RAPPORT

Kontaktperson RISE
Paul Adams, Elektrifiering & Pålitlighet - Energiomvandling
Säkerhet och Transport
010 516 5414
paul.adams@ri.se

Datum
2023-03-29

Beteckning
P116669

Myndigheten för samhällsskydd och beredskap

Studie - Vätgas kompositbehållare, aggregat och CE-märkning

RISE Research Institutes of Sweden AB
Säkerhet & Transport

Utfört av

Paul Adams, Elektrifiering & Pålitlighet - Energiomvandling
Andreas Anderson, Elektrifiering & Pålitlighet - Miljötålighet
Jonatan Gehandler, Brand och Säkerhet - Samhällssäkerhet

RISE Research Institutes of Sweden AB

Postadress
Box 857
501 15 BORÅS

Besöksadress
Brinellgatan 4
501 15 BORÅS

Tfn / Fax / E-post
010 516 5414
-
paul.adams@ri.se

Detta dokument får endast återges i sin helhet, om inte RISE i förväg skriftligen godkänt annat.

1. INTRODUKTION & BAKGRUND

Uppdraget är att genomföra en studie av komposit-behållare för vätgaslagring med inriktning behållare, aggregat och CE-märkning. Detta är en kompletterande undersökning till uppdraget "Studie - Vätgas säkerhetsutrustning, väteförsprödning, standarder mm." som genomförs parallellt på begäran av MSB.

Uppdraget har beställts av MSB för att besvara ett antal frågor från MSB mot följande bakgrund:

> *Komposit-behållare används i olika tillämpningar för att lagra vätgas oftast producerad från fossilfri el som sol- och vindkraft i mindre skala eller för reservkraft. Behållarna, ofta i form av liggande gascisterner men förekommer även som stående cylindrar, trycksätts med ett tryck på 250-350 bar (obs detta ex. avser inte begränsa studiens omfattning) och är vanligen samman kopplade med en kompressor uppströms och en tankstation alternativt en bränslecells anläggning nedströms. Liknande behållare kan även utföras i form av s.k. MEG-containrar som kan transporteras och sedan ställas upp för stationär användning under en tid. Fordonstankar ska dock inte omfattas av studien.*
>
> *MSB vill ta reda på hur väl hanteringen skyddas av reglerna i bland annat Arbetsmiljölagens föreskrifter AFS2016:1 och AFS 2017:3 och lagen (2010:1011) om brandfarliga och explosiva varor med föreskrifter MSBFS 2020:1, MSBFS 2013:3 och SRVFS 2004:7 i teorin och i praktiken samt genom att relevanta standarder efterlevs.*

Olika ord används för tryckkärl, till exempel tank, behållare, gasflaska, cylinder, container, pressure vessel, osv, men ord har använts i svaren på MSB-frågorna enligt definitionerna i AFS 2016:1:

Behållare: *Konstruerats och tillverkats för att innehålla fluider under tryck.*

Tryckkärl: *Behållare som konstruerats och tillverkats för att innehålla fluider under tryck, inkluderande till behållaren direkt sammanfogade delar fram till anslutningspunkten till annan anordning. Ett tryckkärl kan innehålla ett eller flera rum. Exempel på direkt sammanfogade delar är ventiler, adaptrar, pluggar eller motsvarande.*

Aggregat: *Flera tryckbärande anordningar som satts samman av en tillverkare för att bilda en integrerad och funktionell enhet.*

2. OMFATTNING

Studien begränsas till vätgas i gasfas. Fordonstankar omfattas inte av studien. Mycket av utvecklingsarbetet för komposit vätgasbehållare genomfördes dock för vägfordonstillämpningar. Som ett resultat härleds standarderna för stationära kompositapplikationer till en viss del från vägfordonsföreskrifter och standarder. Därför hänvisas ofta till dem i denna rapport för att förstå bakgrunden och till och med användbarheten av dem.

3. REGELVERK OCH STANDARDER BAKGRUND

3.1 Regelstruktur

3.1.1 Direktiv (EU)

Ett direktiv sätter upp mål som medlemsländerna ska nå, men de får själva bestämma hur det ska gå till (1).

En EU-förordning (regulation) är däremot en bindande rättsakt som alla EU-länder ska tillämpa i dess helhet.

3.1.2 Harmoniserade standarder

En harmoniserad standard är en europeisk standard som utvecklats av en erkänd europeisk standardiseringsorganisation: CEN, CENELEC eller ETSI (2). Den tas fram av en av dessa organisationer på begäran av Europeiska kommissionen. Tillverkare, andra ekonomiska aktörer eller organ för bedömning av överensstämmelse kan använda harmoniserade standarder för att visa att produkter, tjänster eller processer överensstämmer med relevant EU-lagstiftning. Referenser till harmoniserade standarder ska offentliggöras i Official Journal of the European Union (OJEU).

Det är frivilligt att använda dessa standarder. Tillverkare, andra ekonomiska aktörer eller organ för bedömning av överensstämmelse kan välja en annan teknisk lösning för att visa överensstämmelse med de obligatoriska legala kraven. Inom ramen för vissa direktiv eller förordningar kallas frivilliga europeiska standarder som stöder genomförandet av rättsliga krav inte ”harmoniserade standarder”.

3.2 Aktuella Regelverk

3.2.1 Regelverk för stationära anordningar

Direktiv 2014/68/EU - Pressure Equipment (PED)
PED (3) tillsammans med relaterade direktiv såsom direktiv 2010/35/EU transportabla tryckbärande anordningar (TPED) (4) en europeisk rättslig ram för utrustning som är utsatts för tryck. PED behandlar utrustning och aggregat vars högsta tillåtna tryck överstiger 0,5 bar, och inkluderar tryckkärl, rörledningar, säkerhetstillbehör och trycktillbehör. Enligt direktivet ska tryckbärande anordningar vara säkra, uppfylla väsentliga säkerhetskrav som omfattar konstruktion, tillverkning och provning, uppfylla lämpliga förfaranden för bedömning av överensstämmelse och bära CE-märkning och annan nödvändig information. Kraven måste vara uppfyllda vid tillverkningstillfället och innan de släpps ut på marknaden. Viktiga bilagor inkluderar:

Bilaga I: Väsentliga säkerhetskrav / Särskilda krav på tryckbärande anordningar
Bilaga II: Tabeller för bedömning av överensstämmelse
Bilaga III: Förfaranden för bedömning av överensstämmelse

Direktivet förklaras i officiella riktlinjer (5).

Som ett direktiv måste nationella införlivandeåtgärder vidtas, och för Sverige finns dessa också (6), den viktigaste av dem är AFS 2016:1 (se nedan).

Tryckbärande anordningar (AFS 2016:1), föreskrifter
Den svenska implementeringen av PED publiceras av Arbetsmiljöverket som AFS 2016:1 (Tryckbärande anordningar) (7). Föreskrifterna gäller konstruktion, tillverkning och bedömning av överensstämmelse för tryckbärande anordningar och aggregat vars högsta tillåtna tryck, är högre än 0,5 bar.

Harmoniserande standarder till PED
PED hänvisar liksom andra europeiska direktiv, till "harmoniserade standarder". Att uppfylla harmoniserade standarder ger en presumtion om överensstämmelse med motsvarande tekniska krav som anges i direktivet, och en lista över relevanta standarder finns tillgänglig (8).

Det finns en sammanfattning av hänvisningar till harmoniserade standarder som offentliggjorts i Europeiska unionens officiella tidning för Direktiv 2014/68/EU (PED) (9).

En svensköversättning för sammanfattningslistan över harmoniserade standarder finns (10).

Svensk standardserie SS-EN 13445 (till exempel (11)) är en harmoniserad standard för PED men är inte specifik för vätgas eller kompositbehållare.

Icke-harmoniserande standarder
Svensk Standard SS-EN 17533:2020 ”Vätgas - Gasflaskor och storflaskor för stationär lagring” (12) är inte harmoniserad mot PED eller något annat EU-direktiv (13) (14). SS-EN 17533: 2020 kan ha sitt ursprung i en vägfordonsstandard, till exempel ISO 19881. Ett liknande ISO-utkast ISO/FDIS 19884 Ed.1.0 daterat 2019 (15) avvisades och har ersatts av ett nyligen släppt Committee Draft ISO/CD 19884-1, Gaseous hydrogen - Cylinders and tubes for stationary storage - Part 1: General Requirements (16).

3.2.2 Regelverk för transportabla anordningar

Direktiv 2010/35/EU - Transportable Pressure Equipment (TPED)
Direktivet om transportabla tryckbärande anordningar 2010/35/EU (TPED) (4) gäller konstruktion, tillverkning, bedömning av överensstämmelse, periodisk inspektion, mellanliggande inspektion, exceptionella kontroller och förnyad bedömning av överensstämmelse för tryckkärl som används för transport av klass 2-gaser, täcks av respektive:

- Avsnitt 6.2 i ADR (till exempel transportabla flaskor, driftsutrusning, tryckfat och gasflaskpaket, kemikalier under tryck, slutna kryogena behållare, aerosolbehållare, engångsbehållare för gas), och
- Avsnitt 6.8 i ADR (till exempel tankar (tankfordon), avmonterbara tankar, batterifordon, tankcontainrar, växeltankar och MEG-container (gasflaskor som är förbundna med varandra med ett samlingsrör i en ram)).

TPED inkluderar tillhörande ventiler och andra tillbehör med direkt säkerhetsfunktion, när så är lämpligt, och inkluderar både påfyllningsbara och icke-återfyllbara tryckkärl.

Transportabel tryckbärande utrustning som överensstämmer med TPED måste bära π (pi)-märkningen för att indikera överensstämmelse med direktivet. Anordningarna ska även vara försedda med den märkning som föreskrivs i reglerna om internationell transport av farligt gods på väg (ADR), på järnväg (RID) och på inre vattenvägar (ADN).

Transportabla tryckbärande anordningar (MSBFS 2011:3), föreskrifter
Den svenska implementeringen av TPED publiceras av Myndigheten för samhällsskydd och beredskap som MSBFS 2011:3 Föreskrifter om transportabla tryckbärande anordningar (17).

3.2.3 Andra relevanta krav

AFS 2017:3 Arbetsmiljöverkets föreskrifter och allmänna råd om användning och kontroll av trycksatta anordningar och säkerhetsutrustning (18).

MSBFS 2013:3 Föreskrifter om tillstånd till hantering av brandfarliga gaser och vätskor (19).

MSBFS 2020:1 Föreskrifter om hantering av brandfarlig gas och brandfarliga aerosoler (20)

Seveso Lag och förordning inom lagstiftningsområdet ”Allvarliga kemikalieolyckor/Seveso”, samt MSB:s föreskrifter inom området (21).

4. KARTLÄGGNING AV KOMPOSITBEHÅLLARE

4.1 Vilka olika typer och storlekar av behållare, konstruktioner och material förekommer på marknaden och vilka är de stora tillverkarna? Hur definieras s.k. typ 1-5 behållare?

Det finns olika typer av konstruktion av komprimerade vätgasbehållare. Typ 1-4 används i både standarder och allmänt till exempel (22), och definitionerna kan variera i mindre detaljer från källa till källa men kan sammanfattas enligt följande:

- Typ 1 eller I: Helmetallkonstruktion, oftast stål.
- Typ 2 eller II: Stål- eller aluminiumkonstruktion med ett cylinderlindat filamentkompositfiber/hartsomslag i ringledsriktning, vanligtvis med glasfibrer. Lasterna delas av metall och komposit.
- Typ 3 eller III: Metallinnerbehållare med ett helt kontinuerligt filamentkompositomslag, vanligtvis aluminium eller stållegeringar med kolfiber/hartskomposit. Kompositmaterialet bär de strukturella belastningarna.
- Typ 4 eller IV: Polymerinnerbehållare med ett helt kontinuerligt filamentkompositomslag, vanligtvis polyamid (PA) eller högdensitetspolyeten (HDPE) innerbehållare med kolfiber/hartskomposit. Kompositmaterialen bär de strukturella belastningarna.
- Typ 5 eller V: Utan innerbehållare, helt kompositkonstruktion.

