

Srovnání standardů plnicích protokolů – podklady pro didaktické texty pro úroveň středního školství



Tento výsledek je spolufinancován se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci Programu Národního centra kompetence.

NÁZEV VÝSLEDKU

Srovnání standardů plnicích protokolů – podklady pro didaktické texty pro úroveň středního školství

PROJEKT

Národní centrum vodíkové mobility (TN02000007)

NÁZEV DÍLČÍHO PROJEKTU

Ekosystém plnění vodíku rychlostí přesahující 60 g H₂/s

ZPRACOVATEL

Centrum dopravního výzkumu, v. v. i. (CDV)

AUTORSKÝ TÝM

Roman Smutný (CDV)

Bronislav Vahalík (CDV)

Vojtěch Přikryl (CDV)

Obsah

1	Úvod.....	4
2	Pomalé plnění versus rychlé plnění.....	5
2.1	Co rychlé plnění obnáší.....	5
2.2	Kontrolní otázky	5
3	Vodíková čerpací stanice	6
3.1	Hlavní komponenty stanice.....	6
3.2	Jak stanice pracuje při plnění	6
3.3	Bezpečnostní prvky stanice.....	7
3.4	Kontrolní otázky	7
4	Vodík ve vozidle a typy nádrží.....	8
4.1	Typy tlakových nádrží	8
4.2	Klíčové parametry tlakové nádrže.....	8
4.3	Co musí plnicí protokol hlídat	9
4.4	Kontrolní otázky	9
5	Plnicí protokoly SAE	10
5.1	Soubor norem SAE pro vodíkové plnění	10
5.2	SAE J2601 – protokol pro osobní vozidla [1].....	10
5.2.1	Klíčové pojmy.....	11
5.2.2	Teplotní kategorie stanice	11
5.2.3	Kategorie velikosti nádrže	11
5.2.4	Dvě metody řízení plnění	12
5.2.5	Tlakový koridor během plnění.....	12
5.2.6	Kontrolní otázky.....	13
5.3	SAE J2601-5 – protokol pro těžká vozidla [4].....	14
5.3.1	Vztah k SAE J2601	14
5.3.2	Dvě metody řízení.....	14
5.3.3	Šest teplotních kategorií	15
5.3.4	Hmotnostní průtoky a typy plnicích spojek.....	15
5.3.5	Závislost na komunikaci	16
5.3.6	Nové mechanismy oproti J2601	16
5.3.7	Kontrolní otázky.....	16

5.4	SAE J2799 – Komunikace mezi vozidlem a stanicí [6]	17
5.4.1	Proč je komunikace nutná pro MC Formula.....	17
5.4.2	Infračervený přenos	17
5.4.3	Co si vozidlo a stanice vyměňují	18
5.4.4	Kontrolní otázky	19
5.5	Doplňující protokoly	19
5.5.1	SAE J2601-2 – autobusy [8]	19
5.5.2	SAE J2601-3 – průmyslové vozíky [9]	19
5.5.3	SAE J2601-4 – plnění bez předchlazení [10].....	19
6	Závěr	21
7	Seznam obrázků	22
8	Seznam tabulek	22
9	Seznam příloh.....	22
10	Seznam literatury	23
11	Seznam zkratk	24
	Úkol A – Sestav postup plnění vodíku	25
	Úkol B – Popiš komponenty vodíkové plnicí stanice	26
	Úkol A – správné pořadí	28
	Úkol B – popis komponent	28

1 Úvod

Provoz vodíkového vozidla závisí na schopnosti rychle a bezpečně doplnit palivo. Pro řidiče osobního auta je rozdíl mezi dvouminutovým a dvacetiminutovým plněním zásadní z pohledu komfortu. U nákladních vozidel a autobusů jde dokonce o ekonomickou veličinu, protože řidič kamionu má legislativně omezenou pracovní dobu a každá minuta navíc strávená u stanice snižuje celkovou produktivitu vozidla. Stejně tak v MHD je čas plnění klíčový pro plánování provozu vozového parku.

Snaha o rychlé plnění naráží ale na jednoduchou fyzikální překážku. Při přepouštění vodíku z tlakového zásobníku stanice do nádrže vozidla dochází k expanzi (rozpínání) vodíku, a tedy k prudkému poklesu tlaku a zvětšení jeho objemu. Na rozdíl od většiny ostatních plynů se ale vodík při tomto rozpínání **zahřívá**, protože má při běžných teplotách záporný tzv. Jouleův-Thomsonův koeficient. Čím rychleji se plní, tím rychleji teplota plynu uvnitř nádrže roste. A teplota nesmí překročit hranici, na kterou je nádrž navržena (typicky 85 °C). [1, 2]. Při překročení hrozí poškození materiálů, snížení životnosti nebo v extrému i ztráta těsnosti.

Tento dokument se zabývá tím, jak je rychlé plnění vodíkových vozidel řešeno v praxi, jaká norma popisuje stanice, jaká vozidla, a hlavně jakou logikou stanice řídí samotný proces plnění, aby zůstal v bezpečných mezích. Hlavním předmětem srovnání jsou normativní specifikace SAE International, především SAE J2601 (osobní vozidla) a SAE J2601-5 (těžká vozidla).

V dokumentu jsou rozlišeny dva základní pojmy, a to norma a protokol. Pod pojmem norma, například norma SAE J2601, je myšlena celá norma jako celek. Pokud je využito pojmu protokol, například protokol plnění SAE J2601, je myšleno plnicí protokol jako algoritmus obsažený v normě.

2 Pomalé plnění versus rychlé plnění

Existují dva základní režimy plnění vodíku do vozidla, které se liší cílem i provozem:

- Pomalé plnění [3] je režim, kdy vodík proudí do nádrže nízkým průtokem, typicky řádově desítky minut až několik hodin. Tepelný nárůst je tak pomalý, že stačí přirozený odvod tepla stěnou nádrže do okolí. Není potřeba předchlazení ani složité řízení procesu. Pomalé plnění se používá zejména v depech autobusů a nákladních vozidel přes noc, kdy vozidla stojí.
- Rychlé plnění [1, 4] je režim, kdy je cílem naplnit nádrž během několika minut, srovnatelně s plněním kapalných paliv. Vyžaduje vysoký průtok plynu, aktivní předchlazení (typicky na $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ před vstupem do vozidla) a přesné řízení rychlosti nárůstu tlaku, aby se teplota plynu v nádrži udržela v bezpečných mezích. Rychlé plnění se používá zpravidla u veřejných stanic pro osobní vozidla, kamiony i autobusy.

V tomto dokumentu se zabýváme rychlým plněním, protože právě jeho komplikovanost vedla ke vzniku celého souboru SAE plnicích protokolů.

2.1 Co rychlé plnění obnáší

Cílem rychlého plnění je dostat do nádrže maximální množství vodíku v co nejkratším čase, aniž by došlo k překročení teplotních a tlakových limitů nádrže. Stanice musí v každém okamžiku znát nebo odhadovat [1]:

- Aktuální tlak v nádrži vozidla
- Aktuální teplotu plynu v nádrži vozidla
- Velikost nádrže (objem)
- Teplotu okolí (předpokládá se stejná teplota nádrže)
- Teplotu vodíku vystupujícího ze stojanu (po předchlazení)

Z těchto vstupů musí stanice odvodit, jak rychle smí přidávat tlak (a tím průtok), aby konečný stav nádrže neporušil žádný limit. Tato logika je obsažena v plnicích protokolech SAE, kterým se věnuje hlavní část tohoto dokumentu.

Plnicí protokol je závazná specifikace chování stanice. Stanice, která neimplementuje některý ze standardních protokolů, nesmí plnit vozidla od různých výrobců, protože vozidlo a stanice si jinak nemohou vzájemně garantovat bezpečné plnění.

2.2 Kontrolní otázky

1. Vysvětlete, proč nelze vodík plnit do nádrže libovolnou rychlostí. Jaký fyzikální jev to omezuje?
2. V čem se liší pomalé a rychlé plnění z hlediska požadavků na infrastrukturu stanice?
3. Proč je rychlé plnění hlavním předmětem standardizace v SAE protokolech, zatímco pomalé plnění normy explicitně neřeší?
4. Které vstupní informace stanice potřebuje, aby mohla naplnit vozidlo rychle a bezpečně?

