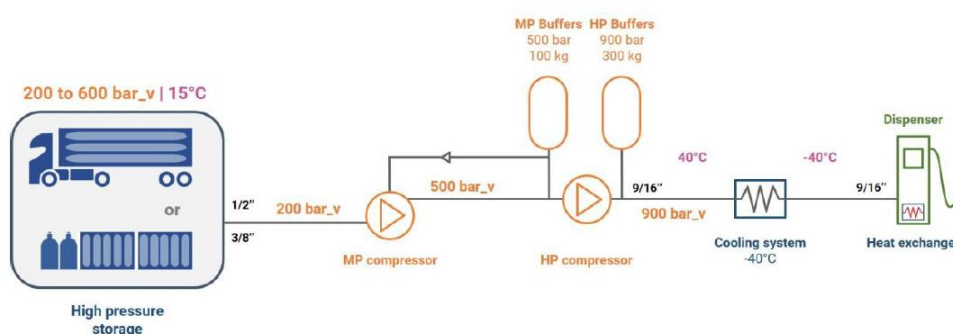
LFL: Lower Flammability Limit

Vannak azonban olyan információk, amelyek más hidrogénalkalmazásokból vagy más iparágakból származnak, és felhasználhatók az ártalom (*harm*) kritériumok meghatározásához. Pl. Nagy-Britanniában a szabályozás nem előíró jellegű; ezért nincs kötelezően alkalmazandó károsodási kritérium a súlyos baleseti veszélyek kockázatértékeléséhez. Az EU PRESLHy (*Pre-normative REsearch for Safe use of Liquid Hydrogen*) projektjének D6.2 számú jelentése, *Novel guidelines for safe design and operation of LH₂ systems and infrastructure* címmel, szintén tartalmaz információt a károsodási kritériumokról az I. mellékletében (PRESLHy, 2021).

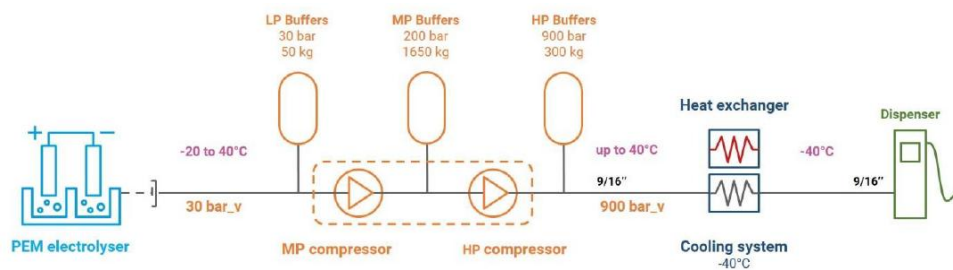
Vizsgált HRS konfigurációk

A H₂-üzemanyagtöltő (HRS) állomásokhoz kapcsolódó meglévő technológiák és berendezések összehasonlító elemzését követően a MultHyFuel projektben **három konfigurációt határoztak meg** esettanulmányként:

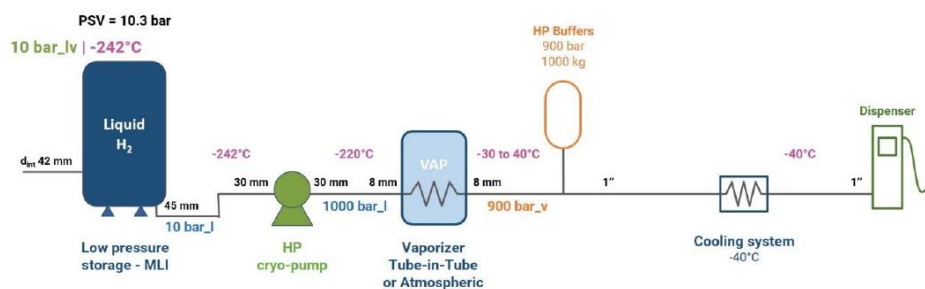
- Konfig. #1: készen álló (*Ready-to-Deploy multi fuel station*), több üzemanyaggal működő töltőállomás: gáznemű hidrogén könnyű és nehézgépjárművek számára, nagynyomású tárolóval (pótkocsik vagy palackkötegek), külvárosi/városi helyen. Ennek vázlatos kapcsolási rajza itt látható:



- Konfig. #2: helyszíni (onsite) hidrogén-előállítással rendelkező, multi-üzemanyag töltőállomás: gáz halmazállapotú hidrogén könnyű és nehézgépjárművek tankolására, elektrolízisen alapuló, helyszíni (zöld) hidrogén-termeléssel, külvárosias helyszínen (tréler pótkocsi használható tartalék tárolóként)



- Konfig. #3: nagy H₂-tárolókapacitású és nagy -töltőképességű, multi-üzemanyag töltőállomás: a hidrogén iránti jövőbeli nagy mobilitási igények esetére, ipari helyszínen, nehézgépjárművek gáz halmazállapotú hidrogénnel való ellátására, folyékony hidrogén állandó tárolásával, ipari zónában.