Typ 5 eller V är för närvarande inte definierad i några juridiska krav/lagstiftning, men finns i några publicerade standarder, till exempel:

- SS-EN 12245:2022 ”Gasflaskor – Hellindade gasflaskor av kompositmaterial (gäller sömlösa transportabla gasflaskor, 150 till 3000L vattenkapacitet)”, 4.4.2 § notering ”for cylinders without liner (Type 5 cylinders)” (23).
- ISO 11114-5:2022 ”Gas cylinders - Compatibility of cylinder and valve materials with gas contents - Part 5: Test methods for evaluating plastic liners” (ISO 11114-5:2022)”, Omfattning: ”It may also be used to evaluate the suitability of plastic matrix materials used for Type 5 cylinders” (24).
- SS-ISO 11119-3:2020 ”Gasflaskor - Konstruktion, tillverkning och provning för återfyllningsbara flaskor och storflaskor av kompositmaterial - Del 3: Hellindade fiberförstärkta flaskor och storflaskor av kompositmaterial med metallisk och icke metallisk ej lastbärande innerbehållare, med kapacitet till och med 450 l (ISO 11119-3:2020, IDT)”, Omfattning: ”type 5 fully wrapped cylinders or tubes without liners and with a test pressure of less than 60 bar and composite reinforcement on both the cylindrical portion and the dome ends;” (25).

Svensk Standard SS-EN 17533:2020 ”Vätgas - Gasflaskor och storflaskor för stationär lagring” (12) definierar de olika typerna enligt följande och är mer specifik när det gäller lastdelningsrollen för kompositkonstruktioner:

- Typ 1 behållare: sömlös cylindrisk behållare av metall
- Behållare typ 2: cylinderlindad cylindrisk behållare med en lastdelande metallinnerbehållare och kompositförstärkning endast på den cylindriska delen
- Behållare typ 3: hellindad cylindrisk behållare med en lastdelande metallinnerbehållare och kompositförstärkning på både den cylindriska delen och kupoländarna
- Behållare typ 4: hellindad cylindrisk behållare med en icke-lastdelande innerbehållare och kompositförstärkning på både den cylindriska delen och kupoländarna

Anmärkningar:

- Innerbehållare: inre del av den sammansatta cylindern, som består av ett metalliskt eller icke-metalliskt kärl, vars syfte är att både innehålla gasen och överföra gastrycket till fibrerna
- Lastdelningsinnerbehållare: innerbehållare som har ett sprängtryck på minst 5 % av det lägsta sprängtrycket för den färdiga kompositcylindern
- Icke-lastdelande innerbehållare: innerbehållare (3.1.13) som har ett sprängtryck (3.1.5) som är mindre än 5 % av det nominella sprängtrycket för den färdiga kompositcylindern

Den mest betydande skillnaden mellan definitionen av typer i EN17533 och den allmänt använda definitionen för typ 4 är att SS-EN 17533: 2020 typ 4 täcker både metalliska och icke-metalliska innerbehållare.

De typdefinitioner för behållare som kan komma att användas i framtiden ISO 19884-1 (16) kan också skilja sig från befintlig terminologi.

Svensk Standard SS-ISO 11515:2022 ”Gasflaskor - Återfyllningsbara förstärkta storflaskor av kompositmaterial med vattenkapacitet från 450 l till och med 3000 l - Beräkning, konstruktion och provning” (26) är tillämplig på ”composite tubes used alone or in batteries to equip trailers or skids (ISO modules) or multiple element gas containers (MEGCs) for the transportation and distribution of gases” antar liknande typdefinitioner som SS-EN 17533: 2020. ISO 11515 har skrivits så att den är lämpligt att refereras till i FN:s modellregler ”UN Model Regulations on the Transport of Dangerous Goods Rev. 22 (2021)” (27) som inkluderar krav på design,

konstruktion, inspektion och provning av UN-tankar med skal tillverkade av fiberförstärkta plastmaterial (FRP).

Definitionerna antagna i ISO 19884-1 Gaseous hydrogen — Cylinders and tubes for stationary storage — Part 1: General Requirements (16) är ännu inte offentligt tillgängliga.

Tankar i komposit förekommer främst i fordonsbranschen och då som kolfiberkomposit. Att man väljer just kolfiberkomposit beror på till stor del på materialets låga egenvikt. För dessa tankar är det typiskt trycknivåer på 350 och 700 bar som är branschstandard. Tankvolymerna ligger för personbilar kring 50-100 liter och för lastbilar uppemot 450 liter men trenden är att volymerna blir större. I de flesta fall kombinerar man flera tankar för att nå den energimängd som behövs. På en personbil används i dagsläget typiskt 2-3 tankar för att lagra ca 5-10 kg vätgas och för en lastbil uppemot 10 tankar för att lagra ca 30-100 kg vätgas. Kolfiberkomposit förekommer även som material vid stationär lagring vid högre trycknivåer men av kostnadsskäl är ståltankar dominerande vid denna applikation då vikten inte har någon praktisk betydelse. Det finns även exempel på komposittankar som används vid lägre tryck där man istället för kolfiber använder andra fibrer som glasfiber och också andra kombinationer med till exempel aramidfiber har tagits fram för att reducera kostnaden. Medan kolfiber är vanligt förekommande vid konstruktion av högtrycksvätgastankar, kan andra fibrer användas så som glas eller aramid, och tankar som använder en blandning av fibrer för att optimera styrka och kostnader har utvecklats. Exempel på några tillverkare ges i Tabell 1.

Tabell 1: Sammanställning över tanktillverkare (listan är inte fullständig).

Tillverkare	Typ	Placering	Hemsida
Aether CT Co	Kolfiberkomposit, typ IV, metall	Korea	www.aetherct.com
Calvera	Anläggningar?		www.calvera.es
Chesterfield Special Cylinders	Metall, typ I	GB	www.chesterfieldcylinders.com
Cimarron	Type IV	USA	www.ngvglobal.com
Faber	Typ I-IV	Italy	ttps://www.faber-italy.com/index.html
Farurecia	Kolfiberkomposit, typ IV	Frankrike	www.faurecia.com/
FIBA Technologies Inc	Metall,	USA	www.fibatech.com
Hexagon Composites	Kolfiberkomposit, typ IV	Norge	www.hexagongroup.com
Hexagon Purus	Kolfiberkomposit, typ IV	Norge, Tyskland mm	www.hexagonpurus.com
Iljin Composites	Kolfiberkomposit, typ IV	Korea	www.iljin.co.kr
JFE	Typ I - IV	Japan	www.jfe-steel.co.jp
Luxfer Gas Cylinders	Kolfiberkomposit, typ IV, metall	USA	www.luxfercylinders.com
Mahytec	Kolfiberkomposit, typ IV	France	https://www.mahytec.com/en
NPROXX	Kolfiberkomposit, typ IV	Nederländerna	www.nproxx.com
Plastic Omnium	Kolfiberkomposit, typ IV	Frankrike	www.plasticomnium.com
Quantum Fuel Systems	Kolfiberkomposit, typ IV	USA	https://www.qtww.com
Sinoma	Kolfiberkomposit, typ IV	Kina	www.sinomatech.com
Steelhead Composites	Kolfiberkomposit, typ III	USA	https://steelheadcomposites.com/
Umoe Advanced Composites AS	Kolfiberkomposit, typ IV	Norge	www.uac.no
Ullit	Kolfiberkomposit, typ IV	Frankrike	www.ullit.com
Vitkovice Cylinders	Metall	Tjeckien	www.cylinders.cz

4.2 Hur är relationen till UN-ECE R134 (typ 1-5 behållare)?

UNECE Regulation 134 (28) och relaterade ändringar (29) har antagits av EU och är endast tillämpligt på vägfordon (bilar, bussar och lastbilar). I linje med dess överordnade dokument UN ECE Global Technical Regulation No.13 (30), definierar inte R134 eller hänvisar till Type 1-5 containers. Detta tillvägagångssätt används också i en industristandard SAE J2579: 06-2018 (31).

Däremot definierades Typ 1-4 behållare i den nyligen återkallade Regulation (EC) No. 79/2009 (32), Annex IV, Point 1 som (också) endast var tillämpligt på vägfordon (bilar, bussar och lastbilar):

- Typ 1 sömlös metallbehållare
- Typ 2 Cylinderlindad behållare med en sömlös metallinnerbehållare
- Typ 3 Hellindad behållare med en sömlös eller svetsad metallinnerbehållare
- Typ 4 Hellindad behållare med en icke-metalliskt innerbehållare

I standarderna ISO 19881: 2018 (33) (tillämpligt för landfordon, men i praktiken vägfordon) och CSA/ANSI HGV 2:21 (34) (tillämpligt för vägfordon) antas förfinade definitioner som är motsvarande följande:

- Metallbehållare av typ 1
- Behållare av typ 2 som innehåller en metallinnerbehållare förstärkt med ett hartsimpregnerat kontinuerligt filament (cylinderlindad)
- Behållare av typ 3 som innehåller en metallinnerbehållare förstärkt med ett hartsimpregnerat kontinuerligt filament (hellindad)
- Behållare av typ 4 som innehåller ett hartsimpregnerat kontinuerligt filament med en icke-metallisk innerbehållare (helt i komposit)

Behållare av typ 5 eller typ V är för närvarande inte definierade i några lagkrav för vägfordon eller standarder, utan kallas vanligen för ”linerless” eller ”all-composite” construction” och befinner sig för närvarande i utvecklingsfasen med fokus på lågtryckslagring, se också 4.1.

Sammanfattningsvis, medan definitionerna av typ 1 till 4 är likartade för stationära applikation och vägfordon, finns det vissa skillnader i detaljerna.

4.3 Vilka CE- respektive, pi-märkningar finns för de olika behållarna, enligt vilka direktiv och vilka är de anmälda organen?

Märkning

CE-märkningen är en officiell märkning inom ramen för europeiska direktiv (till exempel tryckbärande anordningar, etc). CE-märkning visar att en produkt uppfyller de grundläggande säkerhetskraven (ESR) i alla europeiska direktiv som gäller för en specifik produkt, och krävs av tryckutrustningsdirektivet PED, 2014/68/EU (3).

π (pi)-märkningen liknar CE-märkningen, men den gäller endast vissa typer av transportabel tryckutrustning (enligt TPED), till exempel gasflaskor, aerosolförpackningar, tankar och kärl. π-märkningen krävs enligt direktivet om transportabel tryckutrustning TPED, 2010/35/EU (4).

Ex-märkningen (Ex) används för överensstämmelse med ATEX (Utrustning och skyddssystem avsedda för användning i potentiellt explosiva miljöer) Direktiv 2014/34/EU (35). Omfattningen omfattar elektrisk, mekanisk och annan utrustning, och skyddssystem för potentiellt explosiva atmosfärer med brandfarlig gas, ångor, dimma eller damm. Det gäller även produkter utanför riskområden, om de krävs eller bidrar till skyddet av Ex-utrustning i riskområden.

Anmälda organ

Anmälda organ (Notified Bodies) är oberoende organisationer som bistår och övervakar tillverkarnas arbete med att verifiera att produkterna uppfyller EU:s regelverk (36). Detta sker genom provning, kontroll och certifiering i enlighet med EU:s rättsakter. Namnet anmält organ kommer från att EU medlemslandet ska anmäla de organisationer som godkänts till EU-kommissionen, som i sin tur tilldelar varje anmält kontrollorgan ett fyrsiffrigt identitetsnummer och publicerar namn och adress i kommissionens tidning, Official Journal of the European Union (OJ). En förteckning över de anmälda organ som arbetar inom olika områden finns i Europeiska kommissionens publika databas Nando (37) (38) (39).