3 Vodíková čerpací stanice

Pod pojmem vodíková čerpací stanice (HRS) se rozumí infrastruktura, která dodává stlačený vodík do nádrže vozidla. Z pohledu uživatele se podobá běžné čerpací stanici, kdy řidič přijede, připojí spojku k hrdlu vozidla a po několika minutách odjíždí. Vnitřní složitost stanice je ale podstatně vyšší než u stanic kapalných paliv.

3.1 Hlavní komponenty stanice

Typická vodíková stanice na rychlé plnění se skládá z těchto hlavních funkčních bloků:

- Zdroj vodíku (vodík) na stanici můžeme buď dovážet nebo vyrábět přímo na místě. Pokud se rozhodneme vodík dovážet bude to nejčastěji za pomoci traileru (návěsu) s vysokotlakými lahvemi. Zde je možnost trailer buď přepustit do zásobníku na stanici nebo zásobovat stanici přímo z traileru. Při výrobě vodíku přímo na stanici bude výroba se stanicí nejpravděpodobněji propojena potrubím (vodíkovodem).
- Kompresor stlačuje vodík ze vstupního tlaku na provozní tlak zásobníků stanice. Vstupní tlak se může pohybovat kolem 3 MPa (30 bar) při použití vodíku přímo z elektrolyzátoru až po cca 20-30 MPa (200-300 bar) při zásobování trailerem. Výstupní tlak může dosahovat až 90 MPa (900 bar) při plnění osobních vozidel. Kompresor je jeden z nejnákladnějších komponentů stanice a jeho výkon limituje, kolik vozidel je stanice schopna obsloužit za hodinu. [5]
- Vysokotlaké zásobníky (banks) jsou sada tlakových lahví na stanici, obvykle rozdělená do několika tlakových úrovní (low/medium/high). Plnění vozidla probíhá na principu přepouštění, proto se plní postupně ze zásobníku s nejvhodnějším tlakovým spádem. Plnění vozidla probíhá přepouštěním vodíku ze zásobníku s vyšším tlakem do nádrže s tlakem nižším. Bez kaskády by stanice mohla plnit jen do té doby, než by tlak v zásobníku klesl na úroveň cílového tlaku ve vozidle. Kaskádové uspořádání zásobníků je řešením pro efektivní využití uloženého vodíku a úsporu energie potřebné na jeho stlačování.
- Předchlazovací jednotka (pre-cooler) – výměník tepla, který chladí vodík před výstupem ze stanice na nízkou teplotu. Standardní stanice pro 70 MPa chladí vodík na -33 až -40 °C. [1]
- Výdejní stojan (dispenser) je koncové zařízení a skládá se z plnicí hadice, trysky (nozzle), průtokoměru, regulačního ventilu a uživatelského rozhraní. Stojan obsahuje řídicí elektroniku, která řídí plnění podle protokolu.
- Tryska a hrdlo (nozzle a receptacle) – fyzické rozhraní mezi stanicí a vozidlem. Geometrie a parametry jsou dané normou ISO 17268 (a navazující SAE J2600). Pro různé tlaky a aplikace existují různé typy spojek (H35, H70, H35HF, H70HF).
- Komunikačním rozhraním se rozumí infračervený přijímač na trysce, který načítá data od vozidla podle normy SAE J2799. Více v kapitole 5.4.

3.2 Jak stanice pracuje při plnění

Průběh plnění z pohledu stanice lze shrnout v několika krocích[1, 6]:

- Připojení a kontrola – uživatel zasune spojku do hrdla vozidla. Stanice provede kontrolu těsnosti (leak check), jedná se o krátký nárůst tlaku a sledování případných úniků.

- Načtení dat z vozidla – pokud vozidlo komunikuje, stanice přečte přes infračervený port objem nádrže, aktuální tlak a teplotu (viz kapitola 5.4). Pokud vozidlo nekomunikuje, stanice odhadne parametry konzervativně.
- Volba protokolu – stanice podle dat (typ vozidla, teplota okolí, počáteční tlak) zvolí parametry plnění, především rychlost nárůstu tlaku a cílový tlak.
- Vlastní plnění – vodík proudí do vozidla. Stanice v každém okamžiku monitoruje tlak v nádrži a porovnává s povoleným profilem.
- Ukončení – po dosažení cílového tlaku stanice plnění ukončí, provede odtlačování plnicí hadice a uvolní spojkou.

3.3 Bezpečnostní prvky stanice

Vodík je hořlavý plyn s mimořádně širokým rozsahem výbušných koncentrací (4–75 obj. % ve vzduchu) [7] a velmi nízkou energií iniciace zapálení. Stanice proto musí být vybavena řadou pasivních a aktivních bezpečnostních prvků:

- Detektory úniku rozmístěné v rizikových místech (kompresor, zásobníky, stojan).
- Pojistné ventily (Pressure Relief Valves) na všech tlakových komponentech.
- Tepelně aktivované pojistky (TPRD) na nádržích zásobníků, které při překročení teploty vypustí obsah nádrže bezpečným odvětráním.
- Systém nouzového odpojení (ESD), který okamžitě odstaví stanici při detekci anomálie nebo manuálním stisku tlačítka.
- Bezpečnostní vzdálenosti technologií čerpací stanice od veřejných prostor, budov a komunikací.

Detailní bezpečnostní požadavky na stanice řeší norma ISO 19880-1 (Hydrogen fueling stations). V tomto dokumentu se jí dále nezabýváme, předmětem srovnání jsou plnicí protokoly SAE.

3.4 Kontrolní otázky

1. Jaké jsou hlavní funkční bloky vodíkové čerpací stanice a jakou roli každý plní?
2. Proč musí stanice vodík před plněním do vozidla předchladit? Co by se stalo, kdyby se vodík bez předchlazení plnil rychlým průtokem?
3. Proč jsou vysokotlaké zásobníky na stanici uspořádané kaskádově do několika tlakových úrovní?

4 Vodík ve vozidle a typy nádrží

Vodík se ve vozidle skladuje jako stlačený plyn v tlakových nádržích, jedná se o dominantní řešení pro silniční dopravu. Soustava nádrží, ventilů, snímačů a propojovacího potrubí ve vozidle se v normách souhrnně označuje jako CHSS (Compressed Hydrogen Storage System). Konstrukci a parametry CHSS řeší norma SAE J2579.

4.1 Typy tlakových nádrží

Tlakové nádrže pro vodík se klasifikují do čtyř typů podle materiálu vložky (vnitřní stěny) a vnějšího obalu:

Tabulka 1: Přehled typů tlakových nádrží

Typ	Vnitřní vložka	Vnější obal	Typické použití
I	Ocel	Žádný (celokovová)	Stacionární, popřípadě tam, kde není rozhodující váha
II	Kov	Obvodové ovíjení vláken	Přechodový typ
III	Hliníková slitina	Plný kompozitní obal	Starší autobusy
IV	Polymer (HDPE, nylon)	Plný kompozitní obal	Osobní automobily a moderní vozidla

Pro silniční dopravu dnes dominuje typ IV, polymerní vložka ovinitá uhlíkovými vlákny. Důvodem je výrazně nižší hmotnost (až o 50 % oproti typu III) při stejné kapacitě a tlaku, a vyšší odolnost proti vodíkové křehkosti, která limituje kovové vložky.

Vodík je nejmenší molekula v přírodě. Do mřížky kovů difunduje a způsobuje tzv. vodíkovou křehkost, což je postupné snížení pevnosti materiálu a riziko prasknutí. Proto se na nádrže typu IV používá polymerní vložka, do které vodík nepronikne. Norma SAE J2579 přesně specifikuje, které slitiny hliníku a které austenitické nerezové oceli jsou pro vodíkový provoz schválené, a které jsou naopak zakázané (například slitina hliníku A6082 ve vlhkém prostředí).

