

Paineastioiden, säiliöiden ja niiden varusteiden materiaalien murtuminen alhaisissa lämpötiloissa

Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 2021:3

Paineastioiden, säiliöiden ja niiden varusteiden materiaalien murtuminen alhaisissa lämpötiloissa

Kim Wallin

Liikenne- ja viestintäministeriö Helsinki 2021

Julkaisujen jakelu

Distribution av publikationer

**Valtioneuvoston
julkaisuarkisto Valto**

Publikations-
arkivet Valto

julkaisut.valtioneuvosto.fi

Julkaisumyynti

Beställningar av publikationer

**Valtioneuvoston
verkkokirjakauppa**

Statsrådets
nätbokhandel

vnjulkaisumyynti.fi

Liikenne- ja viestintäministeriö

© 2021 tekijät ja liikenne- ja viestintäministeriö

ISBN pdf: 978-952-243-583-5

ISSN pdf: 1795-4045

Taitto: Valtioneuvoston hallintoyksikkö, Julkaisutuotanto

Helsinki 2021

Paineastioiden, säiliöiden ja niiden varusteiden materiaalien murtuminen alhaisissa lämpötiloissa

Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 2021:3

Julkaisija Liikenne- ja viestintäministeriö

Tekijä/t Kim Wallin

Kieli suomi

Sivumäärä 26

Tiivistelmä Kansainvälisissä vaarallisten aineiden kuljetuksesta tiellä annetuissa määräyksissä (ADR-määräykset) ja vaarallisten aineiden kuljetuksesta rautatiellä annetuissa määräyksissä (RID-määräykset) määrätään, että paineastioiden ja säiliöiden sekä niiden varusteet on suunniteltava, valmistettava, testattava ja varustettava niin, että ne kestävät kaikki tavanomaisissa kuljetus- ja käyttöolosuhteissa esiintyvät rasitukset.

Tässä selvityksessä:

- päivitettiin paineastioiden ja säiliöiden riskejä ja vaaratekijöitä, joihin vaikuttaa alhainen lämpötila.
- selvitettiin, sisältävätkö ADR- ja RID-viitestandardit ja niissä viitatu standardit -40°C kestävyysvaatimuksen sekä mahdollistavatko standardit säiliö- ja paineestiamateriaaleja, jotka eivät kestäisi alhaisia lämpötiloja, kuten -40°C .
- selvitettiin mahdollisuutta kumota osittain tai kokonaan paineastioiden, kuten kaasustioiden, ja/tai säiliöiden -40°C vaatimus ilman, että turvallisuus heikkenee aiheuttaen riskiä, ja tarvitaanko ehtoja, joiden avulla varmistetaan ja taataan kaasustioiden ja/tai säiliöiden kuljetusturvallisuudesta myös alhaisessa lämpötilassa, kuten -40°C .
- kartoitettiin mahdollisia onnettomuuksia liittyen rakennemateriaalien heikentymiseen alhaisten lämpötilojen vuoksi.

Johtopäätös on, että -40°C kestävyysvaatimusehtoja tarvitaan edelleen tiettyjen paineastioiden ja säiliöiden tapauksessa.

Asiasanat kuljetus, vaaralliset aineet, ADR, RID, haurasmurtuma, alhainen lämpötila

ISBN PDF 978-952-243-583-5

ISSN PDF 1795-4045

Asianumero VN/9534/2020

Hankenumero 4500T-1000022

Julkaisun osoite <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-243-583-5>

Brott på material från tryckkärl, tankar och deras tillbehör vid låga temperaturer

Kommunikationsministeriets publikationer 2021:3

Utgivare Kommunikationsministeriet

Författare Kim Wallin

Språk finska

Sidantal 26

Referat De internationella föreskrifterna för transport av farligt gods på väg (ADR) och föreskrifterna för transport av farligt gods med järnväg (RID) föreskriver att tryckkärl och tankar och deras tillbehör måste vara planerade, konstruerade, testade och utrustade för att klara alla normala transportförhållanden och belastningar under driftförhållanden.

I denna rapport:

- uppdaterades riskerna och farorna angående tryckkärl och tankar som påverkas av låga temperaturer.
- undersöktes om ADR- och RID-referensstandarderna och de standarder som nämns i dem omfattar hållbarhetskravet på
- -40°C och om standarderna tillåter tankar och tryckkärlsmaterial som inte tål låga temperaturer som -40°C.
- undersöktes möjligheten att helt eller delvis upphäva kravet på -40°C för tryckkärl, såsom gasflaskor, och / eller tankar utan att kompromissa med säkerheten och behovet av villkor för att säkerställa och garantera säkerheten vid transport av gasflaskor och / eller tankar även vid låga temperaturer, såsom -40°C
- identifierades möjliga olyckor relaterade till försämring av strukturmaterial på grund av låga temperaturer.

Slutsatsen är att hållbarhetskraven -40°C fortfarande behövs för vissa tryckkärl och tankar.

Nyckelord transport, farligt gods, ADR, RID, spröd brott, låg temperature

ISBN PDF 978-952-243-583-5

ISSN PDF 1795-4045

Ärendenr. VN/9534/2020

Projektnr. 4500T-1000022

URN-adress <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-243-583-5>

Fracture of materials for pressure vessels, tanks and their fittings at low temperatures

Publications of the Ministry of Transport and Communications 2021:3

Publisher Ministry of Transport and Communications

Authors Kim Wallin

Language Finnish **Pages** 26

Abstract The International Regulations for the Carriage of Dangerous Goods by Road (ADR) and the Regulations for the Transport of Dangerous Goods by Rail (RID) stipulate that pressure vessels and tanks and their fittings must be designed, constructed, tested and equipped to endure loads and stresses occurring under normal operating conditions.

This report has:

- updated the risks and hazards of pressure vessels and tanks affected by low temperatures.
- examined whether the ADR and RID reference standards and the standards referred to in them include a -40°C durability requirement and whether the standards allow for tank and pressure vessel materials that would not withstand low temperatures such as -40°C.
- examined the possibility of partially or completely repealing the -40°C requirement for pressure vessels, such as gas cylinders, and / or tanks without compromising safety and the need for conditions to ensure and guarantee the safety of transport of gas cylinders and / or tanks even at low temperatures, such as -40°C.
- identified possible accidents related to the deterioration of structural materials due to low temperatures.

The conclusion is that the -40°C durability requirements are still needed for certain pressure vessels and tanks.