Utsedda organ

Utsedda organ (Appointed Bodies) inom EU provar och certifierar produkter som ska släppas ut på marknaden i länder som ingått avtal med EU om ömsesidigt erkännande. Avtalen kallas ofta för MRA vilket är en förkortning av det engelska Mutual Recognition Agreement. Avtalen reglerar under vilka förhållanden provningsrapporter, intyg och certifikat godkänns mellan EU och annan avtalspart. Genom detta kan en utomeuropeisk tillverkare som vill exportera sina produkter till EU låta ett utsett organ i sitt hemland prova och certifiera produkterna. Produkterna provas och certifieras då mot det regelverk som gäller inom EU.

Utsedda organ utses av EU:s medlemsstater. Europeiska kommissionen vidarebefordrar sedan detta till det land som EU har slutit avtal med. I Sverige är det Swedac som prövar ansökningar till att bli utsedda organ. De som vill bli utsedda måste uppfylla de krav på kompetens som framgår av lagstiftningen i det land som EU har ett ömsesidigt MRA-avtal med.

Swedac (Styrelsen för ackreditering och teknisk kontroll) är den nationella anmälande myndigheten i Sverige. Detta innebär att Swedac bedömer och utser organ efter samråd med berörda myndigheter, och därefter anmäler organen till EU-kommissionen. Swedac utövar också tillsyn över anmälda organ, i samverkan med sektorsansvarig myndighet. De sektorsansvariga myndigheterna är samlat på Marknadskontrollrådets webbplats (40). Sedan april 2021 tillämpar Swedac EA:s policydokument EA-2/17 M:2020 (41) gällande vilka ackrediteringsstandarder som ska användas för olika direktiv och för de olika moduler som ingår i respektive. Undantag från EA-2/17 kan komma att tillämpas i fall där ansvarig sektorsmyndighet föreskriver om användande av alternativa standarder. Ett exempel på ett sådant område är Hissdirektivet (2014/33/EU), där Boverket avser föreskriva om alternativa standarder.

Övriga intressenter

<u>Arbetsmiljöverket (AV)</u>

- AV har som mål att minska riskerna för ohälsa och olycksfall i arbetslivet och att förbättra arbetsmiljön.
- Ansvarsområden: Utrustning för explosionsfarlig miljö (ATEX), enkla tryckkärl, tryckbärande anordningar, maskiner, personlig skyddsutrustning för yrkesmässigt bruk, arbetsställningar, -stegar och -bockar, gruvhissar och skyddsräcken.

<u>Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB)</u>

- MSB stärker samhället i att förebygga och hantera olyckor, kriser och konsekvenser av krig. Myndigheten värnar människors liv och hälsa, samhällets funktionalitet och grundläggande värden som demokrati, rättssäkerhet och mänskliga rättigheter.

- Ansvarsområden: Explosiva varor och vissa anordningar för att hantera brandfarliga eller explosiva varor, till exempel aerosolbehållare, samt transportabla tryckbärande anordningar och gasapparater.

4.3a Pi-märkning lär ska duga istället för CE-märkning om en behållare används stationärt. Detta ska stå i Guidelines till PED men var?

Guidelines A-30 (sida 39) och A-33 (sida 41) i ”Guidelines related to the Pressure Equipment Directive 2014/68/EU (PED)” (5) tar upp den här frågan, se Figur 1 och Figur 2.

Guideline A-30

Pressure Equipment Directive PED 2014/68/EU
Commission's Working Group "Pressure"

Guideline related to: Article 1 paragraph 2 (s)

Question	**Is it permissible to affix both the CE marking for the PED and the π mark for the TPED on an item of pressure equipment?**
Answer	Yes This double marking proves that the item of pressure equipment complies with both directives, and can be used in both contexts without further assessment. A similar item bearing only the π mark could also be used for pressure purposes outside the scope of ADR/RID but consideration would need to be given to possible national regulations, or to PED if included in a PED assembly. Hence, if a manufacturer intends a product to be used in both contexts and designs and manufactures it accordingly so that it complies with both applicable Directives, it shall bear both markings, to the extent foreseen by each Directive (e.g. no CE marking for SEP equipment (Article 4 paragraph 3), and no π-marking for certain accessories). If the manufacturer of the product only foresees it to be used in the scope of one of the Directives, only one Directive applies and one marking (as far as applicable) shall be affixed (see also PED Guideline A-33). See also PED Guidelines A-14 and A-33.
Reason	While in principle, Article 1 paragraph 2 (s) of the PED excludes equipment covered by ADR/RID, it is not always possible for the manufacturer to know whether or not a particular item of equipment he manufactures will during its use come into the scope of these International Transport Agreements. This is in particular true for accessories, which may well be used for both purposes with no technical alterations. In such a case, it would only be possible after the user has taken the product into service, to know, which of the two Directives does not apply to the product. Until then, both Directives shall be considered to be applicable. Such double marking would not violate the provisions of Article 19 of the PED, as, up to the moment the product was placed on the market, it was not excluded from the scope of the PED. When at a later point in time the product is de facto used in the context of a transportation of dangerous goods, the fact that it bears the CE marking is insignificant.
Note	

Accepted by Working Party Guidelines (WPG) on:	08/12/2015
Accepted by Working Group Pressure (WGP) on:	15/03/2016

Figur 1: Guideline A-30 (Figur från (5))

Guideline A-33

Pressure Equipment Directive PED 2014/68/EU
Commission's Working Group "Pressure"

Guideline related to: Article 1 paragraph 2 (s)

Question	**Can receptacles (in the meaning of Article 2 of Transportable Pressure Equipment Directive) that are « pi » marked be used as static pressure equipment without being CE marked?**
Answer	Yes, provided the « pi » marked receptacle has been placed on the market and used as transportable pressure equipment, it can then be used permanently as static pressure equipment without being CE marked.
Reason	
Note 1	For static use the receptacle may be subject to national regulation dealing with conditions of use, installation and periodic inspection. (see also Article 3 of TPED 2010/35/EU- On-site requirements)
Note 2	The term "static pressure equipment" has to be understood as "pressure equipment under the scope of Pressure Equipment Directive", even though these receptacles fall under Article 1 paragraph 2 (s) of PED.
Note 3	See PED Guideline A-30 for receptacles with double CE-mark and π-mark.

Accepted by Working Party Guidelines (WPG) on:	08/12/2015
Accepted by Working Group Pressure (WGP) on:	15/03/2016

Figur 2: Guideline A-33 (Figur från (5))

4.4 Krav på behållare för vätgas vid 300, 500 respektive 950 bar som är CE-märkta enligt AFS 2016:1 (PED)

I redovisningen inkluderar vi även relevanta delar av AFS 2017:3 som riktar sig mot ”Användning och kontroll av trycksatta anordningar”.

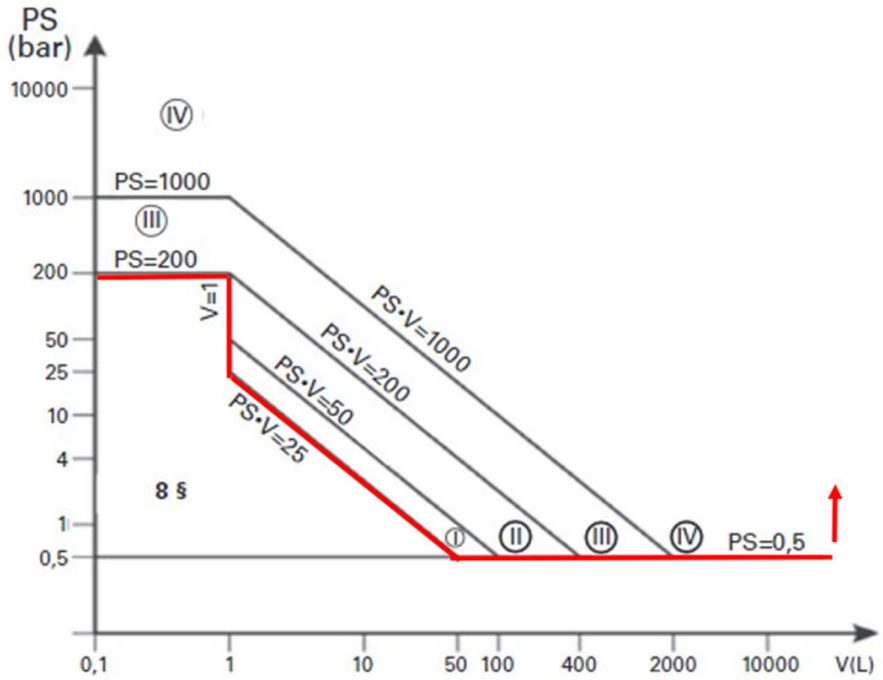
AFS 2016:1 innehåller främst funktionskrav istället för mer preciserade krav. Man skriver till exempel:

> *“Tryckbärande anordningar ska konstrueras korrekt genom att man beaktar alla relevanta faktorer som behövs för att garantera att anordningen är säker under hela den avsedda livslängden”*

Formuleringar som denna medför att direktivet blir i stort sett heltäckande på en övergripande nivå. För att hantera funktionskraven finns det guider och vägledningar. En viss hjälp finns att få i till exempel Energigasers egna tillägg, "EGN, SGA, BGA & LNGA", från harmoniserade standarder och även från en så kallad “blue guide” som uppdateras med frågor och svar (42). Nedan redovisas kommentarer och resonemang kring de avsnitt och formuleringar i AFS 2016:1 som är av speciellt intresse för att i mer detalj analysera hur väl direktivet hanterar just tryckkärlslösningar för vätgaslagring som energibärare.

AFS 2016:1, 6-9 §

Vätgas kategoriseras på grund av sin brännbarhet som en fluid tillhörande grupp 1. För denna grupp av fluider är regelverket tillämpbart i de fall PS överstiger 0,5 bar tillsammans med villkoret om volymen överstiger 1 liter och produkten PS × V överstiger 25 bar × liter, eller då trycket PS överstiger 200 bar (AFS2016:1, Bilaga 2, diagram 1) se Figur 2. För vissa lägre kombinationer av tryck och volym kommer alltså ett tryckkärl inte att omfattas av regelverket. I praktiken kommer dock inte några installationer med de behållare som efterfrågas i frågeställningen hamna utanför detta regelverk då de så gott som uteslutande kommer att ha en för stor volym om de ska ha en energimängd stor nog för reservkraft till exempel. Det bör nämnas att lagringstryck lägre än de 300 bar som till exempel föreslås i frågeställningen i framtiden kan bli vanliga då det finns anläggningar som typiskt har ett arbetstryck från 20 bar och uppåt. Dessa anläggningar utnyttjar trycket direkt från elektrolysören utan en efterföljande kompressor.



Figur 2: Tryckkärl fyllda med Vätgas omfattas av regelverket i de kombinationer av volym och tryck som befinner sig ovan den röda linjen. Diagram från AFS 2016:1.

AFS 2016:1, 15-20 §

För alla behållare med denna CE-märkning ska dokumentation finnas för att visa att den tryckbärande anordningen överensstämmer med regelverket och den ska finnas tillgänglig i minst 10 år efter den släppts på marknaden. Ansvaret ligger hos importör/distributör/tillverkaren och tillverkarens representant. Utöver det ska så kallade ekonomiska aktörer bokföra från vem eller till vilka de köpt eller sålt en tryckbärande anordning. Spårbarheten för CE-märkta tryckkärl kan således anses vara god under de första 10 åren. Spårbarhet är en grund i hela PED, man ska kunna spåra tillverkningen ner till råvaran.