4.2 Klíčové parametry tlakové nádrže

Soustava tlakových nádrží, ventilů, snímačů a propojovacího potrubí ve vozidle se označuje souhrnným pojmem CHSS (systém skladování stlačeného vodíku). Plnicí protokol CHSS bere jako jeden celek, tedy pracuje s jejím celkovým objemem, tlakem a teplotou plynu uvnitř.

Vozidla se rozdělují do dvou základních tlakových tříd podle jmenovitého pracovního tlaku. Označení vychází z normy SAE a používá písmeno H a číselnou hodnotu v MPa: H35 (35 MPa) a H70 (70 MPa). H35 byla tradiční pro autobusy a starší vodíková vozidla, H70 dominuje dnešním osobním autům i moderním kamionům. Vyšší tlak znamená menší objem nádrže pro stejné množství vodíku.

Jmenovitý pracovní tlak (NWP) je referenční hodnotou, která udává tlak v nádrži při 15 °C a plně natankovaném stavu. Protože plyn se při plnění zahřívá, dosahuje během procesu vyšších hodnot tlaku, než je NWP. Norma proto definuje dvě další tlakové hladiny: Maximální pracovní tlak (MOP)

= $1,25 \times \text{NWP}$, což je nejvyšší přípustný tlak během plnění, a maximální přípustný pracovní tlak (MAWP) = $1,38 \times \text{NWP}$, což je tvrdá hranice pro bezpečnostní systémy. Její dosažení znamená okamžité odstavení a aktivaci pojistek. Stanice tedy během plnění smí krátkodobě překročit NWP, ale nesmí dosáhnout MAWP.

Vedle absolutního tlaku se v normách často pracuje se stavem naplnění (SOC). Tedy s poměrem aktuální hustoty vodíku v nádrži k hustotě při NWP a 15 °C, vyjádřeným v procentech. SOC = 100 % odpovídá plnému naplnění za referenční teploty, ale skutečný tlak při SOC = 100 % závisí na teplotě plynu (po zahřátí je vyšší než NWP, po vychladnutí nižší). Plnicí protokol proto cílí na konkrétní hodnotu SOC (typicky 95 % nebo 100 %), nikoli na pevný tlak. Cílový tlak se přepočítává podle předpokládané teploty plynu na konci plnění.

Tabulka 2: Tlakové třídy CHSS podle plnicích protokolů

Pojem	Hodnota pro H35	Hodnota pro H70	Význam
NWP (Nominal Working Pressure)	35 MPa	70 MPa	Jmenovitý tlak nádrže při 15 °C a 100 % SOC. Reference pro klasifikaci vozidla.
MOP (Maximum Operating Pressure)	43,8 MPa	87,5 MPa	Nejvyšší přípustný tlak během plnění. Stanice ho smí krátkodobě dosáhnout.
MAWP (Maximum Allowable Working Pressure)	48,3 MPa	96,6 MPa	Hranice pro fault management. Dosažení spouští bezpečnostní odstavení.

4.3 Co musí plnicí protokol hlídat

Z výše uvedených parametrů vyplývají čtyři tvrdé hranice, které plnicí protokol musí respektovat:

- Teplota plynu v CHSS nesmí překročit 85 °C kdykoli během plnění ani na jeho konci.
- Tlak v CHSS nesmí překročit $1,38 \times \text{NWP}$ (MAWP) v žádném okamžiku.
- Konečný SOC nesmí překročit 100 % (cílem je obvykle 95–100 %).
- Hmotnostní průtok nesmí překročit limit dané kategorie protokolu.

Splnění těchto čtyř podmínek za všech provozních podmínek (různé okolní teploty, různé počáteční stavy nádrže, různé velikosti CHSS) je obsahem plnicích protokolů SAE, kterým se věnuje další kapitola.

4.4 Kontrolní otázky

1. Vyjmenujte 4 typy tlakových nádrží podle materiálu a stručně je porovnejte. Proč pro osobní auta dominuje typ IV?
2. Co je vodíková křehkost a které materiály jsou na ni citlivé?
3. Co znamenají zkratky NWP, MOP a MAWP? Jaké jsou jejich číselné hodnoty pro vozidlo H70?
4. Definujte SOC. Proč je užitečnější pracovat se SOC než přímo s tlakem?
5. Jaké čtyři tvrdé hranice musí plnicí protokol během plnění respektovat?

5 Plnicí protokoly SAE

Hlavní část tohoto dokumentu se věnuje porovnání SAE standardů, tedy závazným specifikacím, jak má stanice plnit vozidlo, aby plnění proběhlo bezpečně, rychle a s předvídatelným výsledkem nezávisle na výrobci stanice nebo vozidla. Tato kapitola se zaměřuje primárně na hlavní normu SAE J2601 (osobní vozidla) a SAE J2601-5 (těžká vozidla).

5.1 Soubor norem SAE pro vodíkové plnění

SAE International publikuje sedm hlavních norem souvisejících s vodíkovým plněním. Normy se liší statusem, který určuje jejich právní váhu a další vývoj. Standard je plnohodnotná závazná norma, která prošla úplným validačním procesem. TIR (Technical Information Report) má slabší status, používá se pro novější technologie s omezenou validací v provozu a po dostatečném ověření může být povýšen na Standard. Stabilizovaná norma je platná a závazná, ale SAE už ji dále nereviduje, typicky proto, že její funkci převzala novější norma. V přehledu níže je takto označená J2601-2 (autobusy), kterou pro veřejné stanice nahradila J2601-5.

Tabulka 3: Souhrn norem SAE pro vodíkové plnění

Norma	Rozsah	Status
J2579	Palivový systém ve vozidle (CHSS)	Standard
J2601	Plnicí protokol pro osobní vozidla (≤ 60 g H ₂ /s)	Standard
J2601-2	Autobusy (≥ 10 kg)	Stabilizovaná
J2601-3	Průmyslové vozíky H25/H35	TIR
J2601-4	Plnění bez předchlazení (osobní vozidla)	TIR
J2601-5	Vysokorychlostní protokol pro těžká vozidla (60–300 g H ₂ /s)	TIR
J2799	Komunikace mezi vozidlem a stanicí (IrDA)	Standard

Hlavní pozornost v následujících kapitolách věnujeme normám SAE J2601 (osobní vozidla) a SAE J2601-5 (těžká vozidla). Doplnkové normy J2601-2, J2601-3 a J2601-4 zmiňujeme jen okrajově.

5.2 SAE J2601 – protokol pro osobní vozidla [1]

Norma SAE J2601 je hlavní normou SAE International pro plnění osobních vodíkových vozidel stlačeným vodíkem. Pokrývá vozidla s objemem nádrže od 49,7 litrů, v tlakových třídách H35 i H70, s maximálním hmotnostním průtokem 60 g H₂/s. Cílem normy je naplnit vozidlo z typického počátečního stavu (tlak 10 MPa, okolní teplota 20 °C) na 95 % stavu naplnění (SOC) do tří minut.

Pro pochopení dalších částí dokumentu (zejména kapitoly o normě SAE J2601-5) je důležité znát principy, které J2601 zavedla, a to především dělení stanic do teplotních kategorií, dělení vozidel podle objemu nádrže a dvě metody řízení plnění (tabulkovou a dynamickou).

5.2.1 Klíčové pojmy

Plnicí protokol pracuje s několika provozními parametry, které stanice měří nebo přijímá od vozidla:

- T_{fuel} – teplota vodíku vystupujícího z plnicího stojanu po předchlazení. Klíčový parametr, na kterém závisí celá strategie plnění.
- T_{amb} – teplota okolního vzduchu. Stanice ji měří a používá jako odhad počáteční teploty plynu v nádrži (předpoklad, že vozidlo stálo dostatečně dlouho, nádrž má teplotu okolí).
- P_0 – počáteční tlak v nádrži vozidla na začátku plnění.
- APRR (Average Pressure Ramp Rate) – průměrná rychlost nárůstu tlaku během plnění, vyjádřená v MPa/min. Klíčová řízená veličina protokolu.