A projektben *top-down* HAZID megközelítést alkalmazva, a következő veszélyes forgatókönyveket / veszélyes jelenségeket (DPH – *Dangerous Phenomenon*) azonosították:

2. táblázat: az egyes konfigurációk esetében azonosított veszélyes jelenségek (DPh) listája

Dangerous phenomena/ hazardous scenarios	Configuration #1	Configuration #2	Configuration #3
Jet fire	✓	✓	✓
Flash fire	✓	✓	✓
Vapour Cloud Explosion (VCE)	✓	✓	✓
Unconfined Vapour Cloud Explosion (UVCE)	✓	✓	✓
Catastrophic rupture (e.g. mix of H ₂ /Air or overpressure)	✓	✓*	✓
Asphyxiation (no ignition)	✓	✓	✓
Fireball	✓	✓	✓
Hazards due to cryogenics			✓
Liquid H ₂ pool fire			✓
Whipping of hose	✓	✓	✓
Unexpected fire due to oxygen enrichment		✓	

*additional scenario for a mix of H₂/O₂

A szokásosnak tekinthető „súlyosság” és „gyakoriság” dimenziókon keresztül vizsgálták jelen esetben is a kockázatot (*risk assessment*). Ez alapján, az érdemi kockázatu esetekből 258 veszélyes jelenséget (DPh-t, *Dangerous Phenomenon*) vizsgáltak a projektben. Ezek közül pl. 26 veszélyes jelenség mindhárom HRS-konfigurációnál felléphet, 39 DPh jelenség csak az #1 konfigurációnál, 66 DPh specifikus a #2 konfigurációra, és 93 kritikus DPh szcenárió lehet a #3 konfiguráció esetén.

A HAZID keretében figyelembe vett¹ kritikus szcenáriók a következők:

Considered equipment	Configurations #1-3
Dispenser	- Internal release not reaching flammable limits in terms of accumulation inside the entire volume of the dispenser, but H₂ jetfire hazards considered: * without immediate ignition * with immediate ignition (flame) - Internal release reaching flammable limits (i.e. maximum concentration inside the dispenser exceeds 4% H₂) followed by ignition (VCE)
Hose	- Release with immediate (flame) or delayed ignition (UVCE) – 700 bar - Release with whipping of hose
Nozzle	- Release with immediate (flame) or delayed ignition (UVCE) – 700 bar

Meghibásodási valószínűségek (pl. általános meghibásodási adatbázisokból származó adatok)

A MultHyFuel kockázatelemzési gyakorlata során megállapították, hogy a különböző általános meghibásodási adatbázisok (pl. BEVI, 2020; SANDIA BD Ehrhart & ES Hecht, 2022; Offshore Norway/ Norske olje og gass PLOFAM2, 2018) között nagy eltérések vannak a valószínűségi becslésekben. A Sandia a hidrogénspecifikus szivárgási gyakoriságokat a szivárgás területének/méretének függvényében fejlesztette ki Bayes-féle statisztikai elemzéssel, hogy az általános adatbázisokból hidrogénspecifikus adatokat állítson elő: tengeri kőolaj, vegyi folyamatok, sűrített gáz és nukleáris ipar (LaChance, 2008). Várható volt, hogy az adatbázisok között lesz némi különbség, például a Sandia és a Norskeolje&gass PLOFAM adatbázisa között, azonban a BEVI adatai több nagyságrenddel eltérnek a másik két adatbázisától.

Következmények és az elvégzett kísérletek eredményei (4. fejezet)

Egy veszélyes esemény kockázata az esemény súlyosságának és valószínűségének kombinációja. A tanulmány 4. fejezete a következményekkel foglalkozik. Bemutat néhány elérhető mérnöki módszert a

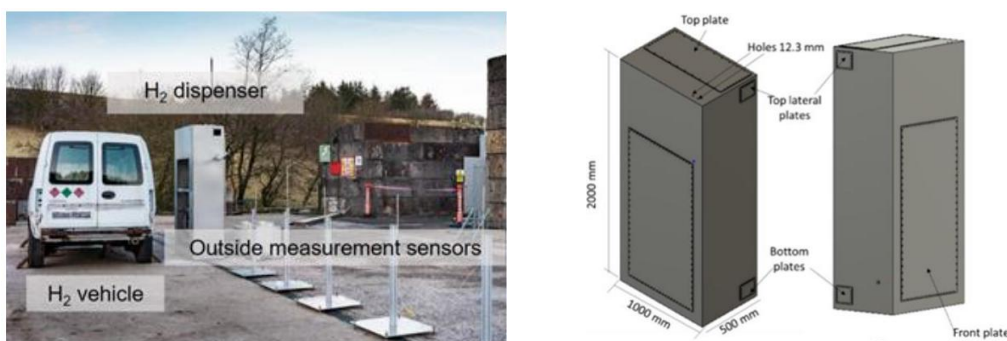
¹ A projekt limitációi miatt az üzemanyagtöltő állomás „hátsó udvarából”, azaz a nem nyilvános, hidrogéntároló, puffertartály, elektrolizáló, hűtők, kompresszorok stb. származó kockázatokat nem értékelték teljes körűen, hanem az itt leírtak főként az ügyfelek (tankolást végző „civil” személyek) által bejárható területre, a diszpenzer környezetére fókuszáltak.

következmények és a súlyosság felmérésére. Összehasonlításokat végez a MultHyFuel projekt keretében végzett számítások és kísérletek között, hogy értékeljék egyes analitikai modellek relevanciáját, pontosságát és korlátait. A MultHyFuel projektben a hangsúly az adagolószerkezet (diszpenzer) és a töltőállás-forgatókönyveken volt. A valós HRS alkalmazások esetében a HRS elhelyezéséből, valamint a hidrogén tárolásából és kezeléséből eredő kockázatokat is fel kell mérni a teljes kockázati kép kialakításához. Általánosságban elmondható, hogy a HRS konfigurációjától függetlenül a forgatókönyvek nagyon hasonlóak a töltőállás területén.