AFS 2016:1, 38 §
Hanterar kvalificeringen av materialet som kärlet tillverkas av. Här finns inget som explicit hanterar vätgas, istället hänvisas till godkänt material för användning till tryckkärl.

AFS 2016:1, 40 §
Öppnar för en möjlighet för brukaren att bli sitt eget kontrollorgan för ibruktagande (konstruktion, tillverkning, kontroll, underhåll, och användning) av tryckkärl som enbart får användas inom den egna organisationen. I detta fall får inte kärlen CE-märkas. De väsentliga säkerhetskraven från PED (Bilaga 1) gäller dock oförändrade. En brukare av denna typ skulle till kunna vara en större industri som driver en eller flera vindkraftsparker. Brukarnas kontrollorgan ska arbeta uteslutande för den grupp de ingår i. Det innebär att det i vissa anläggningar kan komma att finnas icke CE-märkta tryckkärl som ändå uppfyller kraven på säkerhet.

AFS 2016:1, Bilaga 1: 2.2.1
Här ställs krav på dimensioneringen av konstruktionen av tryckkärlet och man skriver att tillverkaren ska beakta att konstruktionen ska klara alla rimligen förutsebara driftsförhållanden med flera exempel. Dock nämns inte väteförsprödning explicit här. Ytterligare krav på materialval finns i Bilaga 1, avsnitt 4. Här skriver man att ett korrekt materialval ska göras så att man vid behov kan förhindra ett sprödbrott.

AFS 2016:1, Bilaga 1: 2.2.2
Här ges en möjlighet att få ett tryckkärl på marknaden utan att som i normalfallet göra det med start i en beräkningsmetod. Istället kan arbetet utföras utan beräkningar för de fall då produkten av högsta tillåtna arbetstryck PS och volymen är mindre än 6000 barliter. För till exempel ett 300 bar kärl innebär det en volym om max 20 liter. Normalfallet innebär att beräkningar utförs med hänsyn till alla förutsebara påverkansfaktorer och vid behov så utförs så kallade experimentella provningar. Det är det anmälda organet som avgör provplanen och vilka prov som behöver utföras. Traditionella tryckkärl i stål får anses vara en mogen bransch där riskerna är kända men för andra tillverkningsmaterial som till exempel komposit så är inte tekniken lika gammal. I andra regelverk, till exempel R110 och R134 som reglerar gastankar för vägfordonsbruk, så finns det krav på att tryckkärl i komposit ska genomgå en serie prover där till exempel samma individ provas i en serie av prov. Dessa mer dedikerade regelverk ställer krav på experimentell provning och dessutom ingår en återkommande batchkontroll av de producerade tankarna. I dessa regelverk finns inte möjligheten att kvalificera tryckkärl av komposit enbart baserat på inspektion vid tillverkningen, utan några av dessa individer måste också genomgå förstörande provning. Dels trycks en tank till brott, dels utsätts en tank för hydraulisk tryckcykling för minst 20 000 cykler för att kvalificera batchen. Av detta kan man dra slutsatsen att kompositkärl av sin komplexitet är mer känsliga för avvikelser vid tillverkning och därav kräver en extra tuff kravställning och avgörandet om provning behövs eller ej är inte upp till det anmälda organet.

AFS 2016:1, Bilaga 1: 2.4 Inspektionsmöjlighet
Normalt är det krav på möjlighet för invändig inspektion och att kärlet ska vara anpassat för det. Dock finns det undantag från detta:

- Då öppnandet av den tryckbärande anordningen riskerar att negativt påverka anordningen invändigt.

- Om det är *"bevisat att anordningens innehåll inte är skadligt för det material som den är tillverkad av, och att ingen annan skademekanism rimligen är förutsebar"*.

För ett tryckkärl för vätgas som energibärare kommer öppnandet av ett kärl, utöver brand och explosionsrisken, innebära att det kontamineras i första hand med fuktig luft och kommer innan återtagande att behöva "spolas rent" för att minimera risken för kontamination. Samtidigt slits kopplingar och riskerar att läcka vid om-montage. Hur inspektionen ska gå till för just tryckkärl för vätgas med hänsyn till de försvårade omständigheterna är inte uttalat. Lämpliga sätt brukar hanteras nationellt av Kontrollorganen i samband med Swetic, och Arbetsmiljöverket. För andra applikationer till exempel hydraulackumulatorer som är kvävgasfyllda (en inert gas) har man ansett att de inte är utsatta för korrosion på insidan och därför räcker det med en yttre inspektion.

AFS 2016:1, Bilaga 1: 2.5 Tömning och avluftning
Kärlen ska vid behov kunna tömmas och avluftas bland annat för att kunna göra inspektion enligt ovan. Det finns också exempel på tankar i komposit med en så kallade "liner" eller innerbehållare där det gastryck som med diffusion byggts upp över lång tid, i utrymmet mellan innerbehållare och det yttre höljet, riskerar att implodera den inre tanken när trycket i denna blir för lågt. Dessa tankar kan helt enkelt inte tömmas helt utan uppenbara risker för permanenta skador. Detta krav kan därmed i praktiken bli omöjligt att uppfylla för denna typ av tankar.

AFS 2016:1, Bilaga 1: 2.12 Extern brand
"Om nödvändigt ska tryckbärande anordningar vara konstruerade och, i förekommande fall, vara utrustade med lämpliga tillbehör eller förberedas för att utrustas med sådana för att uppfylla kraven på skadebegränsning vid extern brand, i synnerhet med beaktande av anordningens avsedda användning." Detta är ett funktionskrav utifrån en bedömning "om nödvändigt". Detta behöver inte innebära några egna krav på brandskydd för kompositbehållare i allmänhet, men för specifik avsedd användning med en högre extern brandrisk krävs skadebegränsning, eller möjlighet för skadebegränsning, för tryckbärande anordningar. MSBFS 2020:1 ställer krav på att behållare ska vara obrännbara eller på annat sätt skyddade mot brand (undantaget lösa behållare).

AFS 2016:1, Bilaga3
I detta avsnitt hanteras i huvudsak hur kontroller ska genomföras och vem som ska utföra dem. Här finns en skillnad för tankar med ett maximalt arbetstryck på 300, 500 resp 950 bar. Skillnaden beror av var de hamnar i diagrammet i AFS 2016:1, Bilaga 2, diagram 1 (figur 2 i denna rapport). Skillnaden består i hur självständigt tillverkaren kan godkänna de tillverkade tankarna. För godkännande för ett tryckkärl i kategori (I) räcker det med tillverkarens egenkontroll medan det för kategori (IV) krävs ett mer omfattande arbete som kräver bland annat kvalitetssystem och fortlöpande inspektion av ett anmält organ. Troligen kommer alla tryckkärl med vätgas för energilagring som har ett maximalt arbetstryck om mer än 300 bar att höra till kategori (IV) som innebär den mest omfattande kontrollen. För detta krävs en volym överstigande 10 liter, se AFS 2016:1, Bilaga 2, diagram 1.

AFS2017:3
Tryckkärlets klassning beror på volymen och till vilken nivå det trycksätts, se Figur 3. Om volymen är mindre än 0,25 liter vid 200 bar (50 bar x liter) kommer kärlet att tillhöra Klass B, För alla större eller kärl med högre tryck än detta kommer klassningen att tillhöra klass A och ska därmed besiktigas av ett ackrediterat kontrollorgan av typ A. Troligen kommer alla tryckkärl

med vätgas för energilagring som har ett maximalt arbetstryck om mer än 300 bar att höra till typ A.

Innehåll		Volym i liter, V	Tryck i bar, p	Klasser
Gas	1a	V > 1	p > 0,5	B / A
		0,1 < V ≤ 1	p > 200	A
	2a	V > 1	p > 0,5	B / A
		0,1 < V ≤ 1	p > 1000	A
Vätska	1a	V > 1	p > 10	B / A
			0,5 < p ≤ 10	B
		0,1 < V ≤ 1	p > 500	B
	2a	V > 10	p > 500	B

50 200 1000 2000 10000

Tryck gånger volym i barliter

Figur 3: Tryckkärl fyllda med Vätgas (en så kallade 1a gas) klassas in som A eller B beroende på produkten av tryck och volym. För denna tillämpning kommer alla kärl i praktiken att ha en volym över 1 liter därmed utgöra så kallade klass A kärl och därmed vara besiktningspliktiga (Tabell från AFS 2017:3).

Om en anläggning når någon av dessa klasser så ställs krav på dokumentation, kontroller (av ackrediterat organ) och märkning.

När ett ackrediterat organ behöver anlitas finns en förteckning hos styrelsen för ackreditering och teknisk kontroll, Swedac, som är nationellt ackrediteringsorgan i Sverige. I dagsläget finns de ackrediterade företagen listade på deras hemsida (43).

Det är arbetsgivarens ansvar att ha en förteckning över de trycksatta anordningar som faller under klass A eller B som finns i verksamheten, se 4 avsnitt 15 §. Vidare ska det finnas dokumenterade rutiner för fortlöpande tillsyn av dessa anordningar. En fysisk person på företaget ska utses för att se till att den fortlöpande tillsynen utförs och att den dokumenteras, se 4 avsnitt 14 §. Det ska också finnas rutiner om "övervakning" av behållare se 4 avsnitt 16 §.

4.5 Omfattas materialet i respektive behållare av en harmoniserad standard eller finns europeiska materialgodkännanden utfärdade av anmälda organ (38-39 §§ i AFS 2016:1)?

För att få använda ett material i en tryckbärande anordning måste materialet omfattas av någon harmoniserad standard eller så ska det ha utfärdats ett europeiskt material-godkännande av anmälda organ enligt 38-39 §§ i AFS 2016:1. Eventuella aktuella harmoniserade standarder som skulle kunna vara relevanta redovisas nedan.

Av de harmoniserade standarderna kopplade till PED har endast följande relevans för stationär vätgaslagring:

- SVENSK STANDARD SS-EN 13445-2:2021 Tryckkärl (ej eldberörda) - Del 2: Material
  SS-EN 13445-2:2021 (44) är den materiella delen av SS-EN 13445-serien av PED-harmoniserade standarder och specificerar kraven för stålprodukter som används till ej eldberörda tryckkärl. Avsnitt 4.2.1 kräver att väteförsprödning beaktas när materialet specificeras där det skulle påverka säkerheten eller livslängden för tryckkärlet negativt, dock ingår inga specifika krav. Normativ bilaga B innehåller krav för att förhindra sprödbrott vid låga temperaturer (under 50°C), men hänvisar inte till väteförsprödning.
- SVENSK STANDARD SS-EN 13923:2005 Tryckkärl av fiberlindad glasfiberarmerad plast - Material, konstruktion, tillverkning och kontroll
  Omfattningen av SS-EN 13923 (45) inkluderar materialkrav men standarden är begränsad till specifika former av tryckkärl av fiberlindad glasfiberarmerad plast. Den innehåller inte specifikt krav på vätekompatibilitet, och inte heller de refererade standarderna SS-EN 13121 Del 1 till 3.

Den icke-harmoniserade standarden SS-EN 17533:2020 (Vätgas – Gasflaskor och storflaskor för stationär lagring) (12) inkluderar specifika materialkrav i avsnitt 7 som är tillämpliga på kompositbehållare, men för strukturfibrerna är dessa begränsade till att begränsa fibermaterialtyperna till ”carbon fibre, aramid fibre or glass fibre, or any mixture thereof”.

Några specifika krav på brandmotstånd för komposittankar omfattas inte i några regler eller standarder, men har diskuterats för vägfordon (46). Indirekt krävs en viss nivå av brandmotstånd under tiden som ett Bonfire test pågår fram tills gasen ventileras (exempelvis genom LBB eller en smältsäkring, en så kallde TPRD – Thermally activated/ Temperature triggered Pressure Relief Device). Befintliga tankar för vägfordon rapporteras ha ett brandmotstånd (tiden till ruptur utan smältsäkring) i storleksordningen 5-20 min (46), beroende på brandens omfattning.