5.2.2 Teplotní kategorie stanice

Norma rozděluje stanice do tří kategorií podle teploty, na kterou jsou schopny předchladit vodík vystupující ze stojanu. Čím nižší je teplota vystupujícího vodíku, tím rychleji a více může vozidlo naplnit, protože do nádrže přichází chladnější plyn a celkový tepelný nárůst během plnění je menší.

Tabulka 4: Teplotní kategorie podle norem SAE

Kategorie	Rozsah T_{fuel}	Označení stanice
T40	-40 až -33 °C	H35-T40, H70-T40
T30	-33 až -26 °C	H35-T30, H70-T30
T20	-26 až -17,5 °C	H35-T20, H70-T20

5.2.3 Kategorie velikosti nádrže

Vozidla se podobně klasifikují podle objemu nádrže (CHSS) do čtyř kategorií. Pro každou kombinaci kategorie stanice a kategorie vozidla norma poskytuje samostatnou tabulku parametrů plnění.

Tabulka 5: Kategorie nádrží podle norem SAE

Tlaková třída	Hmotnost vodíku (při 100 % SOC)	Objem nádrže	Kategorie
H35	1,19 – 2,39 kg	49,7 – 99,4 L	A
H35	2,39 – 4,18 kg	99,4 – 174,0 L	B
H35	4,18 – 5,97 kg	174,0 – 248,6 L	C
H70	2,00 – 4,00 kg	49,7 – 99,4 L	A
H70	4,00 – 7,00 kg	99,4 – 174,0 L	B
H70	7,00 – 10,00 kg	174,0 – 248,6 L	C
H70	nad 10,00 kg	nad 248,6 L	D

Stanice nemusí podporovat všechny kategorie. Může implementovat jen některé z nich (například A, B, C bez D). Pokud stanice dokáže určit kapacitu CHSS s přesností $\pm 15\%$, vybírá podle naměřené hodnoty příslušnou tabulku parametrů plnění. Pokud tuto přesnost neumí zaručit, nebo pokud kategorie vychází nejednoznačně (například naměřená hodnota 4,01 kg s tolerancí $\pm 15\%$ přesahuje rozhraní mezi kategoriemi A a B), musí použít konzervativnější hodnoty plnění.

5.2.4 Dvě metody řízení plnění

Norma SAE J2601 zavádí dvě plně rovnocenné metody, kterými může stanice protokol implementovat. Výrobce stanice si volí, kterou používá:

- Tabulková metoda (anglicky table-based). Stanice si před začátkem plnění z před vypočtené tabulky načte dvojici hodnot: rychlost nárůstu tlaku (APRR) a cílový tlak na konci plnění. Vstupy tabulky jsou kategorie stanice, kategorie vozidla, počáteční tlak P_0 a okolní teplota T_{amb} . Tabulky jsou součástí normy a obsahují tisíce hodnot pokrývající všechny kombinace parametrů. Vlastní plnění pak probíhá konstantní rychlostí. Tlak roste lineárně v čase až do dosažení cílového tlaku.
- Dynamická metoda (v normě označená jako MC Formula). Stanice nepoužívá tabulky. Místo toho každou sekundu během plnění přepočítává cílový tlak i aktuální rychlost nárůstu na základě termodynamického modelu nádrže (tzv. lumped heat capacity model), jedná se o model nádrže jako jednoho tělesa se známou tepelnou kapacitou. Vstupem výpočtu jsou parametry vozidla a aktuální stav nádrže, tedy naměřený tlak a teplota, které stanice zpravidla získává od vozidla prostřednictvím komunikace (viz kapitola 5.4).

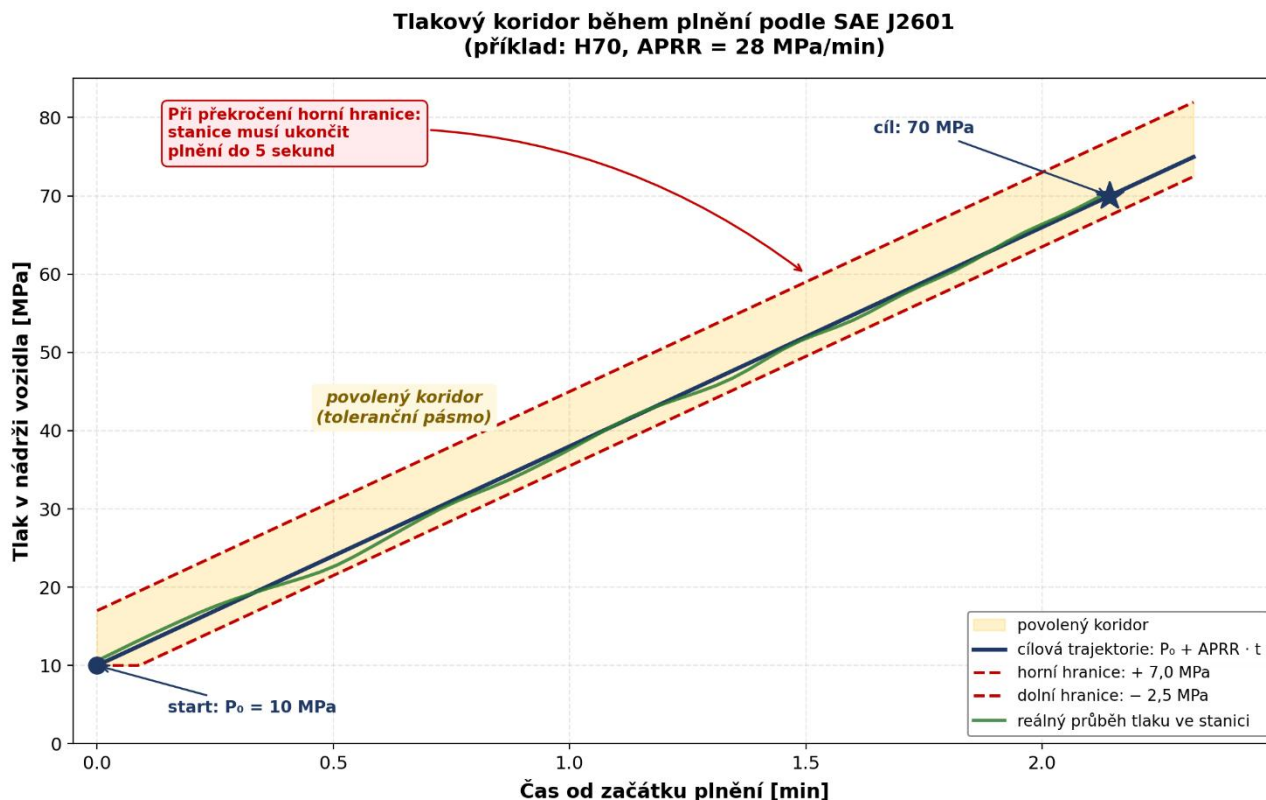
Volba metody má zásadní vliv na to, jak intenzivně stanice využívá komunikaci s vozidlem. Tabulková metoda může běžet bez komunikace, stanice si vystačí s odhadem okolní teploty a měřeným tlakem na vstupu nádrže. Dynamická metoda potřebuje pro výpočet znát každou sekundu aktuální tlak a teplotu uvnitř nádrže, což stanice ze své strany změřit nemůže. Bez komunikace by tedy musela hodnoty pesimisticky odhadovat, čímž by ztratila svou hlavní výhodu, tedy schopnost reagovat na skutečný stav vozidla.

5.2.5 Tlakový koridor během plnění

Aby plnění zůstalo bezpečné a stanice neporušila parametry nádrže, musí udržet aktuální tlak v definovaném koridoru kolem cílové trajektorie. Pro tabulkovou metodu platí:

- Horní hranice: $P_0 + APRR \times t + 7,0 \text{ MPa}$.
- Dolní hranice: $P_0 + \max (APRR \times t - 2,5 \text{ MPa}; 0)$.

Toleranční pásmo ($-2,5 / +7,0 \text{ MPa}$) kompenzuje krátkodobé výkyvy průtoku, například při přepínání mezi jednotlivými zásobníky stanice. Pokud stanice z koridoru vypadne (nedokáže udržet tlak v mezích), musí plnění ukončit do pěti sekund.