A MultHyFuel projektben végzett **kísérleti munka fő célja** a kockázatelemzéshez szükséges **hiányzó adatok előállítása** és a HRS kockázatcsökkentésének megvalósítása volt multi-üzemanyag töltőállomás kontextusban. A négy fő célkitűzés a következő volt:

- az áramlási sebességek, a veszélyes zónák kiterjedésének és a gyulladási valószínűségek meghatározása a HRS-en bekövetkező potenciális súlyos veszélyhelyzetek esetén
- a következmény-modellező eszközökkel nem elemezhető, kulcsfontosságú tűz- és robbanási forgatókönyvek kísérleti vizsgálata
- a projektben azonosított kulcsfontosságú biztonsági gátak teljesítményének és megbízhatóságának tesztelése valós körülmények között és
- kísérletek elvégzése a hidrogén-adagolókra gyakorolt veszélyes események hatásának becslésére más adagolótípusokra egy multi-üzemanyag töltőállomás előterében és fordítva.

A projektben megépített teszthelyszín, egy HRS „előtere” (töltőállása), valós járművel és töltőállomással, 350 és 700 bar tankolási opciók esetére, a következő ábrán látható.



1. ábra: kísérleti modell egy HRS tankolótere (forecourt) az alapkiépítésben, főbb méretei és műszerezettsége

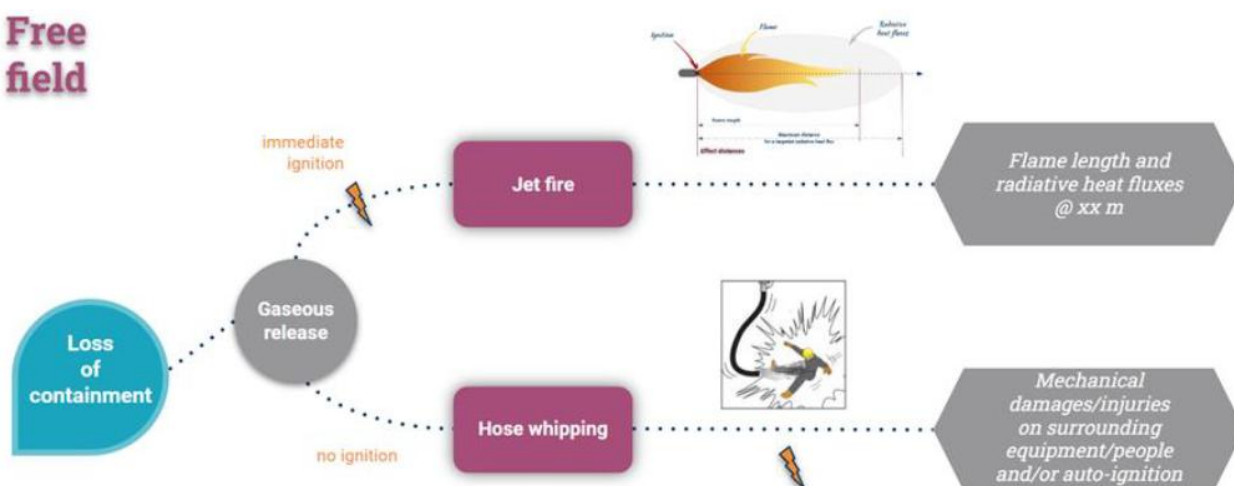
A hidrogénkibocsátás veszélyes eseményeit a következő ábra szemlélteti. (A „hose whipping” a tömlőcsapódás veszélyeit jelenti; ez olyan veszélyes jelenség, amely akkor fordul elő, amikor egy nyomás alatt álló tömlő hirtelen elszabadul (például a csatlakozás megsérül vagy leválik), és a benne áramló közeg ereje miatt kontrollálatlanul csapkod.

Következmények a hidrogéndiszpenzeren kívül:

Az adagolótömlő meghibásodásából eredő, hidrogén kiszabadulását okozó lehetséges következményeket kísérletileg értékelték az adagoló makettjének felhasználásával. Egy lángsugár (*jet fire*) keletkezett, amelynek hosszát nagymértékben meghatározzák a hidrogéngáz áramlási jellemzői és nyomása. Egy tipikus *jet fire* látható a 12. ábrán; a hidrogénláng szabad szemmel alig látható. Az infravörös (IR) láng több mint 5 m hosszú volt egy meggyújtott H₂-kibocsátás esetén a külső vízszintes szivárgáson keresztül egy 3/8”-os csövön (70 g_{H2}/s) 700 bar nyomáson; és körülbelül 4 m hosszú 35 g_{H2}/s sebességű kibocsátás esetén 300 bar nyomáson. A lángsugárban mért maximális hőmérséklet körülbelül 1200 °C. A MultHyFuel D2.4 (2024) tanulmányban ezeket az eredményeket összehasonlítják a *Proust & Studer, High Pressure Hydrogen Fires (2011)* eredményeivel, akik hasonló, 5 m-es lánghosszakat figyeltek meg egy 80 g/s tömegáramú, 2 mm-es