Det verkar alltså som att en europeiska material godkännanden (EMG) kommer att krävas för material som används i stationär vätgaslagring men det finns inga utfärdade när detta dokument uppfördes.

Proceduren kring Europeiskt Materialgodkännande, EMG, beskrivs i AFS 2016:1, 38-39§. EMG ska typiskt återfinnas i harmoniserade standarder. Om det inte finns kan ett av de anmälda organen som särskilt utsetts för denna uppgift utfärda ett EMG och rapportera detta vidare. Kommissionen ska hålla en uppdaterad förteckning över sådana godkännanden i Europeiska unionens officiella tidning (47).

4.6 Hur mycket extern strålning klarar behållarna innan hållfastheten påverkas negativt. Vi söker forskningsresultat alternativt försöksresultat som visar vid vilka strålningsnivåer en komposit-behållares hållfasthet påverkas negativt samt om dessa nivåer skiljer sig beroende på typ av behållare. Iså fall vad beror detta på? Material eller konstruktion?

En viktig säkerhetsparameter för kompositbehållare är hur mycket extern strålning de tål innan hållfastheten påverkas negativt. Nedan redovisas forsknings- och försöksresultat för vid vilka strålningsnivåer en kompositbehållares hållfasthet påverkas negativt. Det redovisas även om dessa nivåer skiljer sig mellan olika typer av behållare och vad det i så fall beror på, material eller konstruktion.

Det bör noteras att en extern brand i fasta stationära vätgasbehållares närhet är ett scenario som begränsas enligt gällande regelverk (till exempel AFS 2016:1 och SRV 2004:7 ATEX).

För kompositbehållare designade enligt SS-EN 17533: 2020 av typ 2, 3, eller 4 bär kompositen en majoritet av behållarens last, eller tryck. Kompositen består av fiberarmerade polymerer (FRP), det vill säga plaster förstärkta med tunna fibrer, oftast kolfiber, men i viss mån också glasfiber. Det är främst polymeren som kommer påverka antändningstiden, brinntiden och hur kraftigt det brinner. Hållfastheten är direkt kopplad till när polymeren mjuknar, vilket sker mellan 100 – 200 °C. Polymer börjar pyrolisera och brinna vid 300 – 400 °C (48). Vid en brand eller infallande strålning kommer ytan att börja värmas upp. En FRP har relativt bra brandmotstånd vilket betyder att det tar tid innan värme leds in i materialet, så hållfastheten förloras inte momentant. Brandmotståndet påverkas också i hög grad hur kompositen uppför sig vid en brand. Det bästa är om ett tätt förkolnat lager bildas som binder ihop med den friska kompositen. Det sämsta är om det förkolnade lagret bryts upp och exponerar frisk komposit för flammor. Eftersom polymeren börjar mjukna redan vid 100 °C räcker det med en mindre pyr-brand, eller en brand på avstånd, med en strålning på 5 – 10 kW/m^2 för att påbörja reduceringen i hållfasthet, dock skulle tiden till ruptur vid så pass låg strålning ta lång tid (över 1 timme), beroende på polymer, kompositens tjocklek och värmeledningsförmåga. Om komposittanken utsätts för direkta flammor (strålning på 50 – 100 kW/m^2) så kan en ruptur enligt litteraturen (se till exempel (46)) ske redan efter 5 – 20 min för kompositbehållare, beroende på hur omfattande branden är. Notera dock att strålning inte är ett bra mått för ett objekt som utsätts för direkta flammor, då är brandens storlek [kW] ett bättre mått på vad behållaren utsätts för. Ju kraftigare brand och desto högre starttryck, desto kortare tid till ruptur.

Notera att forskningsstudier (49) med kompositbehållare har visat att hållfastheten återfås när materialet får svalna, om det finns plast kvar som kan stelna igen.

Tidpunkten när hållfastheten börjar påverkas negativt beror främst på materialval men även på om polymeren kan skyddas med flamskyddsmedel. Enligt (48) är detta en kostnadsfråga där det helt enkelt skulle bli för dyrt att flamskydda kompositbehållare. Dock kan flamskyddsmedel också ha en negativ påverkan på andra parametrar såsom beständighet och livslängd. Som nämnts ovan kan en försvagning uppstå för lägre strålning (5-10 kW/m^2) under längre tid (> 1 h), eller högre stålning under kortare tid. En övre säker gräns för infallande strålning blir därmed som högst 5 kw/m^2. Andra sätt att skydda behållare med förutom avstånd är genom brandmotstånd, TPRD eller leak-before-burst.

Ett ökat brandmotstånd i form av brandskyddande färg eller isolering skulle vara ett sätt att öka kompositbehållares brandskydd via konstruktionen (46). Det bör dock nämnas att ett brandskyddande lager kan försvåra inspektioner. Ett annat sätt via material och konstruktion är så kallade leak-before-burst behållare, se nästa avsnitt. För en LBB behållare spelar det inte så stor roll när materialet försvagas, det viktiga är att gasen släpps ut på ett kontrollerat sätt i händelse av brand. TPRD behandlas i en parallell studie för MSB som handlar om vätgas säkerhetsutrustning, väteförsprödning, standarder mm.

4.7 Vi söker även en beskrivning av hur en Leak-before-burst behållare fungerar och hur den reagerar vid en brand. Används en Leak-before-burst strategi för några behållare på marknaden? I så fall vilka?

Nedan presenteras en beskrivning av hur en Leak-before-burst behållare fungerar och hur den reagerar vid en brand samt om en Leak-before-burst strategi används för några behållare på marknaden och i så fall vilka.

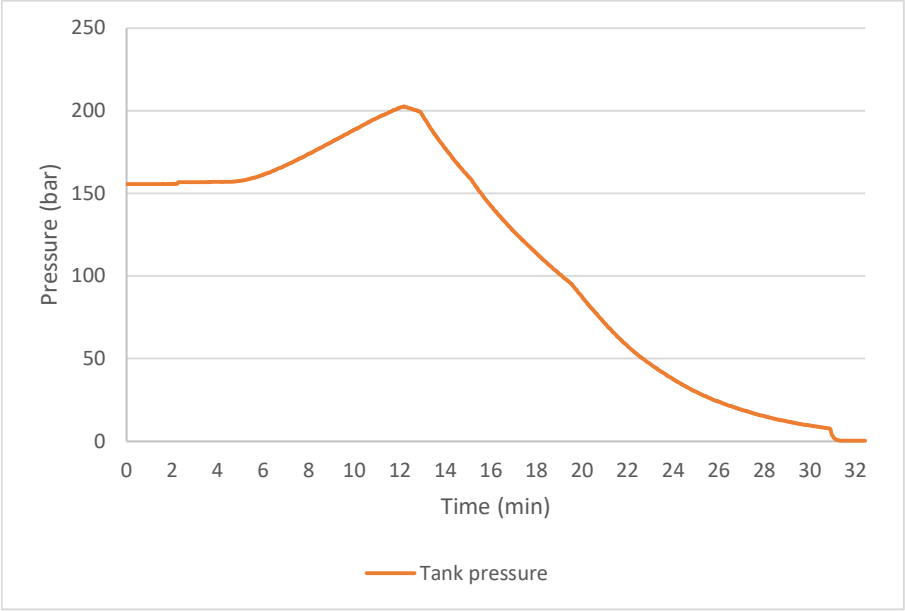
"Leak-before-burst " (LBB) prestanda kallas ibland för " leak-before-break " och kan beroende på sammanhang ha flera innebörder till exempel:

- Vid brand:
  Här avses att behållaren vid brandpåkänning inte förlorar sin lastbärande förmåga och därmed undviks en explosion. Behållaren är i stället designad så att innehållet tillåts läcka ut och på ett mer kontrollerat sätt brinna upp.
- Vid provning:
  Enligt den icke-harmoniserade europeiska standarden SS-EN17533: 2020 krävs ett specifikt LBB-test för alla behållare (typ 1 till 4). Enligt standarden ska behållaren vid tryckcykling inte brista eller explodera. När behållaren fallerar ska det vara på grund av ett läckage genom den lastbärande strukturen.
- Vid drift:
  Inspektionsintervall och metodik ska vara valda så att en spricka eller brist med hänsyn till sin tillväxthastighet detekteras innan den växer till kritisk storlek och ett större haveri eller explosion kan undvikas.

Som nämndes i avsnittet ovan så smälter (och brinner) polymeren redan vid låga temperaturer eller strålningsnivåer. Detta gör att kompositbehållare kan designas enligt ett ”leak-before-burst” (LBB) koncept i händelse av brand där gasen tillåts läcka igenom det hålrum som bildas i kompositen när innerbehållaren som håller gasen smält. Denna definition av LBB kommer användas hädanefter. Observera att LBB inte täcks explicit av PED.

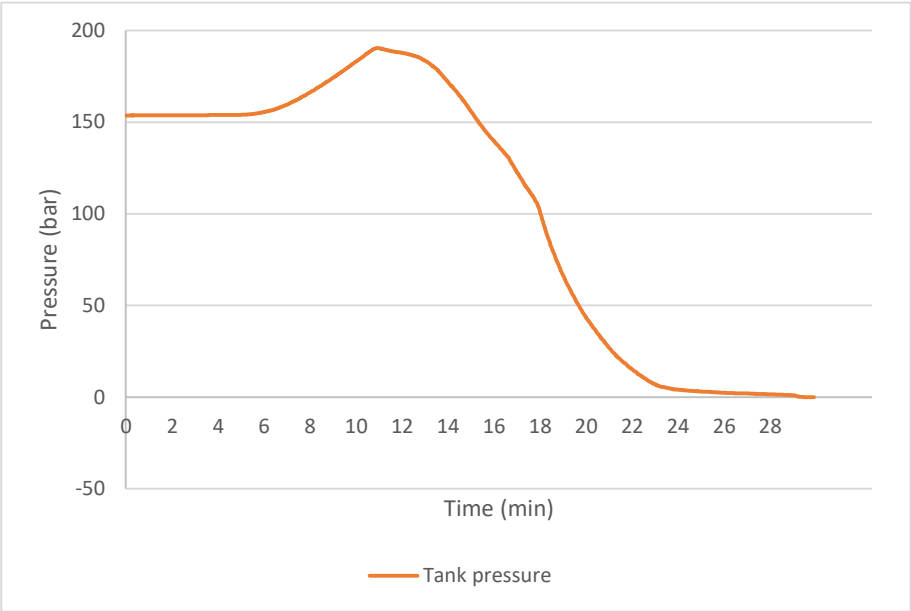
Enligt HyTunnel-CS läcker en LBB tank motsvarande en TPRD diameter på 0.2-0.3 mm, vilket exkluderar långa jetflammor och större tryckökningar (även i slutna utrymmen med ventilation). RISE har utfört brandprov på 3 st LBB behållare som var trycksatta med CNG[1]. I två av fallen utsattes behållaren för en heptan-brand under behållaren så att hela behållaren i stort sett utsattes för flammor. Samtidigt kyldes behållaren med vatten motsvarande 10-15 mm/min. Efter ungefär 8 minuters brand och vattenpåföring började behållaren släppa igenom gasen genom kompositen, vilket tydligt kunde höras på upptagen video samt mätas genom att behållarens tryck började avta, se Figur 4 nedan (notera att brand och kylning med vatten startar vid ca 4 min). Vid 31 min punkterades behållaren med beskjutning, då var behållaren i princip redan trycklös. Starttrycket var 15.6 MPa (50).