Obrázek 1: Tlakový koridor během plnění vodíku

Zdroj: vlastní zpracování podle SAE J2601

Stanice může během plnění udělat technickou pauzu, typicky při přepínání mezi tlakovými zásobníky stanice. Tento čas se do plnění nezapočítává: cílová trajektorie i toleranční koridor se na dobu pauzy „zmrazí“ a po jejím skončení pokračují ze stejného bodu, jako by k přerušení nedošlo. V normě se mluví o tzv. plánované době bez tankování (intended non-fueling time). Norma SAE J2601-5 (kapitola 5.3) tento mechanismus dále upřesňuje pod označením FTI (Fueling Time Indicator).

5.2.6 Kontrolní otázky

1. Co znamená zkratka APRR a jakou roli hraje v plnicím protokolu?
2. Proč norma rozděluje stanice do tří teplotních kategorií? Co určuje, do které kategorie stanice patří?
3. V čem se liší tabulková (table-based) a dynamická (MC Formula) metoda řízení? Jaké jsou výhody každé z nich?
4. Která z obou metod prakticky vyžaduje komunikaci s vozidlem a proč?
5. K čemu slouží toleranční koridor +7,0 / -2,5 MPa kolem cílové trajektorie tlaku?

5.3 SAE J2601-5 – protokol pro těžká vozidla [4]

Norma SAE J2601-5 řeší rychlé plnění těžkých vodíkových vozidel. Maximální hmotnostní průtok dosahuje až 300 g H₂/s, tedy pětinasobku oproti normě SAE J2601 (60 g H₂/s). Norma pokrývá vozidla s objemem nádrže od 248,6 L do 7 500 L, což odpovídá zhruba 6 až 180 kg vodíku v CHSS.

Pro plnění těžkých vozidel byla dříve používána norma SAE J2601-2, kterou SAE stabilizovala a dále již nereviduje. J2601-2 zůstává platnou normou, ale pro novější instalace SAE doporučuje J2601-5 (kapitola 5.3).

5.3.1 Vztah k SAE J2601

J2601-5 vychází z principů zavedených v SAE J2601 a rozšiřuje je pro vysoké průtoky a velké nádrže. Z J2601 přebírá:

- princip dělení do teplotních kategorií stanic podle T_{fuel} ,
- princip dělení vozidel podle kapacity CHSS,
- princip tolerančního koridoru tlaku (s upravenými hodnotami),
- dvě filozofie řízení — tabulkovou a dynamickou (MC Formula).

Co norma přidává nového, je dáno tím, že u těžkých vozidel nestačí přímočaré rozšíření J2601:

- Při průtoku 300 g H₂/s je třeba citlivěji řídit dynamiku plnění.
- Velké nádrže mají jinou teplotní reakci, než menší (větší objem, jiná geometrie).
- Provozní scénáře těžké dopravy zahrnují situace, které J2601 neřeší (například plnění bez aktivního předchlazení v depu, plnění duálního systému tlaků v jednom vozidle atd.).

5.3.2 Dvě metody řízení

V J2601-5 jsou stejné dvě filozofie řízení jako v J2601, ale přejmenované a s upraveným rozsahem působnosti:

- Tabulková metoda se v J2601-5 jmenuje Category D HF (Category D High Flow). Vychází z tabulkové metody z J2601 (kategorie D = největší nádrže) a rozšiřuje ji pro vysoký průtok. Stejně jako u J2601 si stanice před plněním načte z tabulky parametry plnění a plní konstantní rychlostí.
- Dynamická metoda se v J2601-5 jmenuje MCF-HF-G (MC Formula — High Flow — General). Vychází z MC Formula z J2601 a rozšiřuje ji o úpravy potřebné pro rychlé plnění a velké nádrže. Tato metoda je v J2601-5 dominantní, pokrývá všechny tlakové třídy a všechny průtoky.

5.3.3 Šest teplotních kategorií

Zatímco J2601 má tři teplotní kategorie stanic (T40, T30, T20 — viz kapitola 5.2.1), J2601-5 jich zavádí šest:

Tabulka 6: Teplotní kategorie podle normy SAE J2601-5

Kategorie	Rozsah T_{fuel}	J2601
T40	−40 až −33 °C	Ano
T30	−33 až −26 °C	Ano
T20	−26 až −17,5 °C	Ano
T10	−17,5 až −10 °C	Nová
T0	−10 až 0 °C	Nová
TA	0 až 20 °C	Nová

Tři nové kategorie (T10, T0, TA) reflektují potřebu plnit těžká vozidla i v podmínkách, kde stanice nemá kapacitu na hluboké předchlazení. Typicky jde o:

- Depa autobusů a kamionů, kde je investičně neúnosné stavět stanici s předchlazením na −40 °C.
- Dálniční stanice s vysokou frekvencí plnění, kdy předchlazovač nestihá vrátit teplotu po opakovaných plněních.

Kategorie TA (Ambient) je dostupná jen pro nejmenší kombinaci parametrů (H35 s průtokem 120 g H₂/s) a slouží především pro stanice, kde se předchladí jen na úroveň okolí. Pro veřejné stanice s nejvyšším průtokem zůstávají dominantní kategorie T40 a T30.

5.3.4 Hmotnostní průtoky a typy plnicích spojek

V J2601-5 se zavádí dělení stanic podle maximálního průtoku, zkracované jako FM (Flow Maximum):

Tabulka 7: Kategorie hmotnostních průtoků podle normy SAE J2601-5

Třída	Max. průtok	Použití
FM60	60 g H ₂ /s	shodné s J2601, používá běžné spojky H35 a H70
FM90	90 g H ₂ /s	jen H70, aktivuje se pouze pokud vozidlo komunikací výslovně požádá
FM120	120 g H ₂ /s	jen H35, vyžaduje speciální spojky H35MF nebo H35HF
FM300	300 g H ₂ /s	jen H70, vyžaduje speciální spojku H70HF

Vyšší průtoky vyžadují nové typy spojek. Stávající spojky H35 a H70 (podle normy ISO 17268, resp. SAE J2600) nejsou na tak vysoký průtok navrženy. Nové spojky H35MF, H35HF a H70HF mají jinou geometrii, jiné mechanické těsnění a u některých i jinou geometrii pro infračervený přenos komunikace (kapitola 5.4).

5.3.5 Závislost na komunikaci

Klíčový rozdíl oproti J2601: zatímco u J2601 mohla tabulková metoda běžet bez komunikace s vozidlem, u J2601-5 je komunikace fakticky nezbytná pro všechny metody s vyšším průtokem.

Důvod:

- MCF-HF-G je dynamická a každou sekundu pracuje s aktuálními parametry nádrže — bez komunikace nemá vstupy pro výpočet a musela by je odhadovat extrémně konzervativně, čímž by ztratila smysl high-flow plnění.
- Category D HF sice principem dovoluje průběh bez komunikace, ale norma pro většinu kategorií nádrže a teplotních kategorií tabulky pro nekomunikační plnění neposkytuje, stanice tedy v praxi musí komunikaci využít.

J2601-5 pracuje s novější verzí komunikační normy SAE J2799 (verze 2.00 namísto starší 1.10), která přidává strukturovaná data potřebná pro vysokoprůtokové plnění. Detaily viz kapitola 5.4

5.3.6 Nové mechanismy oproti J2601

Norma J2601-5 zavádí několik mechanismů, které v J2601 nejsou:

- Explicitní rozlišení mezi aktivním plněním (FTI = 1) a tzv. intended non-fueling time (FTI = 0), např. krátká pauza při přepínání zásobníků. Při FTI = 0 stanice zmrazí cílovou trajektorii tlaku, princip je popsán už v SAE J2601, ale tady s explicitním povelovým mechanismem.
- Minimální hmotnostní průtok, pokud průtok klesne pod tabulkovou hodnotu (od 1,25 g H₂/s pro malé nádrže až do 10 g H₂/s pro nádrže nad 2 000 L) na déle než 10 sekund, stanice musí plnění ukončit. Cílem je předejít situaci, kdy stanice zůstane na velmi nízkém průtoku kvůli poruše nebo nesouladu.
- Následná opatření proti úniku paliva (Subsequent fueling countermeasure), jedná se o bezpečnostní opatření pro vozidla s duálním plnicím systémem (dvě nezávislé nádrže s různými spojkami, např. H35HF + H70). Pokud vozidlo právě naplnilo jednu nádrž s vysokým průtokem a hned po tom začne plnit druhou nádrž, hrozí, že zbytkové teplo z první nádrže předeheřeje plyn ve druhé nad bezpečný limit. Stanice tedy v takovém případě sníží cílový tlak druhé nádrže.

