



**PELASTUSOPISTO**

KORKEAPAINIESTEN HAPPI-, ARGON- JA VETYPULLOJEN  
KÄYTTÄYTYMINEN TULIPALOJEN YHTEYDESSÄ

Pertti Tolonen

Pelastusopiston julkaisu  
B-sarja: Tutkimusraportit  
2/2006

ISBN-13: 978-952-5515-22-0 (pdf)  
ISBN-10: 952-5515-22-2 (pdf)  
ISSN 1795-9160

Tolonen Pertti

Korkeapaineisten happi-, argon- ja vetypullojen käyttäytyminen tulipalojen yhteydessä

Tutkimusraportti, 38 s + 5 liitettä (5 s.)

---

## TIIVISTELMÄ

Tällä tutkimuksella haluttiin määrittää tulipalotilanteeseen joutuneiden kaasupullojen räjähdysajat sekä heitteiden kantamat. Samalla pyrittiin määrittämään räjähdys-hetkellä oleva maksimimaalinen pullopaine (räjähdyspaine) sekä pintalämpötila, joka kertoo pullon sisältämän kaasun lämpötilasta. Kokeista tehtiin myös DVD-tallenne.

Tutkimuksen perusteella voitiin todeta, että Suomessa esimerkiksi TOKEVA- ja OVA-ohjeissa suositettu 100 metrin turvaetäisyys on ainakin pahimmissa tilanteissa riittämätön. Tehdyissä kokeissa heitteiden arvioitu kantama oli 300 - 350 metriä. Mikäli halutaan varmistaa täysin ympäristön turvallisuus heitteiden vaikutuksilta, turvaetäisyyden pitäisi olla suurempi nykyiseen ohjeistukseen verrattuna. Räjähdysaikojen todettiin olevan lyhimmillään alle 6 minuuttia, joten käytännössä aikaa esimerkiksi pullojen täysin turvalliselle siirtämiselle palopaikalta ei juuri ole.

Asiasanat: puristetun kaasun pulloräjähdys

Tolonen Pertti

Behaviour of compressed gas cylinders (oxygen, argon and hydrogen) in case of fires

Research report 38 p. + 5 ap. (5 p.)

---

## ABSTRACT

The purpose of this study was to determine the time it takes from a compressed gas cylinder (oxygen, argon, or hydrogen) to explode when exposed to a fire, and to determine distances of cylinder fragments. Moreover, associated with an explosion, the maximal pressure (rupture pressure) and the surface temperature of a gas cylinder to indicate about a gas temperature, were measured. In addition, a DVD video disc was produced about the experiments.

On the basis of this study, it is obvious that the safety distances of 100 meters, recommended by the Finnish TOKEVA and OVA instructions, are not enough for the worst cases of gas cylinder explosions. To hinder damages caused by flying fragments, the current safety distances have to be even tripled. The shortest explosion times were less than 6 minutes, what means that there is no time, for example for a safe transport of heated cylinders from a fire.

Key words: explosion of compressed gas cylinders

## Sisältö

1	TUTKIMUKSEN TARKOITUS JA LAAJUUS SEKÄ OSALLISTUJAT	8
2	AIEMMIN TEHTYJÄ TUTKIMUKSIA	9
3	KORKEAPAINAISTEN KAASUPULLOJEN RÄJÄHTÄMISEEN LIITTYVÄÄ TEORIAA	10
3.1	Paineistettujen kaasupullojen energia	10
3.2	Heitteen geometria	11
3.3	Heitteen lentonopeuden määrittäminen	11
3.4	Heitteen kantama	14
3.4.1	Heitteen kantaman määrittäminen nopeuden ylärajojen avulla	14
3.4.2	Vaaraetäisyyden arvioiminen käytettävissä olevan energian avulla	15
3.5	Yhteenveto	16
4	PAINEEN, TILAVUUDEN JA LÄMPÖTILAN VÄLISET YHTEYDET	17
4.1	Ideaalikaasun yleinen tilanyhtälö	17
4.2	Reaalikaasujen tilanyhtälö	17
5	KOKEISSA KÄYTETTYJEN KAASUJEN OMINAISUUDET, NIIDEN KÄYTTÖ JA NIIHIN LIITTYVÄT OHJEET ONNETTOMUUKSISSA	19
5.1	Happi, O <sub>2</sub>	19
5.1.1	Ominaisuudet	19
5.1.2	Käyttö	19
5.1.3	Toiminta palo- ja räjähdystilanteessa	19
5.2	Argon, Ar	20
5.2.1	Ominaisuudet	20
5.2.2	Käyttö	20
5.2.3	Toiminta palo- ja räjähdystilanteessa	21
5.3	Vety, H <sub>2</sub>	21
5.3.1	Ominaisuudet	21
5.3.2	Käyttö	21
5.3.3	Toiminta palo- ja räjähdystilanteessa	21
6	KOKEIDEN TOTEUTUS	23
6.1	Suunnittelu ja yleiset koejärjestelyt	23
6.2	Kokeiden käytännön toteutus ja havainnot	28
7	SAATUJEN KOETULOSTEN TARKASTELU	34
8	YHTEENVETO JA SUOSITUKSET	36

LIITE 1: KOKEESEEN OSALLISTUJAT	39
LIITE 2: KAASUPULLON RAKENNE (AGA 2006 )	40
LIITE 3: YHTEENVETO KOKEIDEN 1-9 TULOKSISTA	41
LIITE 4: RÄJÄHDYKSISSÄ SYNTYNEITÄ KAPPALEITA	42
LIITE 5: PULLOKORI ENNEN RÄJÄHDYSTÄ JA RÄJÄHDYKSEN JÄLKEEN	43

## TERMIEN SELITYKSET

Adiabaattinen prosessi	Tapahtuma, jossa systeemin ja ympäristön välillä ei ole lämmönvaihtoa.
Dimensioton	Luku, jolla ei ole fysikaalista yksikköä.
Entalpia-energia	Kuvaa reaktion aikana luovutettua tai kulutettua lämpöä.
Gravitaatio	Painovoima, tarkoittaa massojen välistä fysikaalista vetovoimaa.
Ideaalikaasu	Kuviteltu mallikaasu, joka noudattaa tilanyhtälöä $pV = nRT$ (p on paine, n moolimäärä ja T lämpötila).
Isentroppinen	Systeemin entropia (fysikaalinen suure, joka ilmaisee epäjärjestyksen määrän systeemissä) pysyy vakiona.
Kineettinen energia	Liike-energia (kappaleen liikkeeseen varastoitunutta energiaa).
Moolimäärä	Molekyylipainon ilmoittama grammamäärä ainetta.
Reaalikaasut	Poikkeavat ideaalikaasuista siten, että niiden molekyyleillä on äärellinen koko ja molekyyliden välillä on vuorovaikutusta myös silloin, kun ne eivät törmää.
Reaktiivinen	Herkästi reagoiva.