[1] Ulster/HyTunnel-CS och förarbetet till GTR13 (https://wiki.unece.org/download/attachments/155975904/GTR13-13-03%20TF4%202022-03-11_TF4_CHSS_FireTest.pdf?api=v2) nämner brandprov med vätgasbehållare, men vi har inte lyckats få tag i någon försöksdata.



Figur 4: Tryck vid brandprov med leak-before-burst tank. Utbredd brand och kylning med vatten startar vid ca 4 min.

I det tredje brandprovet utsattes behållaren för en mindre lokal brand (0.3 m * 0.3 m), utan vattenpåföring. Då började gas läcka igenom redan efter 5 minuters brand, se Figur 5 nedan.



Figur 5: Tryck vid brandprov med leak-before-burst behållare. Lokal brandkälla antänds vid ca 4 min.

LBB prestanda krävs av den icke-harmoniserade standarden SS-EN 17533: 2020 (12), se rekommendationer avsnitt 6.

Regelverk för vägfordon UN ECE GTR13 (30) och UN ECE R134 (28) härledda från GTR 13, kräver inte uttryckligen ett LBB-test, dock anses LBB/brottmotstånd ha uppfyllts av ”*the baseline pressure cycle life requirement is designed to provide an initial check for resistance to rupture due to the pressure cycling during on-road service. The baseline pressure cycle test requires either (i) the occurrence of leakage (that is designed to result in vehicle shut down and subsequent repair or removal of the container from service (para. 5.2.1.4.3.)) before the occurrence of rupture, or (ii) the capability to sustain 22,000 full-fill hydraulic pressure cycles without rupture or leakage*.” 22000 cykler motsvarar cirka 10 miljoner km för en personbil [GTR13, Sect. E, para 55]. ISO 19881: 2018 (33) kräver ett liknande antal cykler, men lägre cykelnummer är valfria. Icke desto mindre krävs ett specifikt LBB-test endast för behållare av typ 1 och 2. CSA/ANSI HGV 2:21 (34) liknar ISO 19881 men har ett lägre maximalt antal tryckcykler (11000 mot 22000). SAE J2579: 2018 (31) antar en liknande motivering som GTR13.

LBB-konceptet för kompositttankar i brandfallet är ett robust koncept för skydd mot ruptur i händelse av extern brand som inte beror på någon extern säkerhetsutrustning, som skulle bidra till ökad säkerhet.

4.8 Finns det krav på hur snabbt en kompositttank ska kunna tömmas vid en hotande extern brand? Och finns det risker med att tömma för snabbt och hur ser de ut? Finns risker kopplade till tömning under ett visst minimitryck och till antalet tryckcykler?

Nedan redovisas de krav för tömning av tankar vid en extern brand som finns i aktuella regelverk inklusive minsta tömningstid. Det görs en genomgång av eventuella risker med att tömma en kompositttank snabbt och även en genomgång av de risker som är kopplade till tömning under ett visst minimitryck och till antalet tryckcykler.

Vi har inte kunnat hitta några krav på hur snabbt en behållare ska tömmas vid en hotande brand. Enligt AFS 2016:1 ges ett funktionskrav för att ”uppfylla kraven på skadebegränsningar” i händelse av en extern brand (avsnitt 2.12): ”Om nödvändigt ska tryckbärande anordningar vara konstruerade och, i förekommande fall, vara utrustade med lämpliga tillbehör eller förberedas för att utrustas med sådana för att uppfylla kraven på skadebegränsning vid extern brand, i synnerhet med beaktande av anordningens avsedda användning”. Bilaga G i SS-EN17533: 2020 ställer inga krav på hur snabbt tanken töms, men ställer krav på att undvika en ruptur.

Enligt den icke-harmoniserade europeiska standarden SS-EN 17533: 2020 (12) krävs att en riskanalys tar upp behovet av tryckavlastningsventil (PRD) och/eller extern brandtest för alla cylindertyper.

Ett utsläpp från en TPRD ska ske på säker plats utomhus, det vill säga där det inte är risk för antändning (säkerställs av SRV 2004:7 ATEX). Det finns dock ändå alltid en risk för antändning när det gäller vätgas, eftersom det kan antända i det fria, till exempel på grund av väderfenomen (51). Ett större utsläpp i det fria kan resultera i ett vätgasmoln som om det antänder kan explodera, vilket exempelvis skedde i Stockholm 3 mars 1983 med stora skador som följd (52) (53). Därmed begränsas risken vid ventilering bäst genom att förebygga att större mängder vätgas släpps ut under kort tid (och antänds).

En snabb tömning riskerar också att skada innerbehållaren, även om detta bör vara ett mindre problem i händelse av brand i relation till de risker en brand medför. Utsatta behållare ska bedömas enligt föreskrifter (typiskt AFS 2017:3). Detta betyder att komposit-behållare där en smältsäkring löst kommer kasseras eftersom de varit utsatta för värme som gjort att smältsäkringen värmts upp till över 120 °C (minst en minut med direkt exponering för flammor).

Vägfordonsbestämmelser, till exempel UN ECE R134, som handlar om brandtestning av kompositbehållare, är baserade på en filosofi om att förhindra ruptur vid brand, eftersom denna risk anses vara mest betydande. Brandexponering anses avsluta tankens livslängd. I UN ECE R134 ”Bonfire” provning utsätts tanken för en lokal brand under 10 min och sedan en omslutande 1.65 m lång brand. Behållaren ska klara brandprovet utan ruptur. Diskussioner har ägt rum kring att begränsa utflödet från en TPRD för att begränsa den potentiella brandbelastningen och explosionsrisken från den ventilerade gasen, men risken måste vägas mot risken för ruptur, vilket beror på tankens konstruktion, storlek och brandens intensitet.

4.9 Hur mycket mekanisk påverkan klarar en komposit-behållare utan att ett större läckage riskerar att uppstå (ex. påkörning, bärverkskollaps, fallande föremål)?

Det är väldigt svårt att ge ett entydigt svar. Då frågan specificeras för ett “större läckage” så är det mer troligt att behållaren inte läcker alls eller så brister den helt och evakuerar all gas. Ett mindre läckage skulle kunna bli aktuellt då en anslutning eller rörkoppling påverkas eller belastas men det är då inte knutet till just en kompositbehållare.

Eftersom kompositkärl är vanligare på vägfordon finns det där exempel från olyckor som kan vara vägledande för att förutse ett relevant händelseförlopp. På fordonssidan förekommer i huvudsak komposittankar på grund av den lägre vikten och de regleras av flera regelverk som är väldigt lika i sin kravställning. Representativa regelverk är för CNG tankar R110 och för vätgastankar R134. Det innebär att i princip alla fordonstankar uppfyller samma minimikrav som i första hand tittar på de skador som kan komma från hanteringen vid tillverkning. I dessa regelverk ingår typiskt fallprov från 1,8 meters höjd för flera olika vinklar samt att kontrollerat “repa” ytan på tanken för att ge den en partiell skada som i en serie efterkommande prov inte ska äventyra tankens säkerhet. De efterkommande proven utgörs bland annat av långtidstrycksättning och tryckcykling vid höga och låga temperaturer. Det förekommer även krockprov på fordonet men då ingår tanken bara som komponent i delprovet och utsätts för ett sekundärvåld som är svårt att översätta till en yttre belastning. Efter att dessa prov genomförts tillåts enligt vissa standarder ett visst läckage till omgivningen, se till exempel GTR 13, avsnitt 5.2.2.1.

Det är viktigt att påpeka att en lastbärande struktur i komposit beter sig helt annorlunda än motsvarande struktur i metall. Metallen klarar av en plastisk deformation med bibehållen hållfasthet medan en kompositkonstruktion som deformerats för mycket i allt väsentligt tappar den lastbärande förmågan. Det innebär att en behållare i komposit som skadas kommer att följa något av följande scenarier:

- Hållfastheten med hänsyn till skadan > Belastningen (avgörs i huvudsak av det inre trycket) - Inget utfall.
- Hållfastheten med hänsyn till skadan < Belastningen - Vi får ett omedelbart brott.

- Skadan är inte tillräcklig för omedelbart haveri men vid tryckökning blir hållfastheten med hänsyn till skadan < Belastningen och ett haveri uppstår. Se till exempel det haveri som inträffade vid tankning av en CNG-lastbil i Helsingborg 2017 (54).
- Skadan är inte tillräcklig för omedelbart brott men gör att andra degraderande mekanismer kan komma i spel, brand, fukt, påfrysning, kemisk påverkan, nötning solljus mm.
- Skadan är inte tillräcklig för brott vid normal användning men har minskat hållfastheten och därmed motståndskraften vid ytterligare mekaniska påkänningar.

Normalt ska dessa behållare designas enligt LBB (Leak Before Break) men det har visat sig i flera fall, inte minst i fordonsapplikationer, att det i praktiken är omöjligt att uppnå fullt ut med tanke på variationen av skador som behållaren kan utsättas för.

Sammantaget kan konstateras att ett tryckärl i metall kan utsättas för en större deformation än ett motsvarande kärl i komposit.

Det kan också nämnas att det på grund av kompositens egenskap att inte plasticera är svårt att avgöra om en behållare har varit utsatt för våld eller ej och därför är det i praktiken extremt svårt att bedöma om säkerheten påverkats. Skadorna behöver heller inte nödvändigtvis vara tydligt framträdande på ytan.

Vid beaktande av hur skadliga andra miljöfaktorer kan vara för kompositbehållare finns exempel i litteraturen. Exempel på dessa faktorer är typiskt fukt, temperatur, påfrysning och solljus. Dessa påverkansfaktorers eventuella inverkan på säkerheten hanteras i AFS 2016:1 genom funktionskraven:

- I Bilaga 1, 2 Konstruktion. I texten formulerar man sig enligt *”beakta alla relevanta faktorer som behövs för att garantera att anordningen är säker under hela den avsedda livslängden”.*
- I Bilaga 1, 4.1 c) står det att materialen *”får inte vara påtagligt känsliga för åldring”.*

Då inverkan av solstrålning är av intresse, redovisas nedan relevant information. Generellt gäller att för en konstruktion i glas- och kolfiberkomposit så är fibern inte känsligt för UV-strålning medan epoxyn kan vara det. Ju tjockare materialet är desto mindre känsligt är konstruktionen då mängden inträngande ljus snabbt minskar. Studier visar att det räcker med några enstaka lager väv för att effekten ska anses bli försumbar (55). Till exempel SS-EN 17533: 2020 (12) 8.1.6 § & A.19 § ställer krav på beständighet mot UV-strålning för material på utsidan av behållaren inklusive kompositmaterial om ingen extra ytbeläggning tillhandahålls. Kraven är dock inte ett direkt test av påverkan av UV på behållarens strukturella integritet. 6.2 § föreslår att vissa tankar med kompositmaterial kan behöva skydd genom installationen. UN ECE R146 (56) som anpassar vägfordonskraven i UN ECE R134 för motorcyklar, kräver i 7.2.2.3 § att ”*The container shall not be exposed to direct sunlight.*”

För alla kompositkärl gäller att strukturen behöver vara tät mot inträngande fukt. Finns porer och delamineringar finns en risk att inträngande vatten som fryser och expanderar succesivt kan spräcka och skada den lastbärande strukturen. Det finns även en studie som föreslår att exponering för kondens har mer påverkan än vad UV-exponering har (57), en annan studie föreslår att ingen signifikant påverkan av de mekaniska egenskaperna hos en kolfiberkomposit har observerats vid exponering för temperatur, fukt och UV-strålning (58). Dock ser man i

studien en påverkan på de mekaniska egenskaperna för materialet vid belastningsprov efter åldring med avseende på bland annat massförlust, förlust av material, exponering av fibrer och sprickdensitet.

5. KARTLÄGGNING AV AGGREGAT

Enligt AFS 2016:1 definieras aggregat som flera tryckbärande anordningar som satts samman av en tillverkare för att bilda en integrerad och funktionell enhet.