5.3.7 Kontrolní otázky

1. Jaký je hlavní rozdíl mezi SAE J2601 a SAE J2601-5? Pro jakou skupinu vozidel je každá z norem určená?
2. Která starší norma byla nahrazena J2601-5 pro veřejné stanice? Pro jaké stanice ji lze ještě používat?
3. Vysvětlíte rozdíl mezi metodami Category D HF a MCF-HF-G. Která z nich je v J2601-5 dominantní a proč?
4. Proč J2601-5 zavádí tři nové teplotní kategorie (T10, T0, TA)? Jaké stanice je využijí?
5. Proč jsou pro nejvyšší průtoky potřeba nové typy plnicích spojek?
6. Proč J2601-5 fakticky vyžaduje komunikaci s vozidlem, zatímco J2601 ji vyžadovala jen u dynamické metody?

5.4 SAE J2799 – Komunikace mezi vozidlem a stanicí [6]

Norma SAE J2799 specifikuje, jakým způsobem si vozidlo a stanice vyměňují informace během plnění. Jak vyplývá z předchozích kapitol, komunikace není jen pomocná funkce, ale je to podmínka funkčnosti dynamických protokolů (MC Formula v SAE J2601 a MCF-HF-G v SAE J2601-5).

5.4.1 Proč je komunikace nutná pro MC Formula

Dynamická metoda MC Formula (kapitola 5.2.4) provádí každou sekundu výpočet tlakového nárůstu (ramp pressure) na základě termodynamického modelu nádrže. Aby model dal smysluplné výsledky, potřebuje znát:

- aktuální tlak vodíku v nádrži vozidla,
- aktuální teplotu plynu v nádrži,
- objem nádrže,
- tlakovou třídu (H35 nebo H70).

Stanice z vlastních senzorů zná pouze tlak a teplotu vodíku na výstupu plnicího stojanu. Tlak v nádrži vozidla není měřitelný přímo, mezi stojanem a nádrží je plnicí hadice s vlastním objemem a tlakovou ztrátou. Teplotu plynu uvnitř nádrže nemůže stanice změřit vůbec.

Bez komunikace s vozidlem by tedy stanice musela tyto parametry odhadovat extrémně konzervativně, čímž by dynamický protokol ztratil svou hlavní výhodu schopnosti reagovat na skutečný stav vozidla a optimalizovat průběh plnění.

Pro tabulkovou metodu je situace jiná: parametry plnění jsou v tabulce před vypočtené pro různé kombinace okolních podmínek a kategorií CHSS. Stanice tedy v tomto režimu může plnit i bez komunikace. Pracuje s tabulkou pro nekomunikační režim a s konzervativnějšími parametry.

5.4.2 Infračervený přenos

Komunikace mezi vozidlem a stanicí probíhá pomocí infračerveného záření podle standardu IrDA (Infrared Data Association). Vysílač je umístěn na vozidle vedle plnicího hrdla, přijímač na trysce stanice. Po nasunutí spojky se vysílač s přijímačem ocitnou v zákrytu a začne přenos.

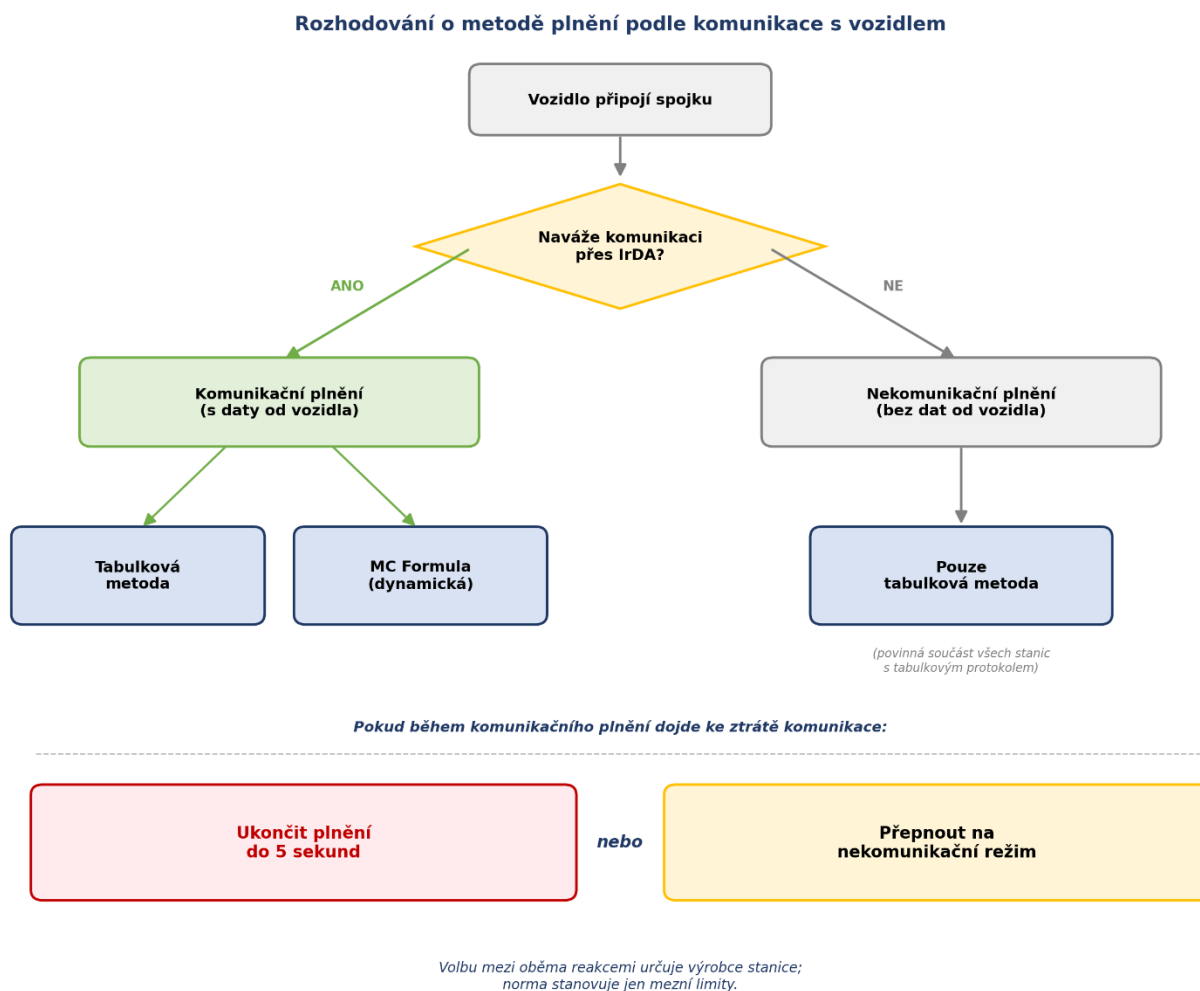
Komunikace je jednosměrná, a to pouze ve směru vozidlo → stanice. Stanice nemůže vozidlu nic potvrdit ani si vyžádat opětovné zaslání datového balíčku (packet). Pokud stanice datový balíček neobdrží nebo není v pořádku, norma definuje dvě možná řešení: stanice buď ukončí plnění do 5 sekund, nebo přepne na nekomunikační režim a pokračuje v plnění s konzervativnějšími parametry (typicky na nižší cílový stav naplnění CHSS). Volba mezi těmito dvěma reakcemi je na výrobci stanice. Norma stanovuje jen mezní limity.