Keywords carriage, dangerous goods, ADR, RID, brittle fracture, low temperature

ISBN PDF 978-952-243-583-5

ISSN PDF 1795-4045

Reference no. VN/9534/2020

Project no. 4500T-1000022

URN address <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-243-583-5>

Sisältö

1	Selvityksen tausta ja tavoitteet	8
2	Alhaisen lämpötilan aiheuttamat riski- ja vaaratekijät.....	10
3	ADR- ja RID-määräysten säiliöihin ja paineastioihin liittyvät viitestandardit	13
3.1	UN-paineastiat	13
3.2	Muut paineastiat.....	15
3.3	Säiliöt	17
4	Paineastioiden ja/tai säiliöiden kuljetusturvallisuus alhaisessa lämpötilassa.....	20
5	Rakennemateriaalien vaurioituminen alhaisten lämpötilojen vuoksi.....	22
6	Johtopäätökset	24
	Lähteet.....	26

LUKIJALLE

Liikenne- ja viestintäministeriö teetti vuonna 1997 selvityksen, joka käsitteli VAK-säiliöissä, irtotavarakonteissa ja kaasupulloissa käytettävien metallien haurasmurtumistai-pumusta ja muita riskitekijöitä alhaisessa lämpötilassa. Selvityksen mukaan hauras-murtumiselle alttiit materiaalit voivat aiheuttaa turvallisuusriskin Suomen kylmissä käyttölämpötiloissa, jos mitoitus on perustunut 20°C:n iskukoelämpötilaan selvityksen mukaisesti.

Uuden selvitystyön tarkoituksena oli selvittää, onko kansallinen pakkauksille, paineas-tioille ja säiliöille kohdistuva –40 °C kestävyysvaatimus edelleen syytä säilyttää vai oli-siko vaatimus mahdollisesti kumottavissa kokonaan tai osittain ilman, että turvallisuus heikkenee merkittävästi. Selvityksessä tarkasteltiin, onko selvityksen aihealueeseen liittyvillä kansainvälisillä vaarallisten aineiden kuljetuksesta tiellä ja vaarallisten ainei-den kuljetuksesta rautatiellä annettuja määräyksillä (vuoden 2019 versio) vaikutusta vuoden 1997 selvityksen johtopäätöksiin.

Selvitys tilattiin KW-solutions Oy:ltä ja tekijänä oli emeritusprofessori Kim Wallin. Sel-vitystä ovat lisäksi kommentoineet liikenne- ja viestintäministeriön, Liikenne- ja viestin-täviraston ja Turvallisuus- ja kemikaaliviraston edustajat.

5.2.2021

Mari Suominen

Neuvotteleva virkamies

1 Selvityksen tausta ja tavoitteet

Kansainvälisissä vaarallisten aineiden kuljetuksesta tiellä annetuissa määräyksissä (ADR-määräykset)¹ ja vaarallisten aineiden kuljetuksesta rautatiellä annetuissa määräyksissä (RID-määräykset)² määrätään, että paineastioiden ja säiliöiden sekä niiden varusteet on suunniteltava, valmistettava, testattava ja varustettava niin, että ne kestävät kaikki tavanomaisissa kuljetus- ja käyttöolosuhteissa esiintyvät rasitukset mukaan lukien materiaalin väsyminen.

Säiliöt on valmistettava sopivasta metallista ja ne on suunniteltava ja valmistettava ADR/RID-määräysten ja niihin kuuluvien viitestandardien mukaisesti. Säiliöissä on käytettävä määritellyt lämpötilat kestäviä materiaaleja ja seinämän paksuudet mitoitettava huomioiden säiliön korkeimmat ja alimmat täyttö- ja käyttölämpötilat. ADR- ja RID-määräysten vähimmäisvaatimusten tulee aina täyttyä. Paineestioille ja pakkauksille on vastaavasti vaatimuksensa materiaalien ja rakenteen osalta.

Liikenne- ja viestintäministeriö teetti vuonna 1997 selvityksen³, joka käsitteli VAK-säiliöissä, irtotavarakonteissa ja kaasupulloissa käytettävien metallien haurasmurtumistai- pumusta ja muita riskitekijöitä alhaisessa lämpötilassa. Selvityksessä kartoitettiin muun muassa:

1. mitkä käytössä olevat säiliörakenneaineet (säiliöajoneuvojen säiliöt, säiliökontit ja kaasupullot) ja millä levyepaksuuksilla ovat kylmässä alttiita haurasmurtamalle
2. muut alhaisen lämpötilan aiheuttamat riskitekijät, kuten esimerkiksi hitsausaumojen ja hitsialueen kestävyys.
3. minkä tyyppiset Euroopassa käytössä olevat vaarallisten aineiden kuljetuksiin hyväksytyt kuljetussäiliöt eivät ole turvallisia lämpötilavälillä -20°C – -40°C (katsaus yleisimpiin säiliötyyppeihin).

Selvityksessä kävi ilmi muun muassa se, että materiaalit, jotka ovat alttiita haurasmurtumiselle, voivat aiheuttaa turvallisuusriskin Suomen kylmimmässä käyttölämpötiloissa, jos mitoitus on perustunut -20°C:n Charpy-V iskukoelämpötilaan.

¹ Sopimus vaarallisten tavaroiden kansainvälisistä tiekuljetuksista (ADR) (SopS 23/1979).

² Kansainvälisiä rautatiekuljetuksia koskevan yleissopimuksen (COTIF) liitteen C määräykset (SopS 52/2006).

³ Kim Wallin, VAK säiliöissä käytettävien metallien haurasmurtumistai- pumus alhaisissa lämpötiloissa, Liikenneministeriön mietintöjä ja muistioita, B:40/97.

Vaarallisten aineiden kuljetuksesta (VAK) annettu laki ja sen nojalla annetut säännökset ja määräykset sisältävät kansallisen -40°C-lämpötilavaatimuksen muun muassa paineastioille, säiliöille ja joillekin pakkauksille. Paineastian ja säiliön materiaalien, mukaan lukien varusteiden, materiaalien on kestävä alhaisissa lämpötiloissa aina -40°C:n saakka. Tällaista vaatimusta ei ole ADR:ssä.