5.1 Vilka krav finns på CE-märkning av de färdiga aggregaten, dvs behållare sammankopplade med upp- och nedströmsutrustning samt för varje delkomponent?

En viktig aspekt är vilka krav på märkning som ställs på de färdiga aggregaten, det vill säga behållare sammankopplade med utrustning upp- och nerströms samt för varje delkomponent. Detta regleras i AFS 2016:1 34§.

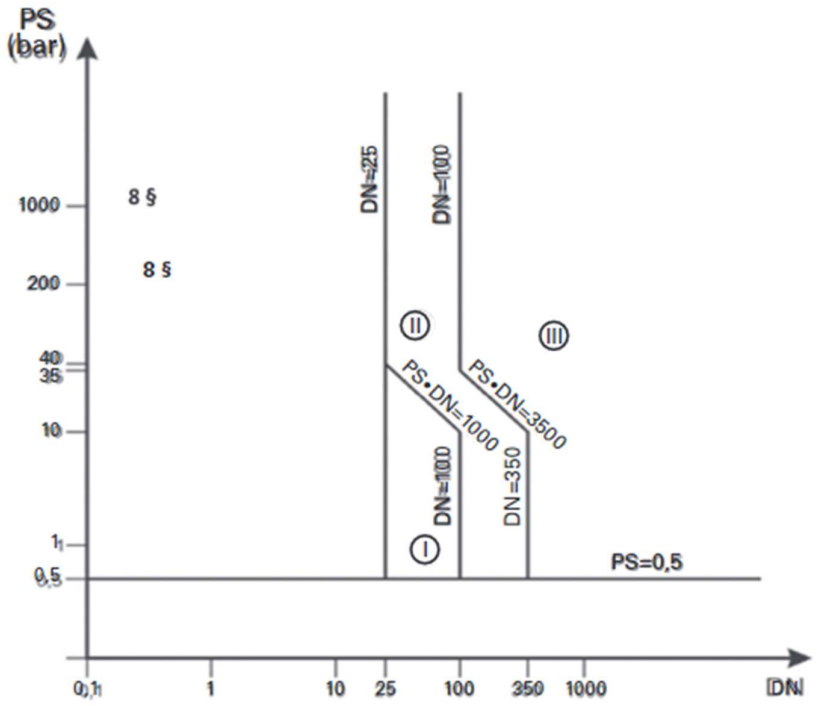
I grunden har tillverkaren för varje delkomponent ansvar för att kraven på CE-märkning uppfylls. På motsvarande sätt har därefter importören och därefter distributören ansvaret för att de säkerställer att kraven på att närmast föregående "i ledet" har fullföljt sina åtaganden på dokumentation. I de fall importören eller distributören ändrar eller bygger samman ett aggregat har de samma ansvar som tillverkaren för att det sammanbyggda systemet i sin helhet uppfyller kraven på CE-märkning (även om systemet skulle innehålla från början icke CE-märkta komponenter). Detta tillverkningsansvar gäller också om importören eller distributören släpper ut aggregaten på marknaden i eget namn eller under eget varumärke. Anbringandet av själva CE-märkningen regleras i 37§.

Undantag från bestämmelserna ovan beskrivs i 40§ och är aktuella i de fall en brukare har ett eget kontrollorgan, till exempel en industri som driver egna vindkraftsparker. I dessa fall får inte aggregatet vara försett med en CE-märkning och får bara användas i anläggningar som drivs av den grupp som brukarens kontrollorgan tillhör.

5.2 En TPED-godkänd behållare kan användas stationärt men då gäller utöver TPED även AFS2016:1 (PED). Om sammankopplingen sker med ledning <DN25, hur ska aggregatet då tryckhållfasthetsprovas enligt PED? Hur sker detta i praktiken?

En rörledning med en diameter mindre än DN25 hanteras enligt AFS 2016:1, 8 §, se Figur 6. Det innebär att den ska utföras enligt god teknisk praxis för att kunna användas på ett säkert sätt. Som ett sista tillverkningssteg ska även en slutkontroll göras enligt AFS 2016:1, Bilaga 1, 3.2. Innan anläggningen ska tas i bruk ska dessutom en första kontroll utföras om anläggningen faller under kategori A eller B i enlighet med AFS 2017:3, 3§. Denna kontroll ska normalt göras av ett kontrollorgan av typ A i så kallade tredjepartsställning. Om olika anordningar sammanfogas ska en bedömning göras av åtgärden enligt 20-22§. Det innebär att det ställs krav på dokumentation kring bland annat riskbedömningar och beräkningar som visar att utrustningen uppfyller kraven. Även om sammanfogningen ensam faller under 8§ är det hela anläggningen som ska bedömas.

Ett praktiskt sätt för att förenkla provtryckning av rörledningar i en anläggning skulle kunna vara att redan i designstadiet förbereda systemet genom sektionering av de trycksatta delarna med ventiler. Ett sådant system skulle därigenom möjliggöra partiell provtryckning.



Figur 6: AFS 2016:1, Diagram 6.

6. SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER

- Vätgas har använts under lång tid inom industrin med relativt god säkerhet och begränsade skador. Som regel är det mer effektivt att begränsa sannolikheten (preventivt brandförebyggande arbete) för skada än att begränsa skadorna (vid till exempel en brand). Dagens regelverk är till stor del, och bör så vara, funktionsbaserade så att skyddet fyller ett behov i proportion till risken (sannolikheten och konsekvensen).
- Behållare i stål respektive komposit leder värme olika och beter sig annorlunda vid en extern brand. Stål behåller sin lastbärande funktion vid högre temperaturer än komposit. Samtidigt leder stål värme så att behållaren och gasen snabbare värms upp med en tryckökning som följd vid en extern brand. Detta gör att:
    - Om ingen PRD finns kommer ståltanken att brista vid högre tryck än komposittanken.
    - En smältsäkring (TPRD) är mindre effektiv för en kompositbehållare än för en stålbehållare. Smältsäkringen kommer dock vara effektiv i båda fallen så länge den värms upp direkt av branden, men för en ståltank leds värme också via stålet och den varmare gasen.

  - En PRD som aktiverar på tryck är mycket mindre effektiv för en kompostbehållare än för en stålbehållare eftersom tryckökningen för kompositbehållaren blir marginell.
  - Leak-before-burst (LBB) är ett robust koncept för skydd mot ruptur av komposittankar i händelse av extern brand som inte beror på någon extern säkerhetsutrustning.
- Nu när vätgas börjar användas eller hanteras av gemene man kan mer strikta och robusta regler vara motiverade.
- Den icke-harmoniserade standarden SS-EN 17533: 2020 (11) borde göras till en harmoniserad standard.
- Det finns ett glapp som uppstår när man tillämpar PED på tryckkärl i komposit. För metallkärl finns krav på material och spårbarhet. Vid tillverkning av ett kompositmaterial kommer materialegenskaperna att vara beroende av utförandet som till exempel, blandningsförhållande av epoxy och härdtemperatur. Det är därför svårt att kvalitetssäkra konstruktionen enbart med utgångspunkt från PED. Riktlinjerna där är inte anpassade för komposit. Det blir därför i någon mån upp till den enskilde tillverkaren att hitta en metod som säkerställer materialkvalitén. I andra krav/standarder som till exempel R134 från fordonssidan så hanterar man det med batchtestning på några individer per 200 tillverkade. I det fallet blir det ett kvalificerande komponenttest snarare än ett materialtest. Med utgångspunkt från detta resonemang så borde vidare studier klargöra hur en lämplig provmetod för att kvalitetssäkra materialet skulle kunna utformas.

7. REFERENSER

1. Europeiska unionen. Typer av rättsakter. [Online] [Citat: den 14 Feb 2023.] https://european-union.europa.eu/institutions-law-budget/law/types-legislation_sv.

2. Europeiska kommission. Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs. [Online] [Citat: den 14 Feb 2023.] https://single-market-economy.ec.europa.eu/single-market/european-standards/harmonised-standards_sv?etrans=sv.

3. Europaparlamentet. Direktiv 2014/68/EU, Europaparlamentets och rådets direktiv 2014/68/EU av den 15 maj 2014 om harmonisering av medlemsstaternas lagstiftning om tillhandahållande på marknaden av tryckbärande anordningar. [Online] [Citat: den 14 Feb 2023.] https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SV/TXT/PDF/?uri=CELEX:02014L0068-20140717&from=EN.

4. Europaparlamentet. Direktiv 2010/35/EU: Directive 2010/35/EU of the European Parliament and of the Council of 16 June 2010 on transportable pressure equipment and repealing Council Directives 76/767/EEC, 84/525/EEC, 84/526/EEC, 84/527/EEC and 1999/36/EC. [Online] [Citat: den 14 Feb 2023.] https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SV/TXT/PDF/?uri=CELEX:32010L0035&from=en.

5. Europeiska kommission. Guidelines related to the Pressure Equipment Directive 2014/68/EU (PED). [Online] [Citat: den 14 Feb 2023.] https://ec.europa.eu/docsroom/documents/41641/attachments/1/translations/en/renditions/native.

6. Europeiska unionen. National transposition measures communicated by the Member States concerning:. [Online] [Citat: den 14 Feb 2023.] https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/NIM/?uri=CELEX:32014L0068.

7. Arbetsmiljöverket. AFS 2016:1 Tryckbärande anordningar. [Online] [Citat: den 14 Feb 2023.] https://www.av.se/globalassets/filer/publikationer/foreskrifter/tryckbarande-anordningar-foreskrifter-afs2016-1.pdf.

8. Europeiska kommission. Harmonised Standards > Pressure equipment Directive 2014/68/EU. [Online] [Citat: den 14 Feb 2023.] https://single-market-economy.ec.europa.eu/single-market/european-standards/harmonised-standards/pressure-equipment_en.

9. Europaparlamentet. Summary of references of harmonised standards published in the Official Journal – Directive 2014/68/EU 1 of the European Parliament and of the Council of 15 May 2014 on the harmonisation of the. [Online] [Citat: den 14 Feb 2023.] https://ec.europa.eu/docsroom/documents/51457/attachments/1/translations/en/renditions/native.

10. Europeiska kommission. Sammanfattning av hänvisningar till harmoniserade standarder som offentliggjorts i Europeiska unionens officiella tidning – [Hänvisning till och titel på akten] (sista siden). [Online] [Citat: den 14 Feb 2023.] https://ec.europa.eu/docsroom/documents/38169/attachments/2/translations/en/renditions/native.

11. SIS. SVENSK STANDARD · SS-EN 13445-1:2021: Tryckkärl (ej eldberörda) - Del 1: Allmänt. [Online] [Citat: den 14 Feb 2023.] https://www.sis.se/produkter/fluidsystem-och-delar/enheter-for-vatskelagring/tryckkarlej-eldberorda-ssen-13445/ss-en-13445-12021/.

12. SIS. SVENSK STANDARD · SS-EN 17533:2020: Vätgas - Gasflaskor och storflaskor för stationär lagring. [Online] 2020. [Citat: den 31 Jan 2023.] https://www.sis.se/produkter/kemiteknik-3b58b2e7/produkter-fran-kemisk-industri/gaser-for-industriellt-bruk/ss-en-175332020/. SS-EN 17533:2020.

13. *FRENCH GUIDE TO CONFORMITY ASSESSMENT AND CERTIFICATION OF HYDROGEN SYSTEMS.* Debray, B., et al. u.o. : HySafe/ Int. Conf. on Hydrogen Safety, 2021. https://hysafe.info/uploads/papers/2021/171.pdf.

14. Personal Communication - P.Carpentier (projektledare SIS TK 296). 16 Dec 2023.

15. ISO. ISO/FDIS 19884 Gaseous hydrogen — Cylinders and tubes for stationary storage (deleted). [Online] [Citat: den 14 Feb 2023.] https://www.iso.org/standard/65487.html.