## 1 TUTKIMUKSEN TARKOITUS JA LAAJUUS SEKÄ OSALLISTUJAT

Maanteillämme liikkuu runsaasti korkeapaineisia kaasupulloja sisältäviä kuljetuksia, ja lisäksi kaasupulloja varastoidaan suuria määriä. Tulipalojen yhteydessä kaasupullo voi kuumentua, niin että sisäisen paineen kohoamisen seurauksena sen kuori repeää räjähdysnomaisesti. Mikäli pullon sisältämä kaasu on syttyvää se vielä lisää räjähdysvaikutusta. Tällaisten tilanteiden yhteydessä palokunnan on turvallisuuden varmistamiseksi tärkeää tietää, mikä on se aika tulipalon syttymisestä, jolloin voidaan turvallisesti lähestyä palopaikkaa ja toimia siellä ennen pullojen räjähtämistä. Lisäksi on voitava määrittää välittömän vaaran alue ja se, kuinka suuri alue on eristettävä, jotta ihmiset ovat turvassa mahdollisessa räjähdyksessä syntyviltä heitteiltä.

Tällä tutkimuksella pyritään määrittämään palotilanteeseen joutuneiden kaasupullojen räjähdysajat sekä heitteiden kantamat. Hankkeessa oli mukana Pelastusopisto ja AGA Oy. Molemmat hyödyntävät saatuja tuloksia omassa neuvonnassaan ja koulutuksessaan niille, jotka ovat tällaisten kaasupullojen kanssa tekemisissä. Kohderyhminä ovat esimerkiksi kaasupullojen kuljetuksiin ja käsittelyyn osallistuvat henkilöt sekä pelastusviranomaiset. Tämän raportin lisäksi kokeista halutaan tehdä DVD-tallenne, jota voidaan käyttää havainnollistettaessa kaasupullojen räjähdysä. Kuvauksesta vastasi vakuutusyhtiö IF Oy. Kokeiden suunnitteluun ja tekemiseen Sotinpurolla osallistuivat Kari Koivistoinen (projektipäällikkö) ja Pertti Tolonen Pelastusopistolta, Olli Haapanen AGA Oy:stä, Markku Jeskanen vakuutusyhtiö IF:stä ja palopäällystöpiskelija Risto-Matti Raatikainen Savonia-ammattikorkeakoulusta (liite 1). Pelastusopiston tutkimuspäällikkö Hannu Rantanen toimi projektin ohjaushenkilönä.



## 2 AIEMMIN TEHTYJÄ TUTKIMUKSIA

Selvitettäessä aiemmin tehtyjä korkeapaineisilla kaasupulloilla tehtyjä tutkimuksia oltiin yhteydessä kotimaisiin tutkimuslaitoksiin ja alan teollisuuslaitoksiin. Lisäksi asiaa tiedusteltiin Ruotsista ja haettiin tietoa internet-hakujärjestelmillä.

Pelastusopistolla on vuonna 1996 tehdyissä kaasupullojen ampumakokeissa mitattu yksittäisellä kokeella asetyleenipullon räjähdysaikaa ja heitteiden kantomatkaa (Mikkonen 1996). Nestekaasupullojen käyttäytymistä tulipalossa on tutkittu Pelastusopistolla (Laitinen ja Jylhä 1999), mutta ei paineenalaisten suurten kaasupullojen käyttäytymistä. Muuallakaan Suomessa ei ole kyselyjen perusteella tehty juuri tähän liittyvää tutkimusta (VTT, AGA, TEKES). Ruotsissa on tutkittu 1960-luvulla asetyleenipullojen räjähdysvaikutusta räjäyttäen niitä kuumentamalla (Mikkonen 1996). Lisäksi Ruotsissa on tehty asetyleenipulloille ampumakokeita (Björnström ja Setterwall 2002 ja Räddningsverket 1995, 1996). Englannissa on tutkittu paineenalaisten pullojen kantamaa sovittamalla yhteen kokeista saatuja tuloksia ja teoreettisia laskelmia (Baum 1988). Lääkehapen palo- räjähdysvaaraa on aiemmin tutkinut Risto Salopuro tekemässään opinnäytetyössä (1999).

### 3 KORKEAPAINAISTEN KAASUPULLOJEN RÄJÄHTÄMISEEN LIITTYVÄÄ TEORIAA

Tässä luvussa esitetyt asiat perustuvat soveltuvin osin lähteessä Baum (1988) esitettyihin teoreettisiin tarkasteluihin ja tuloksiin.

Jotta pystyttäisiin ymmärtämään ja arvioimaan laskennallisesti korkeapaineisen kaasupullon räjähdyksessä syntyvän heitteen kantamaa, siitä aiheutuvaa vahinkoa ja mahdollisesti suunnittelemaan ennakkoon suojaustoimia, on heitteen, sen muodon ja nopeuden väliset yhteydet tunnettava.

Paineellisen pullon revetessä laajeneva kaasu tai neste tekee työtä (i) hajottaessaan ja muotoilleessaan pullon seinää, (ii) puristaessaan ja työntäessään ympäristön ilmaa ja (iii) kiihdyttäessään heitettä tai heitteitä. Iso osa käytettävissä olevasta energiasta kuluu ilman vastuksen voittamiseen. Tarkastelemalla pullon sisällön heitteelle antamaa energiaa voidaan arvioida heitteen aiheuttamaa potentiaalista vaaraa ympäristölle.

#### 3.1 Paineistettujen kaasupullojen energia

Korkeapaineisessa kaasupullossa on tietty määrä kaasua paineessa  $P_o$  ja tilavuudessa  $\phi_o$ , ulkoista painetta merkitään  $P_e$  :llä. Näissä tarkasteluissa lämmönvaihto ympäristön ja heitteiden välillä voidaan vähäisyytensä takia jättää huomiotta ja laajenemista voidaan tarkastella adiabaattisena prosessina.

Isentrooppisessa laajenemisessa vapautuva energia,  $E$  saadaan jollekin tietylle kaasulle määritettyä entalpia-energia –diagrammista, esim. Mollierin kaaviosta (Baum 1988, 169). Arvioitaessa kaasu ideaaliseksi, voidaan soveltaa seuraavaa lauseketta:

$$E = \frac{P_o \phi_o k}{\gamma - 1}, \quad (1)$$

missä  $\gamma$  on kaasun isentrooppinen (lämpömäärän muutoksen suhde lämpötilaan on vakio) laajenemisvakio ja

$$k = \left[ 1 - \left( \frac{P_e}{P_o} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] + (\gamma - 1) \frac{P_e}{P_o} \left[ 1 - \left( \frac{P_e}{P_o} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \right], \quad (2)$$

Jos paine  $P_o$  on hyvin korkea, saatu energian lauseke ei enää päde (Baum 1988). Esimerkiksi jos argonia sisältävän pullon alkupaine on 10,3 MPa ja lämpötila 20 °C, vapautuvan energian arvo alenee 43 % ideaalikaasun arvosta.