Nyt tehtävän selvityksen tavoitteena on:

1. päivittää ja tarvittaessa täydentää vuoden 1997 selvityksessä kartoitetuista ja käsitellyistä riskeistä ja vaaratekijöistä, joihin vaikuttaa alhainen lämpötila.
2. tutkia ADR- ja RID-määräysten säiliöihin ja paineastioihin liittyviä viitestandardeja ja edelleen viitestandardeissa viitattuja materiaali-, rakenne- ja valmistusstandardeja. Tarkoituksena on selvittää, sisältävätkö ADR- ja RID-viitestandardit ja niissä viitattut standardit -40°C kestävyysvaatimuksen sekä mahdollistavatko standardit säiliö- ja paineastiamateriaaleja, jotka eivät kestäisi alhaisia lämpötiloja, kuten -40°C. Lisäksi tulisi selvittää, onko standardeissa sallittu valmistustapoja, joiden tuloksena säiliö tai paineastia ei kestäisi alhaisia lämpötiloja.
3. selvittää, onko mahdollista kumota osittain tai kokonaan paineastioiden, kuten kaasuastioiden, ja/tai säiliöiden -40°C vaatimus ilman, että turvallisuus heikkenee aiheuttaen riskiä, ja tarvitaanko ehtoja, joiden avulla varmistetaan ja taataan kaasuastioiden ja/tai säiliöiden kuljetusturvallisuudesta myös alhaisessa lämpötilassa, kuten -40°C.
4. selvittää, onko aiheutunut onnettomuuksia liittyen rakennemateriaalien heikentymiseen alhaisten lämpötilojen vuoksi.

2 Alhaisen lämpötilan aiheuttamat riski- ja vaaratekijät

Aiemmassa vuoden 1997 selvityksessä todetaan⁴: ”Metallit voidaan periaatteessa jakaa kahteen eri ryhmään murtumiskäyttäytymisensä mukaan. Haurasmurtumalle alttiin ja ei alttiin. Haurasmurtumalle ja siten alhaisille lämpötiloille alttiita metalleja ovat pääsääntöisesti tilakeskisen kuutiollisen atomihilan omaavat metallit, kun taas pintakeskisen kuutiollisen atomihilan omaavat metallit eivät yleensä ole sitä”. Säiliöihin ja paineastioihin kyseeseen tulevista metalleista ainoastaan seostamattomat ja hienoraeteräkset, jotka ovat ferriittisiä rakenneteräksiä, saattavat siten olla alttiita haurasmurtumalle lämpötiloissa < +20°C. Nämä teräkset edustavat yleisiä rakenneteräksiä, joita käytetään valtaosissa teräsrakenteita.

Selvityksessä todetaan lisäksi⁵: ”Haurasmurtumatapahtuma voidaan jakaa kahteen eri vaiheeseen, ydintymiseen ja etenemiseen. Ydintyminen tarkoittaa haurasmurtumissärön muodostumista ehyeen aineeseen ja se kuvaa haurasmurtuman eräänlaista alkutilaa. Ydintymisen jälkeen haurasmurtuma voi edetä lähes äänen nopeudella, kuluttaen hyvin vähän energiaa. Eteneminen ei automaattisesti seuraa ydintymistä. Joissakin tapauksissa ydintyminen voi tapahtua jonkin paikallisen materiaalin epäpuhtauden tai vian takia, jolloin ympäröivän aineen ominaisuudet voivat estää murtuman etenemisen. Haurasmurtumisalttiutta voidaan mitata joko ydintymisen tai etenemisen suhteen, riippuen rakenteesta. Etenemisen suhteen mitoitetaan yleensä esim. maakaasu-putkistoja, jotka muuten voisivat aiheuttaa jopa satojen kilometrien pituisia murtumia. Yleisintä on kuitenkin arvioida haurasmurtumisalttiutta ydintymisen suhteen. Perusteluna on, että mikäli haurasmurtuman ydintyminen estyy, ei etenemistäkään voi tapahtua.

Haurasmurtuman ydintymistä edesauttavat seuraavat tekijät:

- korkea vetojännitys
- alhainen lämpötila
- suuri ainepaksuus
- kolmiaksaalinen jännitystila
- hauras materiaali
- jäännösjännitykset
- iskumainen kuormitus
- jännityskeskittymät ja mahdolliset tasomaiset alkuviat

^{4,5} Kim Wallin, VAK säiliöissä käytettävien metallien haurasmurtumistaipumus alhaisissa lämpötiloissa, Liikenneministeriön mietintöjä ja muistioita, B:40/97.

Terästen haurasmurtumisalttiutta kuvataan yksinkertaisimmin Charpy-V iskukokeella määritettävän transitiolämpötilan mukaan. Mitä alhaisempi transitiolämpötila, sitä vähemmän materiaali on altista haurasmurtumiselle. Rakenneterästen laatuluokat perustuvat nimenomaisesti tähän transitiolämpötilaan.” Transitiolämpötila vastaa kuitenkin vain yhtä kahdeksasta haurasmurtuman ydintymistä edesauttavaa tekijää (hauras materiaali).

Ylläolevan johdosta on erotettava toisistaan teräksen (materiaalin) ja rakenteen herkkyys haurasmurtumiselle. Ensimmäistä siis ilmaistaan teräksen kykynä täyttää jokin sitkeyttä mittaava suure, kuten Charpy-V energiavaatimus tietyssä lämpötilassa (transitiolämpötila). Eri teräslaaduille on esitetty erilaisia energiavaatimuksia riippuen teräksen lujuus- ja laatuluokasta. Rakenteen herkkyydestä haurasmurtumiselle saadaan rakenteen suunnittelulämpötila ja se voi poiketa huomattavasti Charpy-V pohjaisesta teräksen transitiolämpötilasta. Suunnittelulämpötila on yleensä sama kuin rakenteen alin käyttölämpötila.

Vuoden 1997 selvityksessä⁶ arvioitiin terästen vaadittavaa transitiolämpötilaa, kun suunnittelulämpötilana pidettiin Suomen olosuhteisiin sopivaa lämpötilaa -40°C. Analyseissä käytettiin Valton teknillinen tutkimuskeskuksella (VTT, nykyään Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy) aiemmin kehitettyä haurasmurtumisen arviointimenetelmää, jonka pohjalta on myös kehitetty nykyään voimassa oleva Eurocode 3 normistossa⁷ oleva haurasmurtumisanalyysi. Se ottaa huomioon kaikki kahdeksan haurasmurtuman ydintymistä edesauttavaa tekijää.

Vuoden 1997 jälkeen ei materiaalien testausmenetelmissä ole tapahtunut muutoksia. Tämä koskee ennen kaikkea Charpy-V iskukoetta, jolla materiaalien haurasmurtumisalttiutta arvioidaan. Voidaan todeta, että vuoden 1997 selvitys ja siinä esitetyt analyysit ovat edelleen relevantteja eikä uusia riskitekijöitä ole ilmennyt. Hitsauksesta johtuvat mahdolliset teräksen myötövanhenemisvaikutukset huomioidaan jo Charpy-V iskukokeissa, koska ne vaikuttavat materiaalin haurauteen. Selvityksen laskentamallin tulokset voidaan esittää kahdessa, ferriittiselle teräkselle kehitetyssä, taulukossa⁸. Taulukko 1 perustuu ADR iskusitkeysvaatimukseen -20°C ja taulukko 2 iskusitkeysvaatimukseen -40°C. Taulukoissa R_eL on materiaalin myötölujuus. Taulukoista nähdään, että säiliöissä yleisimmin käytetyillä teräslaaduilla, ainevahvuuksilla ≤ 5 mm, riittää iskusitkeysriteerin lämpötila -20°C takaamaan haurasmurtumiskestävyys myös -40 °C

^{6,8} Kim Wallin, VAK säiliöissä käytettävien metallien haurasmurtumistaipumus alhaisissa lämpötiloissa, Liikenneministeriön mietintöjä ja muistioita, B:40/97.