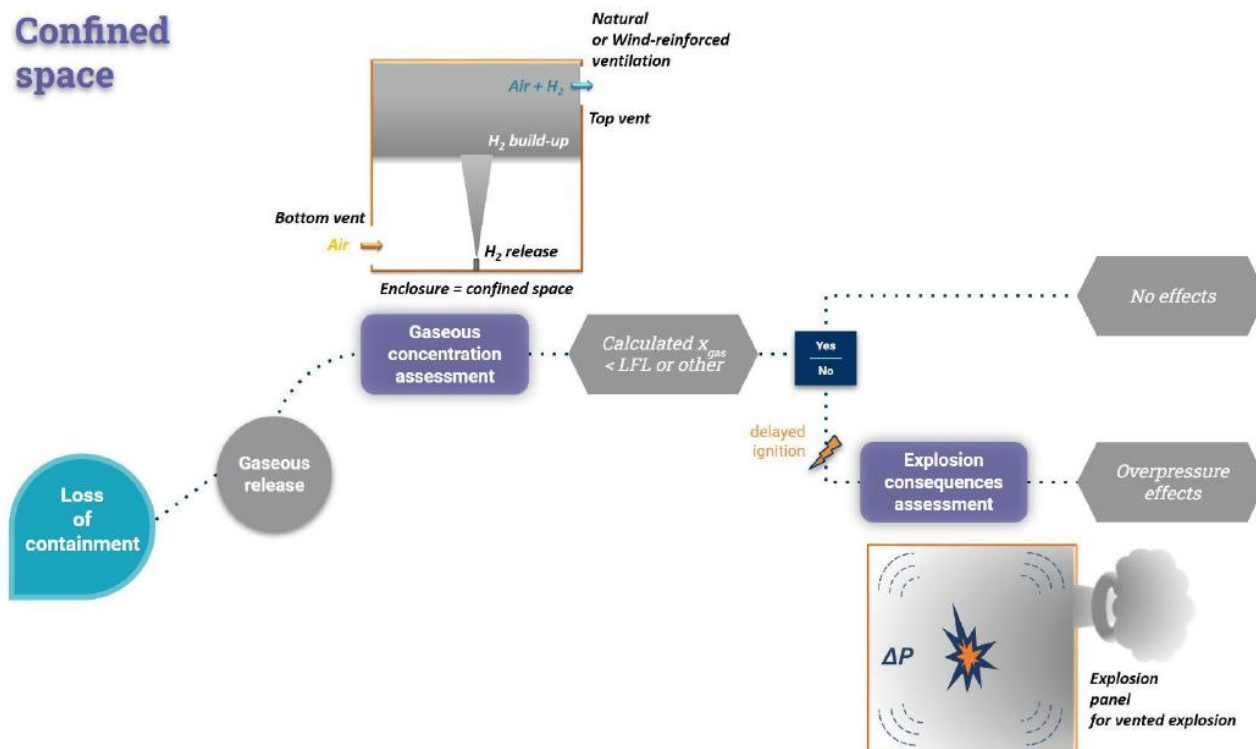
lyukon keresztüli kiáramlás (gázszökés) esetén 900 bar nyomáson. További munkára lesz szükség annak megállapítására, hogy elérhető-e hosszabb lánghosszak, vagy a lángok körülbelül 5 m-re korlátozódnak-e; ezt olyan modellekkel kell összehasonlítani, mint a *Molkov & Saffers, Hydrogen Jet Flames, 2013*.

Free field



2. ábra: potenciális veszélyes események szabadtéren hidrogénszivárgás esetén HRS esetében

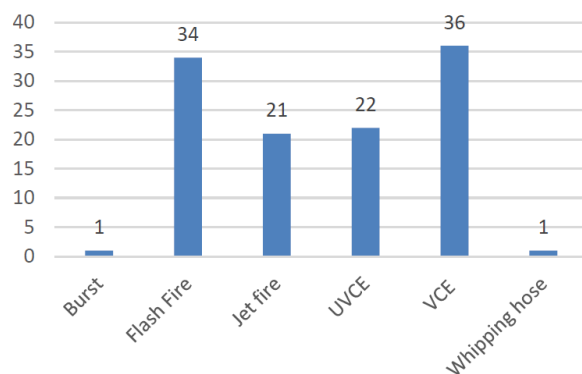
Confined space



3. ábra: potenciális veszélyes események zárt, de szellőzéssel rendelkező térben H₂ szivárgásnál

A meggyújtott kibocsátások láng- és hőmérsékleti hatásai jelentősnek bizonyultak, és 700 bar nyomáson akár 5 méterre is kiterjedtek. Meg kell jegyezni, hogy ezekben a kísérletekben a valós adagolóknak elértekhez képest csökkent és csökkenő áramlási sebességek voltak megfigyelhetők, így ez a távolság növekedhetett.

Az elvégzett kísérletek azt mutatták, hogy a tömlő csapkodása önmagában nem elegendő a benne lévő/belülről kibocsátott hidrogén meggyújtásához. A tömlő csapkodás közben jelentős mechanikai ütközési kockázatot jelent, amely hatással lehet a közelben tartózkodó emberekre, járművekre vagy berendezésekre.



4. ábra: a biztonság szempontjából kritikus főbb veszélyes események²

Következmények a hidrogéndiszipenzeren belül:

A MultHyFuel projekt WP2 munkafázisban végzett kísérletei kimutatták, hogy a tesztelt hidrogéndiszipenzerek konfigurációiban nem volt kellően zárt térrész, nem volt kellően „légtömör” (a nyitott aljzat, szellőzőnyílások stb. miatt) a detonáció bekövetkezéséhez. A H₂-diszipenzer nem rendelkezett elég nagy hosszúság-átmérő (L/D) aránnyal a deflagrációból detonációba (DDT) történő átmenethez, és nem volt elég nagy (energiájú) gyújtóforrása sem ahhoz, hogy túlhajtja a folyamatot a detonációba. A hidrogénkiáramlás egy csövön, 0,2 mm és 0,5 mm átmérőjű kibocsátónyíláson érdemi veszélyt jelentett a modell diszipenzerre. A környező berendezésekre és a multi-üzemanyag töltőállomáson tartózkodó személyekre gyakorolt eszkalációs kockázata ebben az esetben nem nulla. A legnagyobb veszélyt a 0,2 mm átmérőjű lyukból 700 bar nyomáson, standard szellőztetéssel kibocsátott, meg nem gyulladt hidrogén jelentette, mert a modell adagolóházán belüli maximális hidrogén-felhalmozódás 26 térfogatszázalék volt (ami közel sztöchiometrikus). A passzív szellőztetőfelület növelése a modell diszipenzer házában csökkentette a felhalmozódó hidrogén koncentrációját.