### 3.2 Heitteen geometria

Pullon materiaalista riippuu, millä tavalla se murtuu ja sitä kautta millainen heitteen muodosta tulee. Esimerkiksi materiaalin ollessa melto murtuma etenee nopeasti haarahtuen samalla jatkuvasti, ja aiheuttaa pullon pirstoutumisen.

### 3.3 Heitteen lentonopeuden määrittäminen

Tarkasteltaessa paineellista kaasupulloa (paine  $P_o$ ) oletetaan, ettei heitteen muoto muutu merkittävästi sen kiihtyessä ja että kitkavoimat ovat merkityksettömiä. Lisäksi alkukiihtyvyys on suuri verrattuna gravitaation aiheuttamaan kiihtyvyyteen. Tällöin heitteen maksiminopeus,  $V$ , voidaan ilmaista suhteessa äänen nopeuteen korkeapaineisessa kaasussa seuraavasti:

$$\frac{V}{a_o} = f\left(F, \frac{P_o}{P_e}, \frac{L}{R}, \gamma\right), \quad (3)$$

missä  $F$  on dimensioton heitteen alkukiihtyvyys:

$$F = \frac{P_o A R}{M a_o^2}. \quad (4)$$

$A$  on heitteen pinta-ala,  $M$  sen massa,  $L$  on pullon pituus ja  $R$  on pullon säde. Äänen nopeus korkeapaineisessa kaasussa on  $a_o = \sqrt{\gamma P_o / \rho_o}$ , missä  $\rho_o$  on ko. kaasun tiheys.

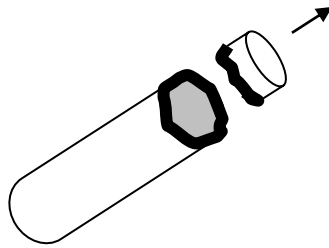
Laajenemisprosessin ollessa monimutkainen (esim. leimahtavat nesteet, kaasu- ja nestesekoitukset) nopeuden yläraja lasketaan kaavalla

$$V = K \sqrt{\frac{2E}{M}}, \quad (5)$$

missä  $0 < K < 1$ . Tätä käytetään myös, kun heite deformoituu merkittävästi kiihdytyksen aikana. Näin on esimerkiksi, kun koko pullosta tulee halkeamisen seurauksena heite ja halkeaminen jatkuu edelleen vielä pullon kiihtyessä (Baum 1988).

Paineistetusta pullosta (ideaalikaasu) räjähdyksessä irtoavan pohjan (kuva 1.) nopeus saadaan kaavalla

$$V = 2F^{\frac{1}{2}} a_o. \quad (6)$$



Kuva 1. Pohjan irtoaminen pullosta

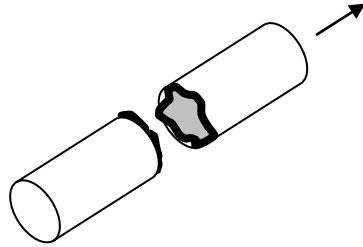
Vastaavasti räjähdysten seurauksena pullo voi katketa ja puolikkaan (kuvio 2.) nopeus saadaan kaavalla

$$V = 2,18 \left( F \left( \frac{L}{R} \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{\frac{2}{3}} a_o, \quad (7)$$

missä  $A$  on pullon avoimen pään pinta-ala.

Mikäli kyseessä on pullo, joka sisältää paineistetussa tilassa olevaa nestemäistä kaasua, katkeamisen seurauksena irtoavan puolikkaan (kuva 2.) nopeus on

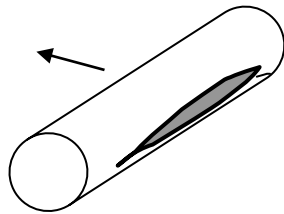
$$V = 0,2(2E / M)^{\frac{1}{2}} . \quad (8)$$



Kuva 2. Kaasupullon puolittuminen

Pullon (paineistettu ideaalikaasu) revetessä pystysuunnassa (kuva 3.) ja sen ollessa sen jälkeen kokonaisuudessaan heitteenä nopeus lasketaan kaavalla

$$V = 0,17(2E / M)^{\frac{1}{2}} . \quad (9)$$



Kuva 3. Kaasupullon repeäminen

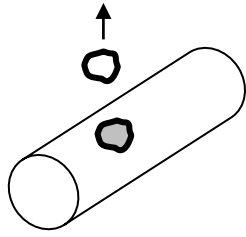
Kun tällaisesta pullosta irtoaa räjähdyksessä suuri, yksittäinen kappale, sen nopeus saadaan määritettyä kaavalla

$$V = 2F^{\frac{1}{2}} a_o . \quad (10)$$

Jos taas vastaavanlaisesta pullosta irtoaa pieni, yksittäinen kappale (kuva 4.), tällöin sen nopeus saadaan laskettua kaavalla

$$\frac{V}{a_o} = [2F(\frac{h}{R})]^{0,5} + 0,96[F(\frac{r}{R})]^{0,35} , \quad (11)$$

missä  $r$  on heitteen säde.



Kuva 4. Kaasupullosta repeää pieni pala

Mikäli pullo hajoaa kauttaaltaan osiin, näiden nopeus saadaan kaavalla

$$V = 0,88F^{0,55}a_o . \quad (12)$$

Kaikissa edellä olevissa tapauksissa oletetaan pullo sylinterin muotoiseksi ja yllä oleviin nopeuden lausekkeisiin liittyy rajoitteita, jotka on otettava laskennoissa huomioon (Baum 1988).

### 3.4 Heitteen kantama

Arvioitaessa heitteen aiheuttamaa vaaraa on maksimikantaman määrittäminen tietyksi ensiarvoisen tärkeää. Tätä kautta on mahdollista määrittää riskialue onnettomuustilannetta ajatellen. Kun heitteen nopeus saadaan laskettua, myös sen kantama voidaan määrittää. Heitteen lentorataan vaikuttaa heitteen tyyppi ja lähtöpaikka ja se voi olla lähes mikä tahansa. Seuraavassa on esitetty heitteen maksimikantaman laskeminen eri tilanteissa.

#### 3.4.1 Heitteen kantaman määrittäminen nopeuden ylärajojen avulla

- (a) Kun ilmanvastuksesta aiheutuva heitteeseen kohdistuva voima on pienempi kuin gravitaatiovoima ja nostovoima on vähemmän kuin viisi kertaa ilmanvastuksesta aiheutuva voima, heitteen maksimikantama,  $S$ , voidaan laskea kaavalla

$$S = \frac{V^2}{g}, \quad (13)$$

missä  $V$  on heitteen maksiminopeus ja  $g$  gravitaatiokiihtyvyys.

Kaava sopii laskettaessa kantamaa heitteelle, joka heittelee eri suuntiin lentonsa aikana.