⁷ EUROCODE 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-10: Materiaalin sitkeys ja kokonaispaksuuden ominaisuudet

lämpötilassa. Vain yli 460 MPa lujisille ferriittisille teräksille tarvitaan alempi iskutkeys-
lämpötila.

Austeniittisilla teräksillä, alumiiniseoksilla, titaaniseoksilla, komposiittimateriaaleilla
eikä yleensä lujitemuoveilla lämpötila vaikuta haurasmurtumisalttiuteen lämpötilavä-
lille +40°C – -40°C. Näiltä materiaaleilta voidaan siis poistaa -40°C vaatimus ilman
että se vaikuttaa niiden haurasmurtumisalttiuteen, vaikka ainevahvuus olisi yli 5 mm.

Taulukko 1. Liikkuvan ferriitisestä teräksestä valmistetun säiliön alin sallittu käyttölämpötila kun
käytetään iskutkeys-kriteeriä -20°C (Dynaamisesti kuormitettu, hitsattu kriittinen
rakenne)⁹

ReL (MPa)	e ≤ 5 mm	5 < e ≤ 10 mm	10 < e ≤ 20 mm	20 < e ≤ 40 mm
235	<-100°C	-76°C	-56°C	-41°C
355	-61°C	-36°C	-26°C	-16°C
460	-42 °C	-22°C	-12°C	-2°C
690	-20 °C	-5 °C	+10 °C	+20 °C

Taulukko 2. Liikkuvan ferriitisestä teräksestä valmistetun säiliön alin sallittu käyttölämpötila kun
käytetään iskutkeys-kriteeriä -40°C (Dynaamisesti kuormitettu, hitsattu kriittinen
rakenne)¹⁰.

ReL (MPa)	e ≤ 5 mm	5 < e ≤ 10 mm	10 < e ≤ 20 mm	20 < e ≤ 40 mm
235	<-100°C	-93°C	-73°C	-58°C
355*	-78°C	-53°C	-43°C	-33°C
460	-60°C	-40°C	-30°C	-20°C
690	-38°C	-23°C	-8°C	+2°C

^{9,10} Kim Wallin, VAK säiliöissä käytettävien metallien haurasmurtumistaipumus alhai-
sissa lämpötiloissa, Liikenneministeriön mietintöjä ja muistioita, B:40/97.

3 ADR- ja RID-määräysten säiliöihin ja paineastioihin liittyvät viitestandardit

ADR- ja RID-määräysten säiliöihin ja paineastioihin liittyy useita viitestandardeja. Tässä työssä tarkastellaan standardeja, joilla on merkitystä suunnittelulämpötilan -40°C kannalta. Tarkastelu rajoittuu siten ferriittisiin materiaaleihin, joilla voi olla merkittävä ainevahvuus. Täten ei tarkastella pieniä alle 150 litran säiliöitä ja paineastioita, joiden ainevahvuus on enintään 5 mm ja myötölujuus alle 460 MPa. Vuoden 1997 selvityksessä todettiin, että kyseiset ainevahvuudet eivät ole merkittävästi alttiita haurasmurtumalle -40°C lämpötilassa, vaikka iskukoevaatimukset olisi annettu -20°C lämpötilassa. Poikkeuksena ovat eräät UN-paineastiat, joilla on huomattavan korkea lujuus. Ne on huomioitava, vaikka niiden ainevahvuus olisi alle 5 mm. Tarkastelun ulkopuolelle jää myös kryoastiat, jotka suunnitellaan selvästi alle -40°C lämpötiloille ja niiden ulkovaipat ovat ainevahvuudeltaan alle 5 mm.

3.1 UN-paineastiat

UN-paineastioita koskeville vaatimuksille sovelletaan ADR- ja RID-määräysten kohtaa 6.2.2, jossa on lueteltu niihin liittyvät viitestandardit. Ferriittisille materiaaleille, joilla voi olla merkittävä ainevahvuus, relevantteja ovat Taulukossa 3 luetellut standardit. Standardien eri vuosilukoversiot eivät vaikuta suunnittelulämpötilavaatimuksiin. Muissa viitestandardeissa on joko materiaaleja, jotka eivät ole herkkiä haurasmurtumalle -40°C lämpötilassa tai niiden ainevahvuus ja lujuus on niin pieni, että niistä valmistetut tuotteet kestävät -40°C lämpötilan.

Tärkeimmissä standardeissa alimman käyttölämpötilan vaatimus on -50°C , jossa lämpötilassa Charpy-V iskukokeet on tehtävä (ISO 9809-1, ISO 9809-2). ISO 9809-3 sallii kaksi vaihtoehtoista alinta käyttölämpötilaa, joko -20°C tai -50°C . Alin sallittu käyttölämpötila on merkittävä kaasupulloon (K2 = -20°C , K5 = -50°C). Standardi ISO 4706 edellyttää alimman sallitun käyttölämpötilan -50°C , mutta ei sisällä iskukoevaatimuksia, astioiden pienen ainevahvuuden takia. Ne eivät siten ole relevantteja haurasmurtuman kannalta. ISO 11118 edellyttää teräksen kestävän alimman mahdollisen käyttölämpötilan, mutta ainakin -20°C . Se ei sisällä iskukoevaatimuksia säiliöiden pienen tilavuuden takia, mutta noudattaa tältä osin standardia ISO 9809-1.

Taulukko 3. UN-paineastioille haurasmurtuman kannalta relevantit viitestandardit.