Az diszipenzerben keletkező belső hidrogénszivárgás gyúlékony koncentráció kialakulását okozhatja az adagolón kívül. A kísérletek, amelyekben egy 1,5 m távolságban lévő pirotechnikai gyújtóforrást használtak, kimutatták, hogy a H₂ gáz külső gyulladása előfordulhat, amely ezután visszaég a szivárgás forrásáig, és stabil *jet fire*-ként funkcionál. Ez a *jet fire* jelentős károkat okozott az adagolóházban belüli berendezésekben, de az adagolón belüli nyomás csökkent (a belső gyulladáshoz képest) és a ház túlélte a kárt. Gyengített burkolóelem beépítésével érdemben csökkenthető volt a diszipenzerben kialakuló túlnyomás. A gyenge panel beépítése megakadályozta, hogy az adagoló ajtaja kilöködjön a makett adagoló házából, és így másodlagos sérülést okozzon. A gyengített panel(ek), nyílás(ok) elhelyezését gondosan mérlegelni kell, mivel a gyenge panel a nyomás-, a láng- és a hőmérséklet hatásokat ebbe az irányba irányítja.

Következmények tömlőszakadásból:

A valószínűbb forgatókönyv és egy nehezebben mérsékelhető veszély, amikor az adagolótömlőből a töltőállásban („*forecourt*”) történő véletlen kiömlés begyullad; ez felhasználható az elhelyezési távolságok meghatározására. Megjegyzendő, hogy a MultHyFuel kísérleteit csökkentett áramlási sebességgel végezték a sugárkibocsátásokat (70 g_{H₂}/s - 700 bar; és 35 g/s - 300 bar nyomáson), azonban más, 80 g/s sebességű és 900 bar nyomású kibocsátással végzett kísérletek, amelyeket a MultHyFuel D2.4 (2024) idéz, hasonló, körülbelül 5 m-es *jet fire* sugárhosszúságokat mutattak.

² A rövidítések jelentését lásd a rövidítések jegyzéke fejezetben a 13. oldalon.

Néhány országban kötelező az adagolótömlő elé áramláskorlátozókat beszerelni. Az adagoló tipikus áramlási sebessége személygépkocsiknál 60 g/s (700 bar), buszoknál pedig 120 g/s (350 bar). Vannak azonban nemzetközi munkacsoportok, amelyek például a 180 g_{H2}/s jövőbeni töltési tömegáram alkalmazását vizsgálják³ nehézgépjárműveknél.

A MultHyFuel projektben a *jet fire* a legrosszabb eset, ha csak a tankolóállásból (*forecourt*) származó veszélyeket vesszük figyelembe, összehasonlítva a diszpenzerben fellépő robbanással, amely a túlnyomás távolsággal történő gyors csökkenése miatt következik be, összehasonlítva a tartós láng termikus hatásaival, ha a kibocsátást nem állítják meg.

A fent említett áramlási sebességeket figyelembe véve a HSE és más MultHyFuel kísérletek összhangban vannak a modellezési következmények kiszámított áramlási sebességeivel, lásd a következő táblázatot, amely a MultHyFuel D3.6 (2024) tanulmány 51. táblázatából származik. Megállapították, hogy a lánghossz-távolságok 6 m-es tartományban vannak egy elméleti 120 g/s áramlási sebességű tankolás esetében bekövetkező baleseti gázkiáramláskor.

3. táblázat: számított és mért lánghosszak különböző kiömlési tömegáramok, valamint nyomások esetében

Flow rate	Pressure	Equivalent diameter	Flame length
Calculated values from HRS process data			
60 g.s ⁻¹	700 bar	1.43 mm	4.3 m
120 g.s ⁻¹	700 bar	6.1 mm	6.1 m
180 g.s ⁻¹	700 bar	2.5 mm	7.6 m
300 g.s ⁻¹	700 bar	3.2 mm	9.7 m
120 g.s ⁻¹	350 bar	2.8 mm	6.4 m
Measured values from HSE experiments			
36 g.s ⁻¹	30 bar	5.3 mm	3.8 m
63 g.s ⁻¹	53 bar	5.3 mm	5 m

Megjegyzés: a jelenlegi francia szabályozás (*Légifrance Arrêté 1416, 2018*) 14 m-es elhelyezési távolságot (*separation distance*) ír elő 120 g_{H2}/s tankolási tömegáram esetén és 10 m-es elválasztási távolságot 60 g/s esetén. Ezek a szükséges távolságok bizonyos körülmények között – nevezetesen, ha az automatikus biztonsági intézkedések 2 másodpercen belül leállítják a gázömlést a repedés helyén – 10 méterre (120 g/s esetén) és 8 méterre (60 g/s esetén) csökkenthetők. Más országokra vonatkozó elhelyezési távolságok a *MultHyFuel D1.4 (2024)* dokumentumban találhatók. Érdeemes megjegyezni, hogy a lánghossz nem feltétlenül számít elhelyezési távolságnak. Az LFL (biztonsági tényező alkalmazásával vagy anélkül) is alkalmazható releváns elkülönítési távolságként. A (BCGA GN41, 2020) dokumentum némi kontextust nyújt az elhelyezési távolság jelentésével kapcsolatban.

Ezenkívül analitikus összehasonlítást végeztek a hidrogénüzemű (FECV) és a komprimált földgázzal működő (CNGV) járművek töltő-infrastruktúrája között is numerikus szimulációk segítségével. Ennek eredményeit, a *jet fire* lánghosszakat – különböző baleseti paraméterek mellett – a melléklet tartalmazza jelen összegzésben is és a forrásként szolgáló tanulmányban is.