16. ISO. ISO/CD 19884-1 Gaseous hydrogen — Cylinders and tubes for stationary storage — Part 1: General Requirements (under development). [Online] [Citat: den 14 Feb 2023.] https://www.iso.org/standard/80587.html.

17. MSB. MSBFS 2011:3 Myndigheten för samhällsskydd och beredskaps föreskrifter om transportabla tryckbärande anordningar. [Online] den 23 Feb 2023. https://www.msb.se/siteassets/dokument/regler/rs/1c145d03-2aff-448d-a48d-8714761707c9.pdf.

18. Arbetsmiljöverket. AFS 2017:3 Användning och kontroll av trycksatta anordningar. [Online] [Citat: den 14 Feb 2023.] https://www.av.se/globalassets/filer/publikationer/foreskrifter/anvandning-och-kontroll-av-trycksatta-anordningar-afs2017-3.pdf.

19. MSB. MSBFS 2013:3 Myndigheten för samhällsskydd och beredskaps föreskrifter om tillstånd till hantering av brandfarliga gaser och vätskor. [Online] [Citat: den 14 Feb 2023.] https://www.msb.se/siteassets/dokument/regler/rs/61531c7c-d2a9-4585-8cc8-b7bbb87184aa.pdf.

20. MSB. MSBFS 2020:1 föreskrifter om hantering av brandfarlig gas och brandfarliga aerosoler. [Online] [Citat: den 14 Feb 2023.] https://www.msb.se/siteassets/dokument/regler/forfattningar/msbfs-2020-1.pdf.

21. MSB. Gällande regler inom Allvarliga kemikalieolyckor (Seveso). [Online] [Citat: den 14 Feb 2023.] https://www.msb.se/sv/regler/gallande-regler/allvarliga-kemikalieolyckor-seveso/.

22. *Hydrogen storage: Recent improvements and industrial perspectives.* Barthelemy, H., et al. 11, u.o. : Int. Jour. Hydrogen Energy, 2017, Vol. 42. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319916305559.

23. SIS. SVENSK STANDARD · SS-EN 12245:2022 Gasflaskor - Hellindade gasflaskor av kompositmaterial. [Online] [Citat: den 16 Feb 2023.] https://www.sis.se/produkter/fluidsystem-och-delar/enheter-for-vatskelagring/tryckkarl/ss-en-122452022/.

24. SIS. SWEDISH STANDARD · SS-EN ISO 11114-5:2022 Gas cylinders - Compatibility of cylinder and valve materials with gas contents - Part 5: Test methods for evaluating plastic liners (ISO 11114-5:2022). [Online] [Citat: den 16 Feb 2023.] https://www.sis.se/en/produkter/fluid-systems-and-components-for-general-use/fluid-storage-devices/pressure-vessels/ss-en-iso-11114-52022/.

25. SIS. SVENSK STANDARD · SS-ISO 11119-3:2020 Gasflaskor - Konstruktion, tillverkning och provning för återfyllningsbara flaskor och storflaskor av kompositmaterial - Del 3: Hellindade fiberförstärkta flaskor och storflaskor av kompositmaterial med metallisk och . [Online] [Citat: den 16 Feb 2023.] https://www.sis.se/produkter/fluidsystem-och-delar/enheter-for-vatskelagring/gasflaskor/ss-iso-11119-32020/.

26. SIS. SVENSK STANDARD · SS-ISO 11515:2022 Gasflaskor - Återfyllningsbara förstärkta storflaskor av kompositmaterial med vattenkapacitet från 450 l till och med 3000 l - Beräkning, konstruktion och provning (ISO 11515:2022, IDT). [Online] [Citat: den 14 Feb 2023.] https://www.sis.se/produkter/fluidsystem-och-delar/enheter-for-vatskelagring/tryckkarl/ss-iso-115152022/.

27. UN ECE. UN Model Regulations Rev. 22 (2021) [on the Transport of Dangerous Goods]. [Online] [Citat: den 14 Feb 2023.] https://unece.org/transport/dangerous-goods/un-model-regulations-rev-22.

28. UNECE. UN ECE Regulation No. 134. [Online] [Citat: den 14 Feb 2023.] https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2015/R134e.pdf.

29. UN ECE. Addenda to the 1958 Agreement (Regulations 121-140) > "134 - Hydrogen and fuel cell vehicles (HFCV)". [Online] [Citat: den 14 Feb 2023.] https://unece.org/transport/vehicle-regulations-wp29/standards/addenda-1958-agreement-regulations-121-140.

30. UN ECE. Global technical regulation No. 13: Global technical regulation on hydrogen and fuel cell vehicles. [Online] [Citat: den 14 Feb 2023.] https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29gen/wp29registry/ECE-TRANS-180a13e.pdf.

31. SAE. SAE J2579_201806 Standard for Fuel Systems in Fuel Cell and Other Hydrogen Vehicles . [Online] [Citat: den 14 Feb 2023.] https://www.sae.org/standards/content/j2579_201806/.

32. European Parliament. REGULATION (EC) No 79/2009 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 14 January 2009 on type-approval of hydrogen-powered motor vehicles, and amending Directive 2007/46/EC. [Online] [Citat: den 14 Feb 2023.] https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:035:0032:0046:en:PDF.

33. ISO. ISO 19881:2018 . *Gaseous hydrogen — Land vehicle fuel containers.* [Online] [Citat: den 14 Feb 2023.] https://www.iso.org/standard/65029.html.

34. CSA. CSA/ANSI HGV 2:21 Compressed hydrogen gas vehicle fuel containers. [Online] [Citat: den 14 Feb 2023.] https://www.csagroup.org/store/product/2428597/.

35. European Parliament. Directive 2014/34/EU of the European Parliament and of the Council of 26 February 2014 on the harmonisation of the laws of the Member States relating to

equipment and protective systems intended for use in potentially explosive atmospheres. [Online] [Citat: den 14 Feb 2023.] https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32014L0034.

36. SWEDAC. Anmälda organ. [Online] [Citat: den 14 Feb 2023.] https://www.swedac.se/amnesomraden/anmalda-organ/.

37. European Commission. Notified Bodies Nando. [Online] [Citat: den 14 Feb 2023.] https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/nando/index.cfm?fuseaction=directive.notifiedbody&sort=number&dir_id=153841.

38. Europeiska kommission. NANDO - Glossary of terms and abbreviations . [Online] [Citat: den 14 Feb 2023.] https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/nando/index.cfm?fuseaction=glossary.main.

39. Europeiska kommission. LIST OF BODIES NOTIFIED UNDER DIRECTIVE : 2014/68/EU Pressure equipment. [Online] [Citat: den 14 Feb 2023.] https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/nando/index.cfm?fuseaction=directive.pdf&refe_cd=2014%2F68%2FEU&requesttimeout=900.

40. Marknadskontrollrådet. Myndigheternas ansvarsområden. [Online] [Citat: den 14 Feb 2023.] https://marknadskontroll.se/for-myndigheter/marknadskontrollen-i-sverige/myndigheternas-ansvarsomraden/.

41. SWEDAC. SWEDAC DOC 11:3 - EA-2/17- EA vägledning om de övergripande kraven för ackreditering av organ för bedömning av överensstämmelse i anmälningssyfte. [Online] [Citat: den 14 Feb 2023.] https://www.swedac.se/dokument/ea-2-17-ea-vagledning-om-de-overgripande-kraven-for-ackreditering-av-organ-for-bedomning-av-overensstammelse-i-anmalningssyfte/.

42. Föreståndare för brandfarlig gas. [Online] 2018. [Citat: den 31 Jan 2023.] https://www.energigas.se/library/2185/foerestaandaranvisning-2018.pdf.

43. [Online] https://search.swedac.se/sv/ackrediteringar.

44. SIS. SVENSK STANDARD · SS-EN 13445-2:2021 Tryckkärl (ej eldberörda) - Del 2: Material. [Online] [Citat: den 14 Feb 2023.] https://www.sis.se/produkter/fluidsystem-och-delar/enheter-for-vatskelagring/tryckkarl/ss-en-13445-220212/.

45. SIS. SVENSK STANDARD · SS-EN 13923:2005 Tryckkärl av fiberlindad glasfiberarmerad plast - Material, konstruktion, tillverkning och kontroll. [Online] [Citat: den 14 Feb 2023.] https://www.sis.se/produkter/fluidsystem-och-delar/enheter-for-vatskelagring/tryckkarl/ssen139232005/.

46. HyTunnel-CS. *Deliverable 1.2 Report on hydrogen hazards and risks in tunnels and similar confined spaces.* u.o. : Pre-normative research for safety of hydrogen driven vehicles and transport through tunnels and similar confined spaces, 2019.

47. Europeiska unionen. Europeiska unionens officiella tidning. [Online] [Citat: den 28 03 23.] https://eur-lex.europa.eu/oj/direct-access.html?locale=sv.

48. *Fire Properties of Polymer Composite Materials.* Mouritz, A.P. och gibson, A.G. Dordrecht, The Netherlands : Springer, 2006.

49. *The residual strength of automotive CFRP composite cylinders after fire.* Tamura, Yohsuke, Yamazaki, Koji och Maeda, Kiyotaka . Borås, Sweden : 5th International Conference on Fires in Vehicles – FIVE 2018, 2018.

50. *BREND 2.0 - Fighting fires in new energy carriers on deck 2.0. Gehandler, Jonatan, Olofsson, Anna och Hynynen, Jonna.* Borås : RISE, 2022.

51. *Spontaneous ignition of hydrogen leaks: A review of postulated mechanisms.* Astbury, G.R. and S.J. Hawksworth. 13, u.o. : International Journal of Hydrogen Energy, 2007, Vol. 32. p. 2178-2185.

52. *Source, dispersion and combustion modelling of an accidental release of hydrogen in an urban environment.* Venetsanos, A. G., o.a. 1–3, u.o. : Journal of Hazardous Materials, 2003, Vol. 105.

53. Kommittén för undersökning av allvarliga olyckshandelser. *Gasexplosionen på Brahegatan i Stockholm den 3 mars 1983: Utredningsrapport Nr 2:1984.* u.o. : Kommittén (Kn 1981:02) för undersökning av allvarliga olyckshandelser, 1984.

54. *Räddningsinsatser vid olyckor med gasfordon En omvärldsanalys av metodik och olyckor 2016-2019.* u.o. : MSB, 2020. ISBN 978-91-7927-020-9.

55. *Degradation of glass fibre/polyester composites after ultraviolet radiation.* Hu, H. 7, u.o. : Materials & Design, 2008, Vol. 29. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306907001951.

56. UNECE. UN Regulation No. 146 Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles and their components with regard to the safety-related performance of hydrogen fuelled vehicles of categories L1, L2, L3, L4 and L5. [Online] [Citat: den 14 Feb 2023.] https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2018/R146e.pdf.

57. *Degradation of Carbon Fiber-reinforced Epoxy Composites by Ultraviolet Radiation and Condensatio.* Kumar, B.G., et al. 24, u.o. : Jour. Composite Materials, 2002, Vol. 36. https://scubaengineer.com/documents/j_composite_materials2002v36p2713.pdf.

58. *Accelerated aging effects on carbon fiber/epoxy composites.* Barbosa, A.P.C., et al. u.o. : Composites Part B: Engineering, 2017, Vol. 110. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836816313579.

59. *CNG vehicle containers exposed to local fires.* Gehandler, Jonatan och Lönnermark, Anders. Borås : RISE, 2019.

60. *Tactical depressurization of hydrogen containers with civilian rifle and ammunition.* Gehandler, J., o.a. Oslo : 10th International Seminar on Fire and Explosion Hazards 22 -27 May, 2022.