5.4.3 Co si vozidlo a stanice vyměňují

Vozidlo vysílá stanici v každém datovém balíčku sadu informací, ze kterých stanice řídí plnění. Mezi nejdůležitější patří:

- aktuální tlak v nádrži vozidla,
- aktuální teplota plynu v nádrži,
- objem nádrže (CHSS) a tlaková třída,
- povely stanici: „pokračuj v plnění“, nebo „pauza“, nebo „okamžitě ukončit“.

Poslední položka povel je klíčová z hlediska bezpečnosti, vozidlo má poslední slovo nad plněním. Pokud kdykoli vyšle povel k ukončení, stanice musí plnění okamžitě přerušit.



Obrázek 2: Rozhodovací diagram o metodě plnění vodíku

5.4.4 Kontrolní otázky

1. Proč nemůže stanice měřit tlak a teplotu plynu přímo v nádrži vozidla?
2. Vysvětlíte, proč je komunikace nutná pro dynamickou metodu MC Formula, ale ne pro tabulkovou metodu.
3. Jaký princip přenosu komunikace SAE J2799 používá? Jaký směr má přenos?
4. K čemu slouží povel od vozidla pro stanici? Co se stane, pokud vozidlo vyšle „okamžitě ukončit“?

5.5 Doplnující protokoly

Kromě hlavní J2601 (osobní vozidla) a J2601-5 (těžká vozidla) definuje SAE tři další protokoly pro specifická prostředí. V dokumentu je zmiňujeme jen okrajově, protože pro celkový kontext rychlého plnění nejsou hlavní, ale dotvářejí obraz toho, co normy SAE jako celek pokrývají.

5.5.1 SAE J2601-2 – autobusy [8]

Protokol SAE J2601-2 byl původní protokol pro plnění autobusů s objemem nádrže nad 10 kg vodíku, typicky při tlakové třídě H35. Liší se od ostatních protokolů SAE přístupem ke specifikaci, zatímco J2601 a J2601-5 popisují konkrétní algoritmus plnění (tabulkový nebo dynamický), J2601-2 je výkonnostní, což znamená, že definuje pouze meze, které stanice nesmí překročit (maximální průtok, maximální teplota plynu v nádrži, maximální tlak), a nechává konkrétní algoritmus na výrobci stanice. Tento přístup byl flexibilní pro výrobce, ale způsoboval, že dvě stanice od různých výrobců plnily stejné vozidlo různým způsobem.

Protokol SAE J2601-2 byl proto stabilizován, tedy SAE jej dále nereviduje a pro nové instalace doporučuje použít SAE J2601-5, který algoritmus předepisuje přesně. J2601-2 zůstává platným standardem, ale jeho použití je vhodné jen pro provozy, kde výhody jednotného algoritmu (kompatibilita mezi výrobci) nepřevažují nad volností výkonnostního přístupu.

5.5.2 SAE J2601-3 – průmyslové vozíky [9]

Protokol SAE J2601-3 řeší plnění vodíkových průmyslových vozíků (vysokozdvížných vozíků a podobné techniky v logistických halách). Pracuje s nižšími tlakovými třídami H25 (25 MPa) a H35 (35 MPa), než vozidla pro silniční dopravu. Třída H25 v ostatních SAE protokolech vůbec není.

Maximální průtok je 10 g H₂/s, tedy mnohem méně než u osobních (60 g H₂/s) nebo těžkých vozidel (až 300 g H₂/s). Specifickou součástí SAE J2601-3 je popis volitelného odvodňovacího konektoru (dewatering connector) pro výměnné moduly s palivovým článkem (BRM). Tyto moduly během provozu produkují vodu z reakce vodíku s kyslíkem (až 10 litrů na 1 kg spotřebovaného vodíku) a tato voda se z modulu odvádí právě při plnění, kdy je vozík nebo modul tak jako tak připojený ke stanici.

5.5.3 SAE J2601-4 – plnění bez předchlazení [10]

Protokol SAE J2601-4 řeší situaci, kdy stanice nemá k dispozici předchlazovač, buď proto, že ho nemá vůbec, nebo proto, že selhal. Pokrývá osobní vozidla (H35, H70) v podmínkách, kdy teplota vodíku vstupujícího do nádrže je nad -17,5 °C (nad nejteplejší kategorií T20 v J2601).

Protokol není variantou J2601, definuje samostatný přístup zvaný bezpečný plnicí koridor. Namísto pevných tabulek vychází ze sledování stavu nádrže během plnění a průběžně omezuje průtok tak, aby teplo stačilo přirozeně odcházet stěnou nádrže do okolí. Plnění je proto pomalejší (řádově 5 až 10 minut podle teploty okolí), ale nevyžaduje předchlazovací jednotku.

Slouží především jako alternativa pro investičně levné stanice nebo jako záložní režim při poruše předchlazovače.

6 Závěr

Plnění vodíkových vozidel je technicky složitější než tankování kapalných paliv. Stanice musí naplnit nádrž rychle, a zároveň nepřekročit teplotní a tlakové limity nádrže. Z tohoto napětí mezi rychlostí a bezpečností vzešla potřeba standardizace, kterou pokrývají plnicí protokoly SAE.

Tento dokument se zaměřil na principy, které tyto protokoly používají:

- SAE J2601 definuje základ pro osobní vozidla, dělení stanic do teplotních kategorií, dělení vozidel podle objemu nádrže a dvě filozofie řízení plnění (tabulkovou a dynamickou).
- SAE J2601-5 rozšiřuje tyto principy pro těžká vozidla. Pokrývá vyšší průtoky (až 300 g H₂/s), větší nádrže (do 7 500 L) a zavádí nové prvky, jako širší sadu teplotních kategorií, nové typy plnicích spojek a explicitní mechanismy pro řízení mezikroků (FTI, minimální průtok, opatření pro vozidla s duálním plnicím systémem).
- SAE J2799 specifikuje komunikaci mezi vozidlem a stanicí, která je podmínkou pro dynamickou metodu řízení v obou plnicích protokolech.

Pro pochopení rychlého plnění vodíku tedy nestačí znát samotnou stanici nebo samotné vozidlo. Klíčový je vztah mezi nimi. Způsob, jakým si vyměňují informace, jak stanice z těchto informací rozhoduje o průběhu plnění a jak průběžně hlídá, aby plnění neopustilo bezpečné meze.

Dokument je podkladem pro přípravu výukových textů pro úroveň středního školství. Jednotlivé kapitoly lze využít i samostatně. Princip rychlého plnění (kapitola 2) jako úvod, popis stanice (kapitola 3) a vodíkového vozidla (kapitola 4) jako technický rámec, plnicí protokoly SAE (kapitola 5) jako jádro tématu. Kontrolní otázky na konci kapitol slouží jako podněty pro diskusi v hodině, ne jako test.