Viitestandardin tunnus	Viitestandardin nimi
ISO 9809-1:1919	Gas cylinders - Refillable seamless steel gas cylinders - Design, construction and testing - Part 1: Quenched and tempered steel cylinders with tensile strength less than 1100 MPa
ISO 9809-1:2010	
ISO 9809-2:2000	Gas cylinders – Refillable seamless steel gas cylinders. Design, construction and testing – Part 2: Quenched and tempered steel cylinders with tensile strength greater than or equal to 1100 MPa
ISO 9809-2:2010	
ISO 9809-3:2000	Gas cylinders - Refillable seamless steel gas cylinders - Design, construction and testing - Part 3: Normalized steel cylinders
ISO 9809-3:2010	
ISO 4706:2008	Gas cylinders - Refillable welded steel cylinders - Test pressure 60 bar and below
ISO 11118:1999	Gas cylinders – Non-refillable metallic gas cylinders – Specification and test methods
ISO 11118:2015	
ISO 11120:1999	Gas cylinders - Refillable seamless steel tubes for compressed gas transport, of water capacity between 150 l and 3000 l - Design construction and testing
ISO 11120:2015	
ISO 16111:2008	Transportable gas storage devices - Hydrogen absorbed in reversible metal hydride

ISO 11120 sisältää alimman käyttölämpötilan vaatimuksen -50°C , mutta iskukoeämpötila on -20°C . Vaadittava iskuenergia on kuitenkin niin korkea ($\geq 50 \text{ J/cm}^2$), että se täyttää -40°C käyttölämpötilan käytettäessä vuoden 1997 selvityksen laskentamallia. ISO 16111 asettaa alimmaksi sallituksi käyttölämpötilaksi vähintään -40°C . Se ei sisällä iskukoevaatimuksia, mutta noudattaa tältä osin standardeja ISO 9809-1, ISO 9809-2 ja ISO 9809-3.

Viitestandardeissa ei havaittavasti ole sallittu valmistustapoja, joiden tuloksena säiliö tai paineastia ei kestäisi alhaisia lämpötiloja, kunhan niissä esitetyt vaatimukset täyttyvät. Kaikissa tapauksissa iskukokeet tehdään lopputilaiselle paineestialle, joten valmistustapojen vaikutus materiaaliominaisuuksiin tulee huomioitua.

3.2 Muut paineastiat

Muille paineestioille kuin UN-paineestioille on omat viitestandardinsa, jotka on lueteltu ADR- ja RID-määräysten kohdassa 6.2.4. Osa niistä on samoja kuin UN-paineestioille ja ne on käsitelty kohdassa 3.1 (merkitty tässä kursivilla). Haurasmurtumistarkastelulle relevantit viitestandardit on lueteltu taulukossa 4. Standardien eri vuosilukuversiot eivät vaikuta suunnittelulämpötilavaatimukseen. Muissa viitestandardeissa on joko materiaaleja, jotka eivät ole herkkiä haurasmurtumalle -40°C lämpötilassa tai niiden ainevahvuus ja lujuus on niin pieni, että niistä valmistetut tuotteet kestävätkin -40°C lämpötilan.

Standardeissa EN 13322-1 ja EN 14208:2004 edellytetään suunnittelulämpötila -50°C . Iskukoelämpötila valitaan standardin ”SFS-EN 13445-2, Lämmittämättömät painesäiliöt. Osa 2: Materiaalit” mukaisesti, astian ainevahvuuden mukaan. Tämä standardi ei huomioi mahdollisia iskumaisia kuormituksia ja vaadittavat iskuenergiat ovat suhteellisen matalia. Matala suunnittelulämpötila kompensoi osittain tilannetta, mutta se ei takaa, että onnettomuustilanteessa haurasmurtuma olisi poissuljettu. Kuten vuoden 1997 selvityksessä todettiin¹¹, iskumainen kuormitus voi nostaa haurasmurtumisalttiutta lähes 30°C ja SFS-EN 13445-2 pätee vain staattisesti kuormitetuille paineestioille. Vaikka suunnittelulämpötila on -50°C , on mahdollista, että SFS-EN 13445-2 mukainen iskukoelämpötila on jopa korkeampi kuin -20°C . Tämä yhdistettynä suhteellisen mataliin vaadittaviin iskuenergioihin ei takaa, että iskumaisessa kuormituksessa rakenne ei voisi murtua hauraasti. Standardin EN 13322-1 mukaisissa paineestioissa ainevahvuus saattaa olla alle 5 mm, jolloin iskukokeita ei edellytetä. Paine on tällöin myös rajoitettu 60 bar:n. Standardi EN 12205:2001 on kumottu, mutta noudattaa standardia ISO 11118. Standardissa EN 14638-3 edellytetään iskukoelämpötilaa -40°C ja vaadittu iskuenergia on sama tai korkeampi kuin vuoden 1997 selvityksen laskentamallissa.

¹¹ Kim Wallin, VAK säiliöissä käytettävien metallien haurasmurtumistaipumus alhaisissa lämpötiloissa, Liikenneministeriön mietintöjä ja muistioita, B:40/97.

Taulukko 4. Muiden paineastioiden haurasmurtuman kannalta relevantit viitestandardit.

Viitestandardin tunnus	Viitestandardin nimi
<i>EN ISO 11120:1999</i>	<i>Gas cylinders - Refillable seamless steel tubes of water capacity between 150 l and 3000 l - Design, construction and testing</i>
<i>EN ISO 11120:1999+A1:2013</i>	
<i>EN ISO 11120:2015</i>	
EN 13322-1:2003	Transportable gas cylinders. Refillable welded steel gas cylinders. Design and construction. Part 1: Welded steel
EN 13322-1:2003+A1:2006	
EN 12205:2001	Transportable gas cylinders. Non-refillable metallic gas cylinders
<i>ISO 11118:2015</i>	<i>Gas cylinders – Non-refillable metallic gas cylinders – Specification and test methods</i>
EN 14208:2004	Transportable gas cylinders. Specification for welded pressure drums up to 1000 litre capacity for the transport of gases. Design and construction
EN 14638-3:2010	Transportable gas cylinders. Refillable welded receptacles of a capacity not exceeding 150 litres. Part 3: Welded carbon steel cylinders made to a design justified by experimental methods
EN 14893:2006+AC:2007	LPG equipment and accessories. Transportable Liquefied Petroleum Gas (LPG) welded steel pressure drums with a capacity between 150 litres and 1000 litres
EN 14893:2014	

Standardissa EN 14893 edellytetään ainakin suunnittelulämpötilaa -20°C, mutta mikäli säiliö voi altistua alemmille lämpötiloille edellytetään suunnittelulämpötilaa -40°C. Iskukoelämpötila on joko -20°C tai -40°C suunnittelulämpötilan mukaan.

Viitestandardeissa ei havaittavasti ole sallittu valmistustapoja, joiden tuloksena säiliö tai paineastia ei kestäisi alhaisia lämpötiloja, kunhan niissä esitetyt vaatimukset täyttyvät. Kaikissa tapauksissa iskukokeet tehdään lopputilaiselle paineastialle, joten valmistustapojen vaikutus materiaaliominaisuuksiin tulee huomioitua.