- (b) Heittelehtimättömälle kappaleelle, johon kohdistuva ilmanvastuksesta aiheutuva voima on pienempi kuin gravitaatiovoima ja enintään viidesosa kappaleeseen kohdistuvasta nostovoimasta, maksimikantama voidaan laskea kaavalla

$$S \leq \frac{3V^2}{g} \quad (14)$$

- (c) Heitteeseen kohdistuvan ilmanvastusvoiman ollessa gravitaatiovoimaa suurempi, niin silloin maksimikantama, laskettuna kaavalla (13), pienenee jyrkästi.

Jos kaasupullo on sijoitettuna merkittävästi perustason yläpuolelle, tämä on huomioitava lisäämällä kaavaan 15 kyseinen korkeusero,  $H$ .

Maksimikantaman laskukaavaksi tulee tällöin

$$S \leq \frac{3V^2}{g} + H \quad (15)$$

### 3.4.2 Vaaraetäisyyden arvioiminen käytettävissä olevan energian avulla

Vaara-alueen määrittämisessä käytetään lähtökohtana heitteen maksimikantamaa  $S = \frac{V^2}{g}$  ja tarvittaessa kerrotaan kantama tekijällä 3.

Kaasupullon hajotessa 2 - 4 osaan voidaan tapausta käsitellä suurehkojen heitteiden tilanteena. Oletuksena silloin on, että kunkin yksittäisen osan paino on tällöin vähintään yksi kymmenesosa koko pullon painosta ja kunkin osan kineettinen energia on vähemmän kuin 20 % kaikesta käytettävissä olevasta energiasta. Tällöin kyseiset heitteet puotavat alueelle, jonka säde voidaan laskea kaavalla

$$S \leq \frac{4E}{M_v g}, \quad (16)$$

missä  $M_v$  on pullon paino.

Pienien yksittäisten heitteiden kantaman laskemisessa on syytä käyttää edellä esitettyä heitteen maksiminopeuden käyttöön perustuvaa menetelmää.

Kaasupullon hajotessa suureen määrään pieniä kappaleita niiden yhteenlaskettu kineettinen energia ei ylitä 40:tä % koko käytettävissä olevasta energiasta ja yksittäisten kappaleiden nopeudet ovat yhtä suuret. Nyt vaara-alue saadaan laskettua kaavalla (Baum 1988)

$$S \leq \frac{0,8E}{M_v g}. \quad (17)$$

### 3.5 Yhteenveto

Heitteen koko vaikuttaa merkittävästi sen nopeuteen (kaavat 7 - 12) ja sitä kautta kantamaan (kaavat 13 - 17). Mitä pienempi on massa, sitä suurempi on kantama. Myös heitteen geometrialla on oma merkityksensä kantamaan (kaavat 14-15). Mikäli heitteen muoto on sellainen, että se kieppuu ilmassa, sen kantama on pienempi kuin sellaisella kappaleella, jolla kieppuminen on lennon aikana vähäisempää. Heitteen kantama voidaan siis edellä olevan mukaisesti teoreettisesti laskea, mikäli saadaan määritettyä sen maksiminopeus.

Nopeuden määrittämiseksi on laskettava heitteen saama energia. Käytännössä laskut ovat monimutkaisia, eikä tässä tutkimuksen ollut tarkoitus soveltaa esitettyjä kaavoja laskennallisesti. Kaasupullon lähtönopeus räjähdyksessä on yleensä noin 60 m/s (Hallemies 2006). Esimerkiksi, jos kaavassa 13 käytetään tätä pullon maksiminopeutena, heitteen kantamaksi saadaan 360 metriä. Mikäli heitteen lähtötaso on ympäristöä korkeammalla, kantamaa laskettaessa se on otettava huomioon lisäämällä siihen vielä korkeustekijä (kaava 15). Vaara-alueen määrittämisessä käytetään lähtökohtana heitteen maksimikantamaa (kaavat 16 - 17).



## 4 PAINEEN, TILAVUUDEN JA LÄMPÖTILAN VÄLISET YHTEYDET

### 4.1 Ideaalikaasun yleinen tilanyhtälö

Yhdistämällä eri kaasulait saadaan ideaalikaasun tilanyhtälö (Antila 2003):

$$pV = nRT , \quad (18)$$

missä  $n$  on moolimäärä,  $R$  yleinen kaasuvakio ( $8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) ja  $T$  lämpötila (K). Kaavassa  $p$  on kaasun paine ( $\text{N/m}^2$ ) ja  $V$  kaasusäiliön tilavuus ( $\text{m}^3$ ).

Kun tarkastellaan samaa kaasumäärää eri olosuhteissa, voidaan tilanyhtälöä käyttää muodossa

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \quad (19)$$

### 4.2 Reaalikaasujen tilanyhtälö

Todelliset kaasut noudattavat kuitenkin vain likimääräisesti ideaalikaasulakeja. Paineen ollessa pieni (alle 1 MPa) monet kaasut noudattavat melko tarkasti ideaalikaasulakeja mutta paineen kasvaessa poikkeama kasvaa. Suurissa paineissa ideaalikaasun tilanyhtälö antaa tulokseksi liian pienen tilavuuden ja lämpötilan kasvaessa virhe vastaavasti pienee.

Reaalikaasut poikkeavat ideaalikaasuista siten, että niiden molekyyleillä on äärellinen koko ja molekyylien välillä on vuorovaikutusta myös silloin, kun ne eivät törmää. Reaalikaasun käyttäytymistä voidaan tarkastella Van der Waalsin tilanyhtälöllä (Wikipedia 2006):

$$\left( P + \frac{an^2}{V^2} \right) (V - nb) = nRT , \quad (20)$$

missä termi  $\frac{an^2}{V^2}$  ottaa huomioon molekyylien väliset vuorovaikutukset ja nb huomioi molekyylien tilavuudet ja kertoimet a ja b ovat Van der Waalsin vakioita (Taulukko 1.).

Taulukko 1. Korjauskertoimen arvoja tutkituille kaasuille

Kaasu	<b>a</b> [ $Pa\ m^6 / mol^2$ ]	<b>b</b> [ $m^3/mol$ ]
<b>O2</b>	0,137	0,0000318
<b>Ar</b>	0,135	0,00003219
<b>H2</b>	0,025	0,00002612

## 5 KOKEISSA KÄYTETTYJEN KAASUJEN OMINAISUUDET, NIIDEN KÄYTTÖ JA NIIHIN LIITTYVÄT OHJEET ONNETTOMUUKSISSA

### 5.1 Happi, O<sub>2</sub>

Happi on väritön ja hajuton, hieman ilmaa raskaampi kaasu. Nesteytetty happi on väriltään vaaleansinistä ja erittäin kylmää. Litrasta nestemäistä happea saadaan noin 840 litraa kaasumaista happea. Happi on voimakas hapetin. Happea kuljetetaan ja varastoidaan joko puristettuna tai jäähdyttämällä nesteytettynä kaasuna. Turvallisuussyistä happea toimitetaan myös hajustettuna (OVA-ohje 2006).