Javasolt modellezési módszerek, szoftverek

A piacon számos HRS-típus, és -konfiguráció található meg már jelenleg is, és a MultHyFuel projekt keretében nyilván képtelenség az összes megoldásra kockázatelemzéseket végezni. Emiatt az egyedi kockázatelemzési, következményértékelési módszerek szerepe mindig hangsúlyos. Emiatt a tanulmány összegyűjtötte a hidrogénnel kapcsolatos balesetek következményeinek elemzésére szolgáló szoftvereket:

- HyRAM (Sandia National Laboratories)
- PHAST/PHAST Risk (Det Norske Veritas GL, DNV)

³ Lásd pl. itt: [Nagy teljesítményű és költséghatékony hidrogén-töltőállomások az EU-ban](#). (MHTE, 2025.05.03.)

- FLACS (GEXCON): 3-D computational fluid dynamics (CFD). This software is used for ventilation, gas dispersion and explosion simulations in safety analyses, including a fire module
- ADREA-HF (NCSRD): CFD tool, CFD modelling for cryogenic dispersion, BLEVE, explosions and jet fires including radiation
- KFX-Exsim: CFD tool by DNV. To reduce explosion consequences; as well as the quantification of blast wave load acting on safety. Moreover, this software has the ability to give probabilistic explosion analysis, and can also be used for incident investigations
- ANSYS Fluent: commercial CFD software
- OpenFOAM: open-source CFD software
- e-Laboratory: a medley of tools dedicated to gaseous hydrogen. This suite of tools is hosted online and is freely available to the public
- ALDEA by Air Liquide: Air Liquide Dispersion and Explosion Assessment tool with modules developed for gaseous and liquid hydrogen hazardous events, from the release to the explosion, considering scenarios in free field and confined spaces. Consequences of the burst of pressurised gaseous and liquid hydrogen tanks can be assessed as well
- FRED by Shell: Shell-developed suite of tools that allow calculating consequences of burst, jet fire, UVCE, VCE, dispersion of GH2, VCE and pool fire for LH2
- EPHEDRA: a platform for VCE, for physical burst, for UVCE tools, and HyPond tool to estimate the maximum extent of the liquid pool likely to spread on the ground following a spillage of liquid H₂
- GASP (Gas Accumulation over Spreading Pools): modelling tool is used for LH2 pool scenarios

Biztonsági gátak (safety barriers)

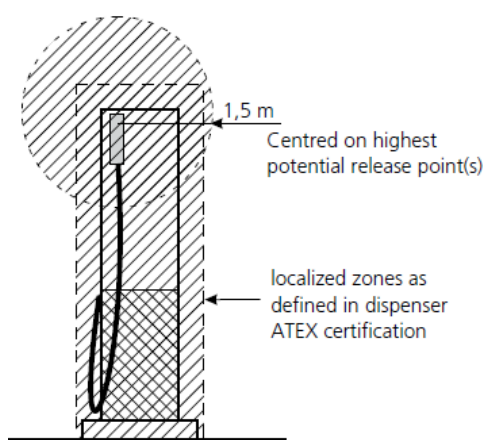
Nem teljeskörű felsorolásként, inkább csak ötletadó jelleggel a HAZID elemzésekre alapozva a tanulmány felsorol javaslatokat az alkalmazandó biztonsági gátakra. Ezek alapvetően három csoportba sorolhatók: technikai, humán, és az előző kettő kombinációját alkalmazó biztonsági megoldások.

4. táblázat: példák a HAZID elemzés alapján javasolható biztonsági megoldásokra HRS-ek esetében

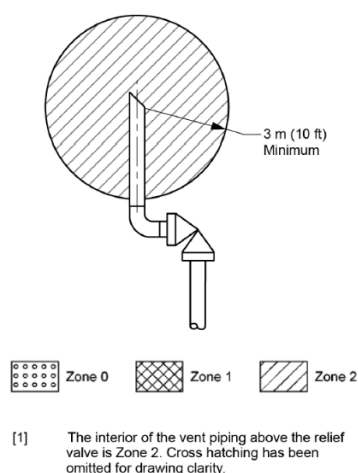
Téma	Példák az ajánlásokra
HRS kialakítása (tervezési fázisban)	- a töltő feletti előtető (canopy) olyan kialakítása, amelyben gázfelhalmozódást lehetővé tevő üregek, térrészek nincsenek - a tárolók esetében előnyben kell részesíteni a nyitott (szabadban történő) elhelyezést vagy a föld alatti elhelyezést
HRS irányítása, kezelése	- töltési műveletek elkerülése viharban / szélsőséges időjárási körülmények közt
Érzékelő rendszerek	- hidrogénláng és – gázérzékelő(k) elhelyezése a kapcsolódó figyelmeztetési protokollokkal (riasztás, vészleállás stb.)
Leválasztó eszközök	- elzárószelepek beépítése berendezések vagy részeik izolálhatóságára diszfunkciók esetén
Megfelelő anyagválasztás	- hidrogéntoleráns anyagok (különösen pl. fittingek, tömítések, csövezés esetében) - az aszfalt használata tilos, hogy megelőzzék a levegő (O ₂) lecsapódását, mivel az fokozhatja az éghető anyagok reakcióképességét egy esetleges hidrogénömlés (LH2) esetén
Berendezések elhelyezési megoldásai a dominóhatás elkerülése érdekében	- szellőztető vezetékek kivezetési pontjainak biztonságos elhelyezése - a TPRD (biztonsági lefúvató szelepek) szellőzőinek megfelelő elhelyezése, hogy a közeli létesítmények biztonságát ne veszélyeztesse
Környezeti veszélyek	- meg kell fontolni a telepítési hely természeti környezetből adódó