3.3 Säiliöt

Säiliöiden viitestandardit on lueteltu ADR- ja RID-määräysten kohdassa 6.8.2.6 ja monisäiliöiden kohdassa 6.8.3.6. Haurasmurtumatarkastelulle relevantit viitestandardit on lueteltu Taulukossa 5. Standardien eri vuosilukuversiot eivät vaikuta suunnittelulämpötilavaatimuksiin. Muissa viitestandardeissa on joko materiaaleja, jotka eivät ole herkkiä haurasmurtumalle -40°C lämpötilassa tai niiden ainevahvuus ja lujuus on niin pieni, että niistä valmistetut tuotteet kestävät -40°C lämpötilan.

Standardissa EN 14025 oletetaan suunnittelulämpötila-alue -20°C ... 50°C , tai alin mahdollinen käyttölämpötila, mikäli se on alempi kuin -20°C . Tällöin suunnittelulämpötila-alue on -40°C ... 50°C . Standardi ei sisällä iskukoevaatimuksia, mutta edellyttää, että suunnittelu perustuu standardiin ”SFS-EN 13445-2, Lämmittämättömät painesäiliöt. Osa 2: Materiaalit”. Standardin kattavien säiliöiden ainevahvuus on teräksillä yleensä luokkaa 5 mm tai alle ja siten ne eivät ole yleensä kovin alttiita haurasmurtumalle. Tämä ainevahvuus huomioidaan standardissa EN 13445-2. Kuten yllä todettiin se ei kuitenkaan ota huomioon mahdollisia iskumaisia kuormituksia ja siten sen mukainen suunnittelulämpötila on epäkonservatiivinen. Standardissa EN 13094 edellytetään Charpy-V iskukoeelämpötilaksi -20°C tai alin suunnittelulämpötila jos se on alempi. Iskukokeet edellytetään ainevahvuuksille yli 5 mm. Suunnittelulämpötila-alue on -20°C ... 50°C , tai -40°C ... 50°C riippuen alimmasta käyttölämpötilasta. Myös standardissa EN 12493 oletetaan suunnittelulämpötila-alue -20°C ... 50°C , tai alin mahdollinen käyttölämpötila mikäli se on alempi kuin -20°C . Tällöin suunnittelulämpötila-alue on -40°C ... 50°C . Standardissa vaaditaan iskutitkeysämpötilat -20°C tai -40°C riippuen suunnittelulämpötila-alueesta.

Taulukko 5. Säiliöiden haurasmurtuman kannalta relevantit viitestandardit.

Viitestandardin tunnus	Viitestandardin nimi
EN 14025:2008	Tanks for the transport of dangerous goods. Metallic pressure tanks. Design and construction
EN 14025:2013+A1:2016	
EN 13094:2004	Tanks for the transport of dangerous goods. Metallic tanks with a working pressure not exceeding 0,5 bar. Design and construction
EN 13094:2008+AC:2008	
EN 13094:2015	
EN 12493:2001	LPG equipment and accessories. Welded steel tanks for liquefied petroleum gas (LPG). Road tankers. Design and manufacture
EN 12493:2008	
EN 12493:2008+A1:2012	
EN 12493:2013	
EN 12493+A1:2014+AC:2015	

Viitestandardeissa ei havaittavasti ole sallittu valmistustapoja, joiden tuloksena säiliö tai paineastia ei kestäisi alhaisia lämpötiloja, kunhan niissä esitetyt vaatimukset täyttyvät. Kaikissa tapauksissa iskukokeet tehdään lopputilaiselle paineastialle, joten valmistustapojen vaikutus materiaaliominaisuuksiin tulee huomioitua.

Standardissa SFS-EN 13445-2, Lämmittämättömät painesäiliöt. Osa 2: Materiaalit esitetään kolme tapaa arvioida iskukoevaatimukset suunnittelulämpötilan funktiona. Yksinkertaisimmassa tavassa, iskukoeämpötila ja suunnittelulämpötila saadaan taulukoista, jotka on kehitetty staattiselle kuormitukselle. Toisessa vaativammassa tavassa, iskukoeämpötila riippuu materiaalin lujuudesta ja ainevahvuudesta. Molemmat menetelmät on suunniteltu painelaitteita varten ja koska ne perustuvat staattiseen

kuormitukseen, ne eivät ole konservatiivisia iskumaisille kuormituksille. Näitä tapoja ei siis sellaisenaan pitäisi hyväksyä liikuteltaville paineastioille ja säiliöille. Kolmas tapa perustuu täysin murtumismekaniikkaan ja edellyttää vaativia tarkastuksia testejä ja analyyseja. Sen käyttö kuljetettavien säiliöiden suunnittelussa ei ole todennäköistä.

4 Paineastioiden ja/tai säiliöiden kuljetusturvallisuus alhaisessa lämpötilassa

Vuoden 1997 selvityksessä¹² läpikäytiin Turvatekniikan keskuksen (nykyään Turvallisuus- ja kemikaalivirasto, Tukes) silloisiin tietoihin perustuen, erilaisia säiliöttyyppejä, joita Teknillinen tarkastuskeskus (TTK) tai Tukes oli viime vuosina tyyppihyväksynyt. Kuljetettavissa kaasusäiliöissä löytyi vain kolme esimerkkiä, jossa säiliön rakenneaineena on ferriittinen rakenneteräs. Tällaiset säiliöttyypit eivät siis ole kovinkaan yleisiä. Vuoden 1997 selvityksen suosituksia noudatettaessa voidaan todeta paineastioiden ja/tai säiliöiden kuljetusturvallisuuden alhaisessa lämpötilassa olevan Suomessa hyvä. Nykyisin Suomen kansallisiin ADR¹³ ja RID¹⁴ määräyksiin on asetettu vaatimus, että materiaalien on kestävä alhaisissa lämpötiloissa aina -40°C:n saakka on kuitenkin viitestandardianalyysin pohjalta useimmissa tapauksissa tarpeeton.

Nykyisten ADR- ja RID-määräysten viitestandardit UN-paineastioille vaativat paineastioiden ja säiliöiden suunnittelulämpötilaksi joko -20°C tai -40°C tai alle. Useimmissa tapauksissa myös Charpy-V iskukokeet tulee tehdä samassa lämpötilassa. Perusvaatimuksena kaikissa standardeissa on vähintään alin mahdollinen käyttölämpötila, joka Suomen ilmaston tapauksessa on -40°C. Täten Suomen ADR vaatimuksissa ei tarvita, UN-paineastioiden tapauksessa, suoraa vaatimusta materiaalien kestävydestä vähintään -40°C lämpötilaan saakka. Riittää, että määritetään alin vaadittava käyttölämpötila -40°C.