#### 5.1.1 Ominaisuudet

Hapen fysikaalis-kemialliset ominaisuudet on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Hapen fysikaalis-kemiallisia ominaisuuksia

Molekyyli massa	32,0 g/mol
Nesteen tiheys	1,1 (vesi = 1)
Kaasun tiheys	1,1 (ilma=1)
Sulamislämpötila	-218,4 °C
Kiehumislämpötila	-183 °C

#### 5.1.2 Käyttö

Happea käytetään teollisuudessa esimerkiksi hitsauksessa ja leikkauksessa, erilaisissa polttoprosesseissa, selluteollisuudessa valkaisevana aineena, otsonin valmistuksessa ja elintarvikkeiden suojakaasupakkaamiseen käytettävissä kaasuseoksissa. Sitä käytetään myös kalanviljelyssä, kasvihuoneiden kasteluvesissä ja jätevesien biologisessa puhdistuksessa. Happea käytetään paljon sairaaloissa. (OVA-ohjeet 2006.)

#### 5.1.3 Toiminta palo- ja räjähdystilanteessa

Happivuodon ylläpitämä palo on kiivas ja vaikeasti sammutettavissa. Tulipalon sammutukseen käytetään kyseessä olevan palavan materiaalin sammutukseen sopivia sammutusaineita.

### Kaasumainen happi

Jos liekki koskettaa happipulloa, se voi revetä kuumentuneen teräksen heikkenemisen johdosta. Pullon kappaleet voivat lentää noin 100 metrin etäisyydelle. OVA-ohjeen (2006) mukaan alue on eristettävä sekä vuoto suljettava, jos sen voi tehdä turvallisesti. Siirretään muut pullot etäämmälle, jos niitä voi käsitellä paljain käsin. Jos pulloja ei voi siirtää, jäähdytetään niitä valelemalla mieluummin tuetulla suihkulla suojatusta paikasta. Lisäksi sammutetaan palo.

## 5.2 Argon, Ar

Argon on väritön, hajuton, mauton ja huonosti reagoiva jalokaasu. Kuten muitakin jalokaasuja, argonia pidettiin pitkään reagoimattomana.

### 5.2.1 Ominaisuudet

Argonin fysikaalis-kemialliset ominaisuudet on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Argonin fysikaalis-kemiallisia ominaisuuksia

Molekyyli massa	18,0 g/mol
Nesteen tiheys	1,21 l/m <sup>3</sup>
Kaasun tiheys	1,69 kg/m <sup>3</sup>
Sulamislämpötila	-189,35 °C
Kiehumislämpötila	-185,85 °C

### 5.2.2 Käyttö

Argon on yleisin jalokaasu, joten sitä käytetään, kun tarvitaan reagoimatonta kaasua. Sen yleisin käyttötapa on hehkulamppujen täytekaasuna. Joitakin reaktiivisia metalleja kuten titaania hitsattaessa tarvitaan argonia suojakaasuna. Lisäksi argonia käytetään plasmahitsauksessa. (AGA 2006.)

### 5.2.3 Toiminta palo- ja räjähdystilanteessa

Argon ei pala, joten ei tarvita mitään erikoisia palontorjuntajärjestelmiä eikä laitteita. Jos on mahdollista, siirretään kaasupullot turvaan. Tarvittaessa kaasupulloja suojataan kuumenemiselta räjähdysvaaran välttämiseksi (AGA 2006).

## 5.3 Vety, H<sub>2</sub>

Vety on väritön ja hajuton, erittäin helposti syttyvä kaasu. Vety on kevein kaikista kaasuista. Suomessa vetyä kuljetetaan ja varastoidaan puristettuna kaasuna. Vety reagoi kiivaasti halogeenien ja useimpien halogeeniyhdisteiden kanssa.

### 5.3.1 Ominaisuudet

Vedyn fysikaalis-kemialliset ominaisuudet on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Vedyn fysikaalis-kemiallisia ominaisuuksia

Molekyyli massa	2,0
Kaasun tiheys	0,07 (ilma = 1)
Sulamislämpötila	-259 °C
Kiehumislämpötila	-253 °C

### 5.3.2 Käyttö

Vetyä käytetään ammoniakksynteesissä, suolahapon ja vetyperoksidin valmistuksessa, orgaanisissa synteeseissä, Sitä käytetään myös jäähdytys-, leikkaus-, hitsaus-, plasmaleikkaus-, suoja- ja pelkistyskaasuna, laboratoriokemikaalina sekä ravintorasvojen valmistuksessa. (OVA-ohjeet 2006).

### 5.3.3 Toiminta palo- ja räjähdystilanteessa

Vety palaa erittäin kuumalla ja lähes näkymättömällä vaaleansinisellä liekillä. Päivänvalossa voi ehkä havaita liekin synnyttämän ilman väreilyn. Liekki havaitaan helpoimmin kiinnittämällä paperia, kangasta tai muuta helposti syttyvää materiaalia kepin päähän ja viemällä se oletetun vuotokohdan lähelle. Vetyliekin kosketus sytyttää materiaalin pa-

lamaan. (OVA-ohjeet 2006.) Liekki saadaan myös helposti näkyväksi käyttämällä esimerkiksi ruokasuolaa, jolloin natrium värjää liekin oranssin väriseksi.(Halmemies 2006.)

Vetyliekin kosketus sulattaa useimmat metallit. Jos liekki koskettaa pulloa tai säiliötä, se voivat revetä jo muutaman minuutin kuumennuksen jälkeen. Pullojen ympäristö eristetään 100 metrin ja säiliön 200 metrin säteellä (OVA-ohjeet 2006). Liekin sammutuksessa voidaan käyttää jauhesammutinta (Haapanen 2006).

## 6 KOKEIDEN TOTEUTUS

### 6.1 Suunnittelu ja yleiset koejärjestelyt

Projektin suunnittelu käynnistyi keväällä 2005, jolloin pidettiin ensimmäinen suunnittelukokous. Tutkittavaksi valittiin kolme maanteillä yleistä kuljetettavaa korkeapaineista kaasupulloa: happi, argon ja vety. Kokeita varten saatiin ajalle 17.- 21.10.2005 käyttöön alue Puolustusvoimien Nurmeksessa sijaitsevalta Sotinpuron harjoitusalueelta, missä kokeet voitiin tehdä turvallisesti ympäristöä vaarantamatta.

Kokeilla päätettiin tutkia yksittäisten kaasupullojen räjähdysaikoja ja heitteiden käyttäytymistä sekä kantamaa tulipalossa. Lisäksi haluttiin selvittää näiden pullojen käyttäytymistä kuljetuskorissa vastaavassa tulipalotilanteessa. Päätettiin myös tutkia, räjähtääkö pullo ulkopuolisen pistoliekin vaikutuksesta. Fysikaalisista suureista haluttiin mitata kaasupullon sisäinen paine sen kuumentuessa ja samalla pullon ulkopinnan lämpötila. Kokeet päätettiin myös kuvata ja tehdä niistä DVD-tallenne, jota voitaisiin käyttää esimerkiksi opetuksen yhteydessä.