Téma	Példák az ajánlásokra
telephelyspecifikus figyelembe vétele	veszélyforrásait, pl. hó és eső(terhelés), szél / tornádó hatásai; szeizmikus aktivitás; tengerparti elhelyezésnél árvíz/szökőár stb.
Rendszeres felülvizsgálat	- összeszerelés után, majd rendszeres jelleggel a HRS hidrogén-tömörségének ellenőrzése a HRS minden berendezésére (pl. tömlők, tároló(k), puffertároló(k) stb.)
Megelőzést és/vagy hatáscsökkentést szolgáló barrierек beépítése	- tömegáram lehatárolók, törőkuplungok, gyorscsatlakozók, biztonsági nyomásszabályzó szelepek, hasadótárcsák, robbanópanelek, hidrogén-érzékelők, nyomás- és hőmérséklet-szenzorok, áramlásmérők kiépítése
Monitoring és felügyelet	- nyomás és hőmérséklet megfelelő menedzsmentje Type-III és -IV tartállyal rendelkező járművek tankolásakor a kompresszortól a puffertárolón át a jármű hidrogéntankjáiig - rezgésérzékelő riasztás kompresszorokon
Gyújtóforrások menedzsmentje	- megfelelés a veszélyességi övezet szerinti besorolásoknak - ATEX-tanúsított berendezések alkalmazása

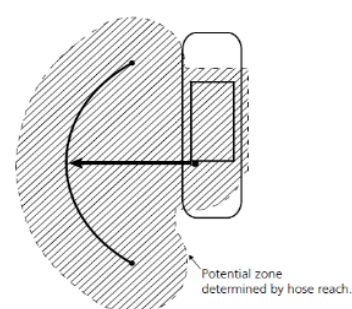
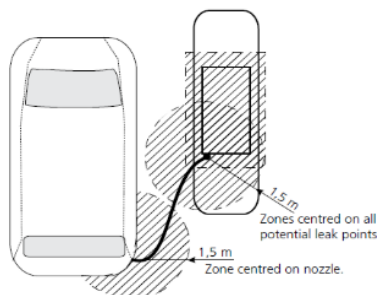
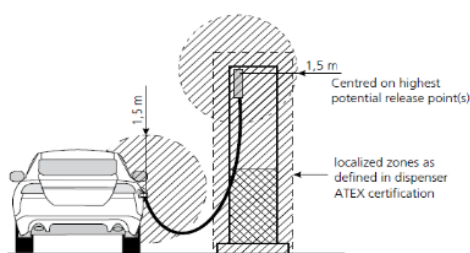
Néhány illusztráció a projekt tanulmányaiból



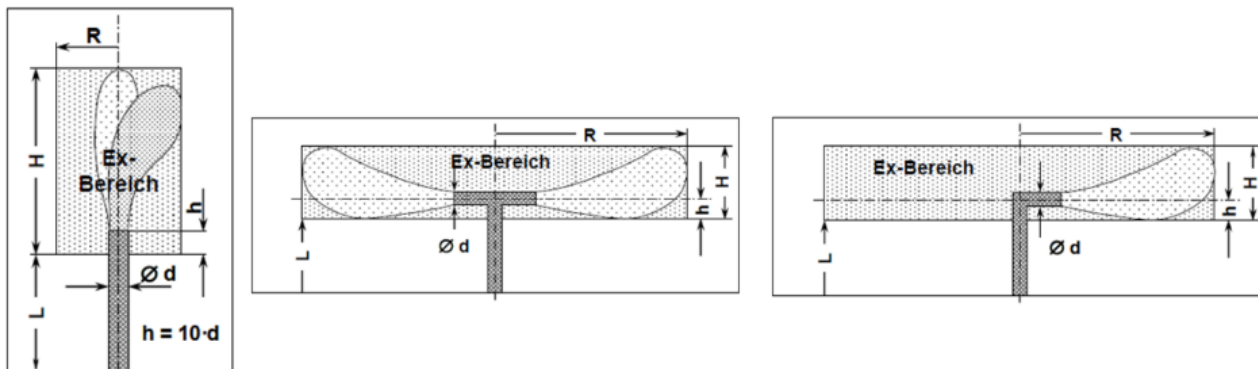
5. ábra: nem működő, de nyomás alatt álló H₂-diszpenzer (standby) zónabesorolásai



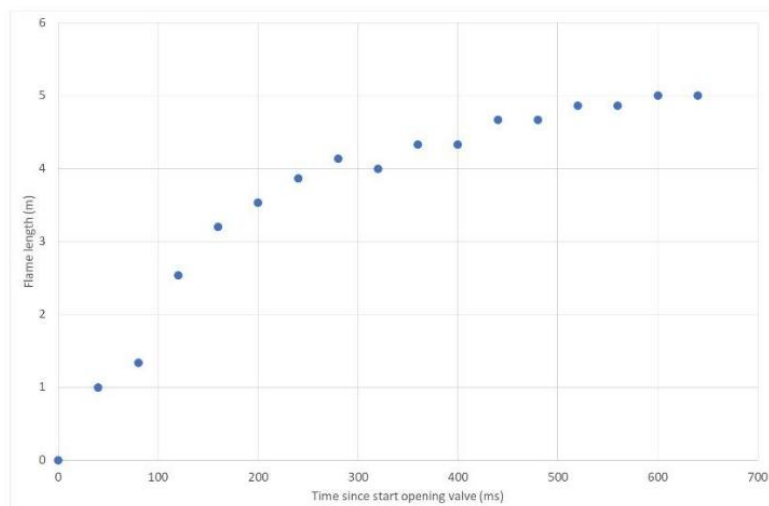
6. ábra: HRS biztonsági lefúvató kéményének veszélyességi övezetei (zónabesorolások)



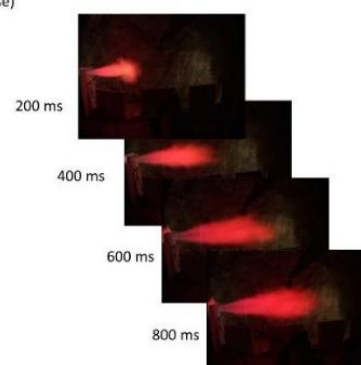
7. ábra: veszélyességi övezetek (zónabesorolások) határai működő (tankolást végző) HRS diszpenzerének környezetében