Paineastiat, jotka suunnitellaan standardien EN 13322-1 ja EN 14208:2004 mukaisesti, noudattaen standardia ”SFS-EN 13445-2, Lämmittämättömät painesäiliöt. Osa 2: Materiaalit”, tapauksessa on edelleen syytä ylläpitää vaatimusta materiaalien kestävydestä vähintään -40°C lämpötilaan saakka (eli iskukoeämpötila -40°C). Poikkeuksena ovat standardin EN 13322-1 mukaiset paineastiat, joiden ainevahvuus on alle 5 mm ja paine on rajoitettu 60 bar:n. Näille riittää, että määritetään alin vaadittava käyttölämpötila -40°C.

¹² Kim Wallin, VAK säiliöissä käytettävien metallien haurasmurtumistaipumus alhaisissa lämpötiloissa, Liikenneministeriön mietintöjä ja muistioita, B:40/97.

¹³ Vaarallisten aineiden kuljetus tiellä. TRAFICOM/82133/03.04.03.00/2019.

¹⁴ Vaarallisten aineiden kuljetus rautatiellä. TRAFICOM/82134/03.04.02.00/2019.

Samoin säiliöiden, jotka suunnitellaan standardin EN 14025 mukaisesti noudattaen standardia ”SFS-EN 13445-2, Lämmittämättömät painesäiliöt. Osa 2: Materiaalit”, tapauksessa on myös edelleen syytä ylläpitää vaatimusta materiaalien kestävydestä vähintään -40°C lämpötilaan saakka (eli iskukoelämpötila -40°C). Poikkeuksena ovat standardin EN 14025 mukaiset ferriittisestä teräksestä valmistetut paineastiat, joiden ainevahvuus on alle 5 mm ja materiaalin myötölujuus on alle 460 MPa. Näille riittää, että määritetään alin vaadittava käyttölämpötila -40°C.

Tämä tarkoittaa, että myös alle 150 litran paineastioille, jotka suunnitellaan viitestandardin EN 13322-1 mukaisesti, tarvitaan vaatimus materiaalien kestävydestä vähintään -40°C lämpötilaan saakka (eli iskukoelämpötila -40°C), paitsi jos niiden ainevahvuus on alle 5 mm ja paine on rajoitettu 60 bar:n. Muut pienet paineastiat ja säiliöt joko täyttävät vaatimuksen viitestandardin pohjalta tai niiden materiaalin lujuus ja ainevahvuus on niin pieni (alle 460 MPa / 5 mm), ettei haurasmurtumisesta ole vaaraa.

5 Rakennemateriaalien vaurioituminen alhaisten lämpötilojen vuoksi

Rakennemateriaalien mahdolliseen vaurioitumiseen alhaisten lämpötilojen vuoksi havahduttiin kunnolla toisen maailmansodan aikana Yhdysvalloissa, jossa oli alettu valmistaa hitsattuja kuivarahtialuksia ja tankkereita. Sodan aikana rakennetuista 4694:sta aluksesta 1289 koki vakavia tai potentiaalisesti vakavia vaurioita¹⁵. Seitsemän alusta katkesi käytännössä kahtia. Kuuluisin niistä on SS Schenectady, joka oli satamassa odottamassa viimeistelyä, kun se yhtäkkiä katkesi. Veden lämpötila oli tuolloin +4°C, ilma oli -3°C ja tyyni. Ymmärrettävästi asiasta kiinnostuttiin voimakkaasti. Laivaston tutkimuslaboratoriossa (Naval Research Laboratory) tutkittiin vaurioituneitten alusten teräslevyjä ja hitsejä. Havaittiin, että levyillä, joissa haurasmurtuma oli ydintynyt, oli vaurioitumislämpötilassa matalampi sitkeys kuin levyillä joissa haurasmurtuma oli pysähtynyt. Tämän pohjalta kehitettiin ensimmäinen kriteeri haurasmurtumisalttiuden arvioimiseksi tietyssä lämpötilassa, niin sanottu transitiolämpötila kriteeri. Kyseinen kriteeri (21 J alimmassa käyttölämpötilassa) päti kuitenkin vain kyseisille laivateräksille, jotka olivat tiivistämätöntä terästä ainevahvuudeltaan alle 25 mm. Uusille teräslaaduille ja ainevahvuuksille kehitettiin uusia iskuenergiakriteerejä, useimmiten käytettäväksi alimmassa käyttölämpötilassa. Havaittiin myös, että kuormitusnopeus vaikuttaa haurasmurtumisherkkyyteen. Murtumismekaniikan kehittyessä, kyettiin yhdistämään Charpy-V iskukoe murtumissitkeyteen, korrelaatioiden avulla. Tämä mahdollisti tarkempien suunnitteluohjeiden laatimisen. Näissä, Charpy-V iskukoelämpötila ei enää ole sama kuin alin käyttölämpötila. Tarkemmat suunnitteluohjeet ovat yleensä vähemmän konservatiivisia kuin ne, joissa Charpy-V iskukoelämpötila on sama kuin alin käyttölämpötila. Mahdollisesti kehittynein näistä on edellä mainittu Eurocode 3 normistossa¹⁶ oleva haurasmurtumisanalyysi. Yksityiskohtaisempi kuvaus transitiolämpötilojen kehityksestä on esitetty referenssissä¹⁷. ADR ja RID määräyksissä Charpy-V iskukoelämpötila on yleensä sama kuin alin käyttölämpötila. Täten ne ovat luonteeltaan suurelta osin konservatiivisia, muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta.

Onnettomuustutkintakeskuksen tietojen pohjalta Suomessa ei ole tapahtunut matalasta lämpötilasta johtuvia merkittäviä onnettomuuksia yli 20 vuoteen. Kuljetussäiliöiden haurasmurtumista ei löydy raportoituja tapauksia Suomessa. Tämä ei poissulje

^{15, 17} Kim Wallin, Fracture Toughness of Engineering Materials – Estimation and Application. EMAS Publishing, Warrington UK, 2011.

¹⁶ EUROCODE 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-10: Materiaalin sitkeys ja kokonaispaksuuden ominaisuudet.

sitä, että niitä on tapahtunut, mutta niitä ei ole raportoitu. Merkittävin Suomessa tapahtunut matalasta lämpötilasta johtuva onnettomuus on vuonna 1987, Haminassa vaurioitunut varastosäiliö¹⁸. Vaurion aiheutti säiliön pohjalevyjen murtuminen hauraasti. Murtumaan vaikuttavia syitä oli lukuisia: Muun muassa huonot perustukset, ala-arvoiset hitsit, ala-arvoinen teräs sekä matala lämpötila (noin -34°C). Tutkimuksissa todettiin, että kaikkien näiden yhteisvaikutus johti murtumaan. Tämä kuvastaa käytössä olevien kriteerien konservatiivisuutta. Tämä ei kuitenkaan tarkoita, että vaatimuksia voisi lievittää, sillä niiden tarkoitus on myös varautua mahdollisiin valmistuksen ja käytön poikkeamiin.