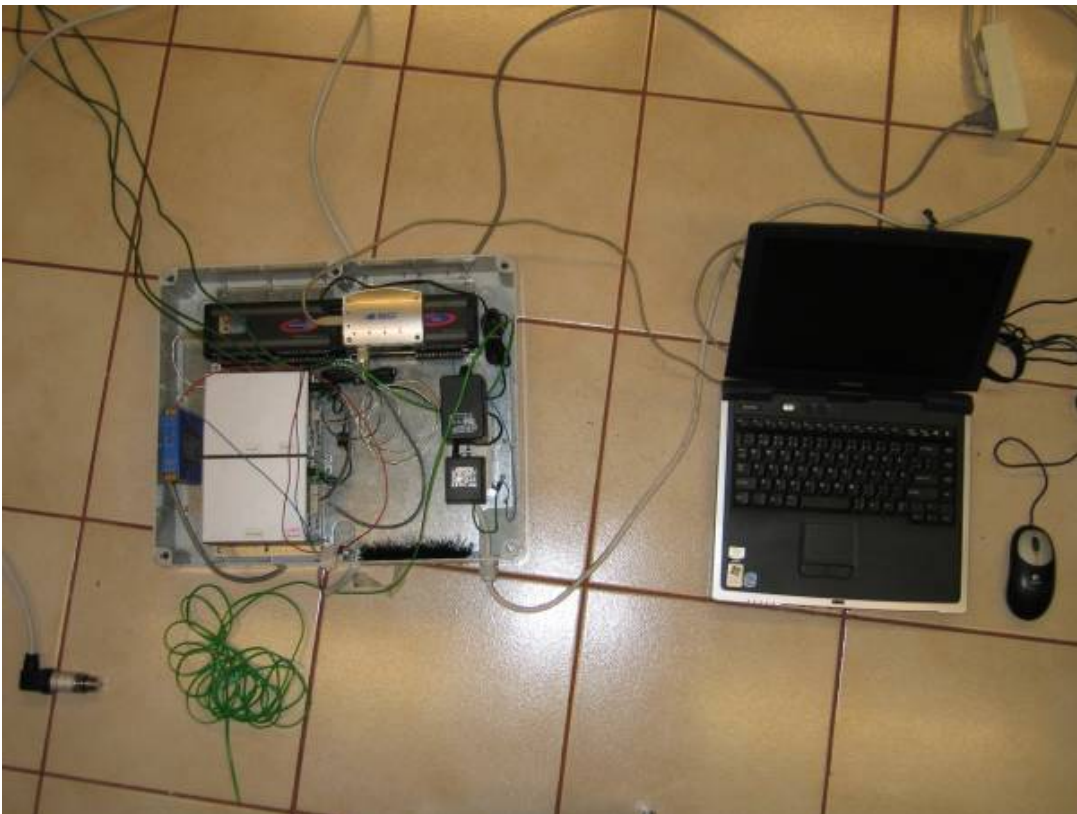
Tulipalon simulointia varten valmistettiin teräsaltat, joihin tutkittavat pullot laitettiin. Altaisiin laitettiin polttoaineeksi polttoöljyä sekä lastulevyä, joita polttamalla pullot saataisiin kuumenemaan riittävästi (Kuva 1). Pullojen kaatumisen ehkäisemiseksi pullot kiinnitettiin rautalangalla altaaseen.

Pullon sisäisen paineen ja pinnan lämpötilan mittaamisessa käytettiin DASYLab-mittausjärjestelmä. Järjestelmä sisältää tietokoneen tarvittavine ohjelmineen, tiedonkeruuyksikön ja mittausanturit ja se on esitetty kuvassa 2. Mittausjärjestelmän toimivuus testattiin ennakkoon Pelastusopistolla.

Kokeissa käytetyt teräksiset korkeapainepullot, OTC-50 (tilavuus 50 litraa, täyttöpaine 200 bar), toimitti Oy AGA Ab. Kaasupullon rakenne on esitetty liitteessä 2.



Kuva 1. Pullo valmiina testausta varten



Kuva 2. Kokeissa käytetty DASYLab –mittausjärjestelmä



Paineen mittausta varten jouduttiin valmistamaan korkean paineen kestävä metalliputki. Sen avulla kaasun paine saatiin johdettua pullon venttiilistä riittävän etäälle liekeistä mittausanturille, jotta anturi ei olisi vaurioitunut kuumuudesta. Lämpötila-anturin johto suojattiin kuumuudelta asettamalla se suojan sisään. Lämpötilan mittauksissa käytettiin termoparia, joka kiinnitettiin pullon yläosan kylkeen kiinni rautalangalla. Paineen mittauksissa saatu järjestelmän tiiviys tarkastettiin ennen mittausta saippualliuoksella. Pullon mittausvarustelu on esitetty kuvissa 3a ja 3b.



Kuva 3a. Lämpötila-anturin ja paineanturille vievän putken kiinnitykset pulloon



Kuva 3b. Paine- ja lämpötila-antureiden johdotukset tiedonkeruuyksikölle

Räjähdysajat (kuumennusastian polttoaineen syttymisestä räjähdysketkeen) mitattiin sekuntikellolla. Alun perin oli tarkoitus käyttää infrapunakameraa pullon pintalämpötilan mittaamiseen. Siitä luovuttiin, koska kamera osoittautui Pelastusopiston harjoitusalueella tehdyissä ennakkotesteissä siihen soveltumattomaksi (liekit häiritsivät mittaus- ta).

Mittauspaikalle paineen- ja lämpötilan mittausjärjestelmää varten rakennettiin betonilaatoista suojabunkkeri. Sinne tietokone ja tiedonkeruuyksikkö sijoitettiin mittausten ajaksi (Kuva 4.).





Kuva 4. Mittauksia varten pystytetty ”kenttälaboratorio”.

Tarkkailupaikaksi valittiin noin 700 metrin päässä mittauspaikasta sijaitseva kukkula (Kuva 5.). Yksi miehittämätön kamera sijoitettiin noin 70 metrin päähän ja toinen noin 400 metrin päähän mittauspaikasta.



Kuva 5. Kokeiden tarkkailupaikka.

## 6.2 Kokeiden käytännön toteutus ja havainnot

Varsinaiset kokeet päästiin aloittamaan aamulla 18.10., jolloin oli 5 astetta pakkasta ja selkeää. Toisen kokeen aikana lämpötila oli +2 °C . Muiden kokeiden aikana lämpötila oli muutaman asteen plussan puolella. Sää pysyi poutaisena ja tuuli oli heikkoa kaikkien mittausten aikana. Viimeiset mittaukset tehtiin 20.10.

Kokeet suoritettiin esitettyssä järjestyksessä. Tulokset on esitetty kootusti liitteen 3. taulukoissa. Liitteissä 3 - 6 on esitetty kuvia pullojen kappaleista niiden räjähdettyä.