8. ábra: veszélyességi övezetek alakja és mérete különböző geometriai kialakítású biztonsági lefúvató nyílások környezetében



0 ms (start release)



9. ábra: jet fire láng méretének alakulása az idő függvényében (peremfeltételek: $\varnothing 2$ mm nyílás, 900 bar nyomás, 80 g/s hidrogénáram) – a szúróláng végső mérete gyakorlatilag 0,5 mp alatt kialakul

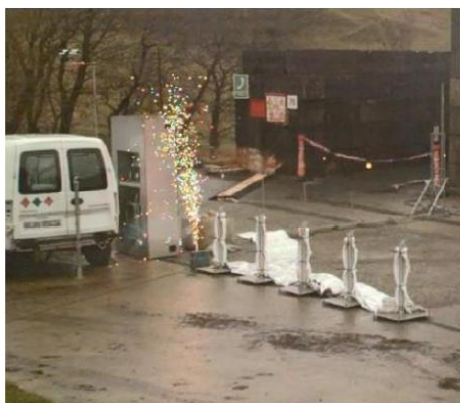


10. ábra: a projekt TT22-es tesztje, amelyben multi-üzemanyag töltőállomáson más, hagyományos üzemanyag (dízel) közeli tüzesetének hatásait vizsgálták a H_2 -diszpenzerre (peremfeltételek: 120 liter, 2 m^2 felületű dízel üzemanyag-kiömlés tócsatüze, 15 perces időtartamban a hidrogéndiszpenzer közvetlen közelében. A láng átmenetileg hozzáér a diszpenzerhez. Mindazonáltal a kísérleti diszpenzer belsejében a hőmérséklet alig változik. Ezenkívül a csővezetékben nem volt jele a belső nyomásnövekedésnek.

Measurement location	Overpressure (mbar) – inside ignition	Overpressure (mbar) – outside ignition
Inside dispenser	626	50
1.2 m away @ 1 m high	134	1
2.4 m away @ 1 m high	85	7
5 m away @ 1 m high	20	4



11. ábra: a projekt TT18 (b) és TT20 (j) tesztje: a diszpenzerben kialakuló gyúlékony gázfelhő robbanásának hatásai, ha a gyújtóforrás diszpenzeren belül (b) és azon kívül (j) jelenik meg. (Peremfetételek: 0,2 mm méretű hidrogénszivárgási pont, 700 bar nyomás) – a táblázatban a kialakuló túlnyomás értékek (mbar) láthatók különböző távolságban a H₂-diszpenzertől.



12. ábra: indukált jet fire tüzeset normál és IR-kamerás képe a kísérletek során

A fenti illusztrációk csak figyelemfelkeltésként és gyors tájékoztatásként szolgálnak. A korábban megadott tanulmányok természetesen részletes adatokat, eredményeket és következtetéseket is tartalmaznak minden kísérlethez, amelyeket itt terjedelmi korlátok miatt nem tudunk bemutatni.

Forrás:

MultHyFuel (Project Consortium, multiple authors): Deliverables D3.7 and D3.8. - Developing Good Practice Guidelines in Project MultHyFuel. 13 June, 2025. (Publikus változat)

A MultHyFuel projekt weboldala: <https://multhyfuel.eu/>

Rövidítések jegyzéke

DDT	Deflagration to Detonation Transition (átmenet a deflagrációból detonációba)
HRS	hydrogen refueling station (hidrogén-töltőállomás)
LH2	liquid hydrogen (folyékony hidrogén)
VCE	confined vapor cloud explosion (gőzfelhő-robbanás zárt térben)
UVCE	unconfined vapor cloud explosion (gőzfelhő-robbanás szabad térben)

Melléklet

Összehasonlítás hidrogén és CNG tüzesete között töltőállomáson

(„Appendix A” az eredeti tanulmányban)

A projekt keretében egy gyors és egyszerű összehasonlítást végeztek a közlekedési szektorban jelenleg használt hidrogén (H₂) és sűrített földgáz (CNG) üzemanyagok, azok *jet fire* tüzesetei között, amelyet a tanulmány melléklete tartalmaz, de informatív jellege miatt jelen összegzésbe beillesztjük. A táblázat adataihoz, eredményeihez kapcsolódó peremfeltételek:

- nyomás: 700 bar a hidrogénüzemű jármű esetében, 250 bar a CNG-üzemű jármű esetében
- a tömlő teljes keresztmetszetű szakadása történik: Ø5,3 mm H₂ esetében, Ø 8 mm CNG esetében
- a kiszabaduló gáz azonnali meggyulladása – pl. láng / *jet fire*, az esetleges áramláskorlátozó figyelembevétele nélkül.

M.1. táblázat: *jet fire* tüzesetek jellemzőinek és hatásainak összehasonlítása hidrogén, valamint komprimált földgáz (CNG) üzemanyagok esetében teljes tömlőszakadás esetén és max. tartálynyomáson történő gázömlés esetén

Parameters for jet fire severity assessment	Hydrogen	Compressed natural gas
Pressure	700 bar	250 bar
Diameter	5.3 mm	8 mm
Release flow rate (NL.min ⁻¹)	5.5 · 10 ⁵	1.6 · 10 ⁵
Release flow rate (g.s ⁻¹)	827	1850
Flame length	16.1 m	23.6 m
Distance 8 kW.m ⁻²	20.1 m	28.3 m
Distance 5 kW.m ⁻²	22.8 m	31.8 m
Distance 3 kW.m ⁻²	26.4 m	36.8 m
Distance 1.6 kW.m ⁻²	32.4 m	44.8 m