7 Seznam obrázků

Obrázek 1: Tlakový koridor během plnění vodíku	13
Obrázek 2: Rozhodovací diagram o metodě plnění vodíku	18

8 Seznam tabulek

Tabulka 1: Přehled typů tlakových nádrží	8
Tabulka 2: Tlakové třídy CHSS podle plnicích protokolů	9
Tabulka 3: Souhrn norem SAE pro vodíkové plnění	10
Tabulka 4: Teplotní kategorie podle norem SAE	11
Tabulka 5: Kategorie nádrží podle norem SAE	11
Tabulka 6: Teplotní kategorie podle normy SAE J2601-5	15
Tabulka 7: Kategorie hmotnostních průtoků podle normy SAE J2601-5	15

9 Seznam příloh

Příloha 1 – Návrh pracovního listu	25
--	----

10 Seznam literatury

- [1] SAE INTERNATIONAL. *Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles* [online]. 2020. Dostupné z: https://www.sae.org/standards/content/J2601_202005
- [2] SAE INTERNATIONAL. *Standard for Fuel Systems in Fuel Cell and Other Hydrogen Vehicles* [online]. 2023. Dostupné z: www.sae.org
- [3] STEVEN SOKOLSKY, JASNA TOMIC, a JEAN-BAPTISTE GALLO. *BEST PRACTICES IN HYDROGEN FUELING AND MAINTENANCE FACILITIES FOR TRANSIT AGENCIES* [online]. 2016. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.3390/wevj8020553](https://doi.org/10.3390/wevj8020553)
- [4] SAE INTERNATIONAL. *High-Flow Prescriptive Fueling Protocols for Gaseous Hydrogen Powered Medium and Heavy-Duty Vehicles* [online]. 2025. Dostupné z: https://www.sae.org/standards/content/J2601/5_202502/
- [5] HYDROGEN COMPRESSION CHOICES FOR TOMORROW'S REFUELING STATIONS: REVIEW OF RECENT ADVANCES AND SELECTION GUIDE, NIKOLAOS D. CHARISIOU, GEORGIOS S. SKODRAS, MARIA A. GOULA, a SAVVAS L. DOUVARTZIDES. *Hydrogen Compression Choices for Tomorrow's Refueling Stations: Review of Recent Advances and Selection Guide* [online]. 2026. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.3390/hydrogen7010025](https://doi.org/10.3390/hydrogen7010025)
- [6] SAE INTERNATIONAL. *Hydrogen Surface Vehicle to Station Communications Hardware and Software* [online]. 2024. Dostupné z: https://www.sae.org/standards/content/J2799_202406
- [7] *Vlastnosti vodíku z hlediska bezpečnosti* [online]. B.m.: HyResponder. 2021. Dostupné z: https://hyresponder.eu/wp-content/uploads/2023/03/L2_HyResponder_Level4_CZ.pdf
- [8] SAE INTERNATIONAL. *Fueling Protocol for Gaseous Hydrogen Powered Heavy Duty Vehicles* [online]. 2023. Dostupné z: https://www.sae.org/standards/content/J2601/2_202307/
- [9] SAE INTERNATIONAL. *Fueling Protocol for Gaseous Hydrogen Powered Industrial Trucks* [online]. 2022. Dostupné z: https://www.sae.org/standards/content/J2601/3_202209/
- [10] SAE INTERNATIONAL. *Ambient Temperature Variable and Fixed-Orifice Fueling Protocols for Light-Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles* [online]. 2024. Dostupné z: https://www.sae.org/standards/content/J2601/4_202410

11 Seznam zkratek

APRR – Average Pressure Ramp Rate (Průměrná rychlost nárůstu tlaku)

CHSS – Compressed Hydrogen Storage Systém (Systém pro skladování stlačeného vodíku)

ESD – Emergency Shutdown Systems (Systémy nouzového vypnutí)

FTI – Fueling Time Indicator (Ukazatel doby tankování)

FM – Flow Maximum (Maximální průtok)

HF – High-Flow (Vysoký průtok)

HRS – Hydrogen Refuelling stations (Vodíkové čerpací stanice)

IrDA – Infrared Data Association (Asociace pro infračervená data)

MAWP – Maximum Allowable Working Pressure (Maximální povolený pracovní tlak)

MHD – Městská Hromadná Doprava

MOP – Maximum Operating Pressure (maximální pracovní tlak)

NWP – Nominal Working Pressure (jmenovitý pracovní tlak)

P_0 – počáteční tlak v nádrži vozidla na začátku plnění

SAE International – Society of Automotive Engineers (Společnost automobilových inženýrů)

SOC – State of Charge (stav nabití)

TPRD – Thermally-activated Pressure Relief Devices (Tepelně aktivovaný pojistný ventil)

TIR – Technical Information Report (Zpráva s technickými informacemi)

T_{amb} – Ambient Temperature (Teplota okolního vzduchu)

T_{fuel} – Fuel Temperature (Teplota paliva)

Příloha 1 – Návrh pracovního listu

Pracovní list — Plnění vodíku

Téma	Plnění vodíku — postup a komponenty plnicí stanice
Cílová skupina	Střední škola (gymnázium, průmyslová škola, dopravní škola)
Časová náročnost	15–25 minut
Cíl	Žák popíše posloupnost kroků při plnění vodíkového vozidla a vysvětlí funkci hlavních komponent vodíkové plnicí stanice.
Pomůcky	Psací potřeby. Volitelně hlavní dokument k vyhledávání informací.

Jméno: _____ Třída: _____ Datum: _____

Úkol A – Sestav postup plnění vodíku

Níže je uvedeno pět kroků, které probíhají při plnění vodíkového vozidla na stanici. Kroky jsou v náhodném pořadí. Seřaď je správně, do prázdného pole napiš čísla 1 až 5 v takovém pořadí, v jakém kroky probíhají.

Krok	Popis	Pořadí
A	Stanice podle dat (typ vozidla, teplota okolí, počáteční tlak) zvolí parametry plnění, především rychlost nárůstu tlaku a cílový tlak.	
B	Po dosažení cílového tlaku stanice plnění ukončí, provede odtlakování plnicí hadice a uvolní spojku.	
C	Uživatel zasune spojku do hrdla vozidla. Stanice provede kontrolu těsnosti (leak check) — krátký nárůst tlaku a sledování případných úniků.	
D	Vodík proudí do vozidla. Stanice v každém okamžiku monitoruje tlak v nádrži a porovnává jej s povoleným profilem.	
E	Pokud vozidlo komunikuje, stanice přečte přes infračervený port objem nádrže, aktuální tlak a teplotu. Pokud nekomunikuje, stanice odhadne parametry konzervativně.	

Úkol B – Popiš komponenty vodíkové plnicí stanice

Ke každé komponentě stručně doplň, jakou funkci ve vodíkové plnicí stanici plní.

Komponenta	Funkce
Zdroj vodíku	
Kompresor	
Vysokotlaké zásobníky (banks)	
Předchlazovací jednotka (pre-cooler)	

Komponenta	Funkce
Výdejní stojan (dispenser)	
Tryska a hrdlo (nozzle a receptacle)	
Komunikační rozhraní	

Řešení**Úkol A – správné pořadí**

Pořadí	Krok	Název kroku
1	C	Připojení a kontrola těsnosti
2	E	Načtení dat z vozidla
3	A	Volba protokolu
4	D	Vlastní plnění
5	B	Ukončení a odtlakování

Úkol B – popis komponent

Komponenta	Funkce
Zdroj vodíku	Vodík se buď dováží na stanici (nejčastěji trailerem s vysokotlakými lahvemi), nebo vyrábí přímo na místě (například elektrolyzérem). Při výrobě na místě bývá zdroj se stanicí propojen potrubím (vodíkovodem).
Kompresor	Stlačuje vodík ze vstupního tlaku na provozní tlak zásobníků stanice. Vstupní tlak 3 MPa (z elektrolyzéru) až 20–30 MPa (z traileru), výstupní až 90 MPa (900 bar) při plnění osobních vozidel. Jeho výkon limituje, kolik vozidel stanice obslouží za hodinu.
Vysokotlaké zásobníky (banks)	Sada tlakových lahví na stanici, obvykle rozdělená do několika tlakových úrovní (low/medium/high). Plnění vozidla probíhá přepouštěním ze zásobníku s nejvhodnějším tlakovým spádem.
Předchlazovací jednotka (pre-cooler)	Výměník tepla, který chladí vodík před výstupem ze stanice. Standardní stanice pro 70 MPa chladí vodík na –33 až –40 °C.
Výdejní stojan (dispenser)	Koncové zařízení stanice — plnicí hadice, tryska, průtokoměr, regulační ventil a uživatelské rozhraní. Obsahuje řídicí elektroniku, která provádí plnicí protokol.

Komponenta	Funkce
Tryska a hrdlo (nozzle a receptacle)	Fyzické rozhraní mezi stanicí a vozidlem. Geometrie a parametry dle normy ISO 17268 (a navazující SAE J2600). Pro různé tlaky a aplikace existují různé typy spojek (H35, H70, H35HF, H70HF).
Komunikační rozhraní	Infračervený přijímač na trysce, který načítá data od vozidla podle normy SAE J2799.