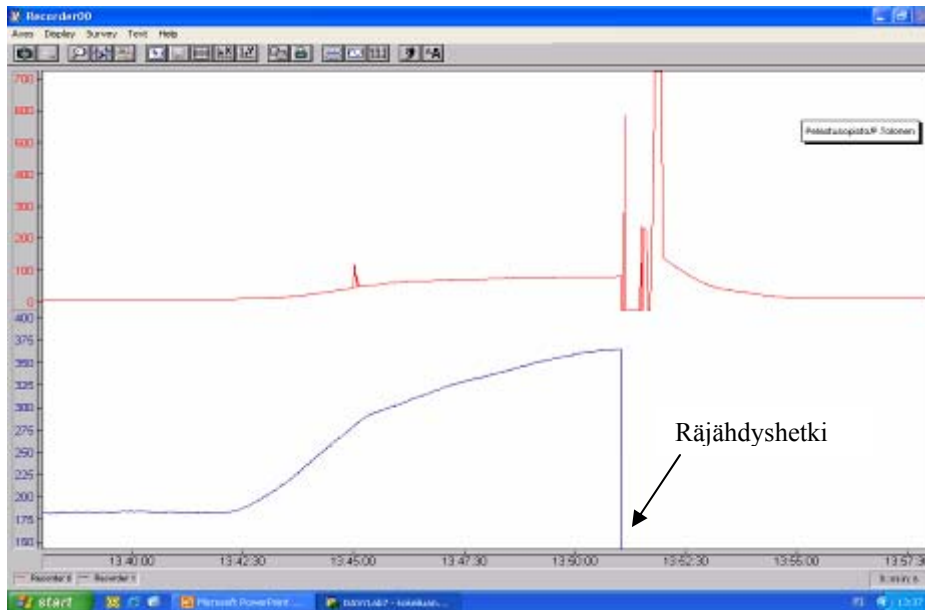
### **Koe 1. Happipullon kuumentaminen**

- Mitattiin
  - o pullon räjähdysaika: 12 min 35 s
  - o heitteiden kantama: pienet 250 m , isot 100 m

### **Koe 2. Happipullon kuumentaminen**

- Mitattiin
  - o pullon räjähdysaika: 9 min 20 s
  - o heitteiden kantama: pienet 60 m, isot 90 m
  - o pullon maksimipaine: 360 bar
  - o pullon maksimipintalämpötila: 80 °C
- Pullo kaatui 5 min kuluttua sytytyksestä; pullon alaosa jäi liekkeihin.
- Räjähdyksessä pullo lähti vaakatasossa pullon yläosan osoittamaan suuntaan kyntäen soramaata kymmenen senttimetrin syvyydeltä.
- Pintalämpötilamittauksen tuloksiin on suhtauduttava varauksellisesti.

Kuvassa 6. on esitetty mitattu pullon paine ja pintalämpötila kuumennuksen aikana. Pintalämpötilakäyrään on suhtauduttava varauksellisesti, koska liekit koskettivat aika-ajoin mittaussanturia ja kontakti sen ja pullon pinnan välillä saattoi olla ainakin ajoittain huono.



Kuva 6. Happipullon paine (alempi käyrä) ja lämpötila (ylempikäyrä) kuumennuksen aikana

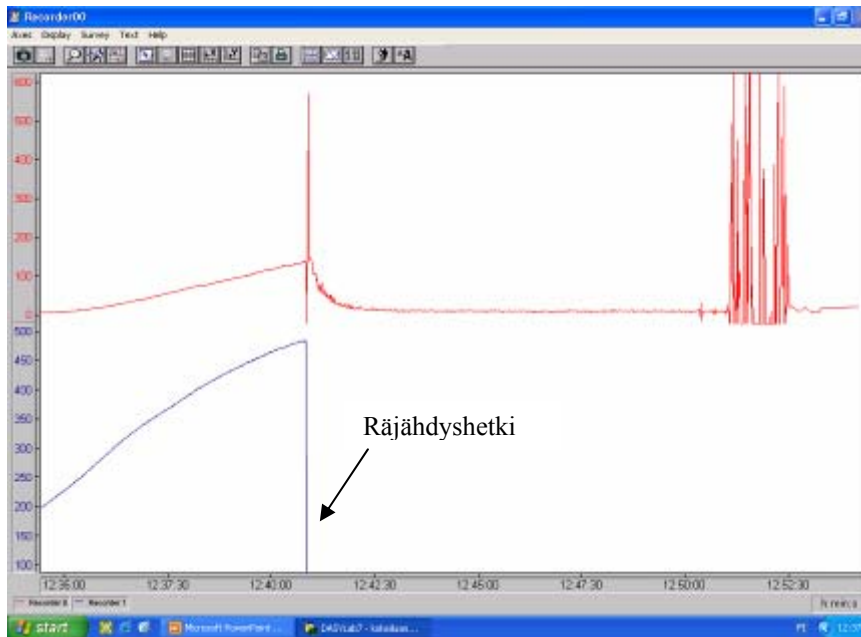
### Koe 3. Argonpullon kuumentaminen

- Pullo kaatui eikä räjähtänyt (pieni osa pohjasta jäi liekkeihin).

### Koe 4. Argonpullon kuumentaminen

- Mitattiin
  - o pullon räjähdysaika: 7 min 30 s
  - o heitteiden kantama: pienet 350 m, isot 300 m
  - o pullon maksimipaine: 490 bar
  - o pullon maksimipintalämpötila: 140 °C.

Kuvassa 7. on esitetty mitattu pullon paine ja pintalämpötila kuumennuksen aikana. Pintalämpötilakäyrään on tässäkin mittauksessa suhtauduttava varauksellisesti.



Kuva 7. Argonpullon paine (alempi käyrä) ja pintalämpötila (ylempi käyrä) kuumennuksen aikana