¹⁸ Yhteenvedo Kotkassa 15.1.1987 ja Haminassa 28.1.1987 havaittujen kemikaalivuotojen tutkimuksista. Suuronnettomuuden Tutkintaselostus N:o 11987. Helsinki 1988.

6 Johtopäätökset

Vain ferriittisistä teräksistä valmistetut paineastiat voivat olla herkkiä haurasmurtumalle lämpötilavälillä -40°C...20°C. Yleisenä sääntönä voidaan pitää, että seinämävahvuuksilla alle 5 mm ja myötölujuuksilla alle 460 MPa riittää, jos materiaalin iskukoelämpötila on -20°C. Jos ainevahvuus on yli 460 MPa, tarvitaan iskukoelämpötila -40°C myös seinämäpaksuuksille välillä 3 ... 5 mm. Alle 3 mm ainevahvuuksille ei tarvita iskukokeita. Nämä johtopäätökset perustuvat iskumaisen kuormituksen alaisille rakenteille, koska vuoden 1997 selvityksessä todettiin kuljetettavien paineastioiden ja säiliöiden vaativan oletuksen mahdollisesta iskumaisesta kuormituksesta.

Suomen ADR vaatimuksissa ei tarvita, UN-paineastioiden tapauksessa, suoraa vaatimusta materiaalien kestävydestä vähintään -40°C lämpötilaan saakka. Riittää, että määritetään alin vaadittava käyttölämpötila -40°C. Kuten edellä on kuvattu, materiaalin kestävyys, joka perustuu iskukokeen mukaiseen transitiolämpötilaan ei ole sama kuin rakenteen kestävyys, joka määräytyy myös muista tekijöistä, kuten ainevahvuus, kuormitukset ja teräksen lujuus. Käyttölämpötila viittaa rakenteeseen. Tällä hetkellä ADR vaatimukset kohdistuvat materiaaliin ja ovat siten usein vaativampia kuin käyttölämpötilaan kohdistuvat vaatimukset.

Paineastiat, jotka suunnitellaan standardien EN 13322-1 ja EN 14208:2004 mukaisesti, noudattaen standardia ”SFS-EN 13445-2, Lämmittämättömät painesäiliöt. Osa 2: Materiaalit”, tapauksessa on edelleen syytä ylläpitää vaatimusta materiaalien kestävydestä vähintään -40°C lämpötilaan saakka (eli iskukoelämpötila -40°C), koska viitestandardit eivät huomioi iskumaisia kuormituksia ja niiden käyttölämpötilaoletukset ovat siksi epäkonservatiivisia. Poikkeuksena ovat paineastiat, joiden ainevahvuus on alle 5 mm ja paine on rajoitettu 60 bar:n. Näille riittää, että määritetään alin vaadittava käyttölämpötila -40°C.

Samoin säiliöiden, jotka suunnitellaan standardin EN 14025 mukaisesti noudattaen standardia ”SFS-EN 13445-2, Lämmittämättömät painesäiliöt. Osa 2: Materiaalit”, tapauksessa on myös edelleen syytä ylläpitää vaatimusta materiaalien kestävydestä vähintään -40°C lämpötilaan saakka (eli iskukoelämpötila -40°C). Mikäli kyseessä on ferriittisestä teräksestä valmistetut paineastiat, joiden ainevahvuus on alle 5 mm ja materiaalin myötölujuus on alle 460 MPa. Näille riittää, että määritetään alin vaadittava käyttölämpötila -40°C.

Yleisvaatimuksena tulisi pitää alinta käyttölämpötilaa -40°C, paitsi yllämainittujen viitestandardien mukaan suunnitellut paineastiat ja säiliöt, joille tulee asettaa vaatimus iskusitkeys lämpötilasta -40°C. Yleisvaatimus voi, mutta ei välttämättä tarvitse, kattaa

myös materiaalit, kuten austeniittiset teräkset, alumiiniseokset, titaaniseokset, komposiittimateriaalit ja lujitemuovit, jotka eivät ole herkkiä haurasmurtumalle. Tämä siksi että alin käyttölämpötilan käsite Suomessa tulee olla yksikäsitteinen.

Pienille hitsauskaasupulloille ja alumiinisille hiilidioksidipulloille noin litran kokoluokassa ja pienille retkikaasurasioille ja retkikaasupatruunoille, joiden seinämä on hyvin pieni (jopa alle 1 mm) ei tarvita lainkaan käyttölämpötilavaatimuksia. Niiden materiaalit joko eivät ole alttiita haurasmurtumalle ja / tai niiden ainevahvuus on niin pieni, ettei haurasmurtuminen ole todennäköistä. Kriittisenä ainevahvuutena voidaan pitää 3 mm. Sitä paksumman ainevahvuuden omaavilta paineastioilta on perusteltua edellyttää alinta käyttölämpötilaa -40°C .

Lähteet

Sopimus vaarallisten tavaroiden kansainvälisistä tiekuljetuksista (ADR) (SopS 23/1979).

Kansainvälisiä rautatiekuljetuksia koskevan yleissopimuksen (COTIF) liitteen C määräykset (SopS 52/2006).

Kim Wallin, VAK säiliöissä käytettävien metallien haurasmurtumistaipumus alhaisissa lämpötiloissa, Liikenneministeriön mietintöjä ja muistioita, B:40/97.

Vaarallisten aineiden kuljetus tiellä. TRAFICOM/82133/03.04.03.00/2019.

Vaarallisten aineiden kuljetus rautatiellä. TRAFICOM/82134/03.04.02.00/2019.

EUROCODE 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-10: Materiaalin sitkeys ja kokonaispaksuuden ominaisuudet.

Kim Wallin, Fracture Toughness of Engineering Materials – Estimation and Application. EMAS Publishing, Warrington UK, 2011.

Yhteenveto Kotkassa 15.1.1987 ja Haminassa 28.1.1987 havaittujen kemikaalivuotojen tutkimuksista. Suuronnettomuuden Tutkintaselostus N:o 11987. Helsinki 1988.

Twitter: @lvm.fi
Instagram: lvmfi
Facebook.com/lvmfi
Youtube.com/lvm.fi
LinkedIn: Liikenne- ja viestintäministeriö

lvm.fi