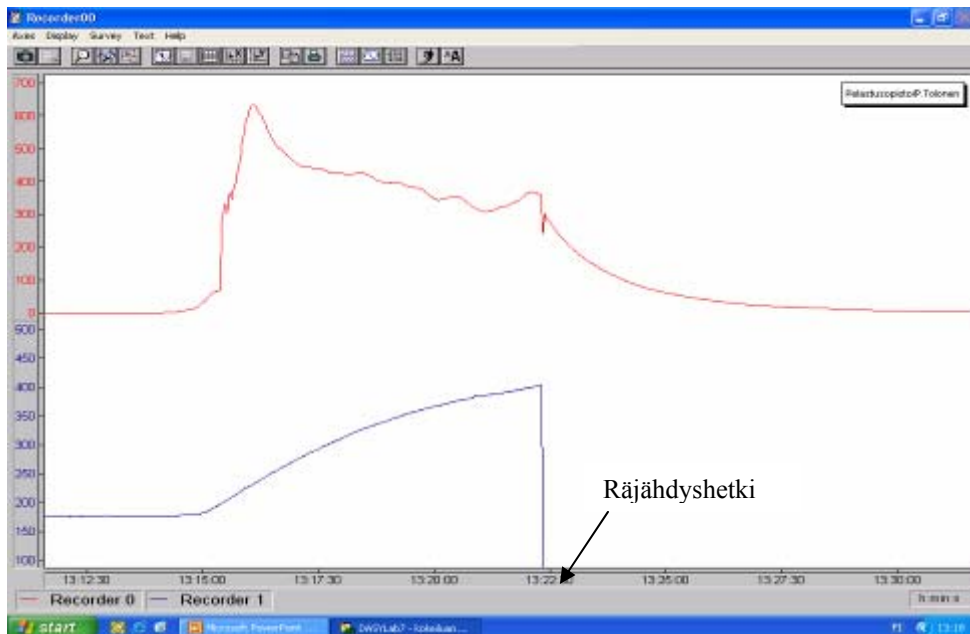
### Koe 5. Vetypullon kuumentaminen

- Mitattiin
  - o pullon räjähdysaika: 6 min 40 s
  - o heitteiden kantama: pienet (ei löytynyt), isot 100 m.
- Pullon alaosasta repesi noin 50 cm pituinen pala, itse pullo lensi vain 3 m.

### Koe 6. Vetypullon kuumentaminen

- Mitattiin
  - o pullon räjähdysaika: 8 min 10 s
  - o heitteiden kantama: pienet (ei löytynyt), isot 100 m
  - o pullon maksimipaine: 400 bar
  - o pullon yläosan maksimipintalämpötila: 640 °C (laski ennen räjähdystä 380 °C:een).
- Pullon alaosasta repesi noin 50 cm pituinen pala, itse pullo lensi vain 4 m.
- Lämpötila-arvoihin on suhtauduttava varauksellisesti.

Kuvassa 8. on esitetty mitattu pullon paine ja pintalämpötila kuumentamisen aikana. Pintalämpötilakäyrään on tässäkin mittauksessa suhtauduttava varauksellisesti.



Kuva 8. Vetypullon paine (alempi käyrä) ja pintalämpötila (ylempikäyrä) kuumentamisen aikana

### Koe 7. Argonpullon kuumentaminen lappeellaan

- Mitattiin
  - o pullon räjähdysaika: 8 min 40 s
  - o heitteiden kantama: pienet 70 m, isot 150 m.
- Testattiin
  - o räjähdysuoja: suojaan osui pullon alusjakkaran jalka, mikä tunkeutui sisuksen läpi muttei läpäissyt suojuksen toista puolta, suojaan ei tullut tämän kokeen aikana muita silmin havaittavia vaurioita.
- Räjähdysuoja sijoitettiin pullosta 20 metrin päähän, ja pullon yläosa suunnattiin kohti suojaa. Pullon kappaleiden osumisesta suojaan ei voi sanoa mitään varmaa. Pääosa niistä joka tapauksessa meni suojan ohi.

### Koe 8. Täyden pullokorin (6 happi- ja 6 argonpulloa) kuumentaminen

- Mitattiin
  - o pullojen räjähdysaika: 6 min 21 s (argonpullo)

- heitteiden kantamaa:      pienet (ei löytynyt), isot 80 m.
- Testattiin
  - korin ja pullojen sinkoutumista ympäristöön: räjähtäneen argonpullon pääosa lensi 80 m:n päähän, muut pullot sinkoutuivat kokonaisina 10 metrin säteelle. Neljä pulloa oli vielä pääosin korissa, kori oli vaurioitunut pahasti ja kaksi sen seinää oli sinkoutunut paikaltaan (ei löytynyt) (Liite 4).

### **Koe 9a. Pistoliekillä (propaani) happipullon (50 l) yläosan kuumentaminen**

- Mitattiin
  - happipullon räjähdysaika: ei räjähtänyt
- Testattiin
  - pistoliekin lämmön riittävyyttä räjäyttämään happipullon: ei riittänyt.
- Propanipullon etäisyys happipullosta oli 50 cm, varoventtiili avautui

### **Koe 9b. Pistoliekillä (propaani) happipullon(50 l) keskiosan kuumentaminen**

- Mitattiin
  - happipullon räjähdysaika: ei räjähtänyt
- Testattiin:
  - pistoliekin lämmön riittävyyttä räjäyttämään happipullon: ei riittänyt
- Propanipullon etäisyys happipullosta 50 cm, varoventtiili ei avautunut

Pullon sisällä olevan kaasun räjähdyslämpötilan arvioimiseen käytetään hyväksi reaali-kaasun tilanyhtälöä (kaava 20). Yhtälössä tarvittavan moolimäärän laskemiseksi voidaan käyttää NIST:n tiedostoja (NIST 2006, Lautkaski 2006).

NIST:n tiedostosta otettuna kaasujen moolimääräksi tulevat seuraavat arvot: argonille 470 mol, hapelle 474 mol ja vedylle 383 mol. Halutun räjähdyslämpötilan laskemisessa on käytetty hyväksi mittauksissa saatuja kaasun paineen arvoja.

Van der Waals'in tilayhtälö (kaava 20) pystyy ideaalikaasulakia (kaava 18) paremmin ennustamaan räjähdyslämpötiloja tehtyjen kokeiden korkeissa räjähdyspaineissa. On todettava, että van der Waals'in yhtälökään ei toimi hyvin, kun paine nousee ja ollaan lähellä kriittisiä arvoja. Taulukossa 5 on esitetty testattujen kaasujen kriittiset paineet ja kaavalla 2 lasketut mitattuja räjähdyspaineita vastaavat räjähdyslämpötilat.



Taulukko 5. Testattujen kaasujen kriittisiä paineita, mitattu räjähdyspaine ja siitä laskettu räjähdyslämpötila (Halmemies 2006).

Kaasu	Räjähdyslämpötila	Räjähdyspaine	Kriittinen paine
Argon	276 C	490 bar	486 bar
Happi	122 C	360 bar	508 bar
Vety	262 C	400 bar	130 bar

Laskennallisten räjähdyslämpötilojen poikkeaminen mitatuista pintalämpötiloista selittyneen ainakin osittain termoparin ja kaasupullon välisistä kontaktihäiriöistä.

Mitatut pintalämpötilat ovat alhaisempia kuin laskennalliset räjähdyslämpötilat argonin ja hapen osalta, mutta antavat kuitenkin jotain suuntaa. Vetypullon kohdalla on todennäköistä, että liekit ovat lämmittäneet lämpötila-anturia, jolloin selittyy jopa 650 C:n lämpötila. Liekin lämpötila on kyseisissä järjestelyissä ollut noin 1000 °C. (Halmemies 2006)

Teräksinen kaasusäiliö alkaa haurastua nopeasti lämpötilan noustessa yli 500 °C:n, minkä jälkeen pullo voi revetä muutamassa minuutissa (Lautkaski 2006).

Raja-arvona 200 barissa täytetylle happipullon rikkoutumiselle pidetään 350 °C:n lämpötilaa (Björnström 2002).

## 7 SAATUJEN KOETULOSTEN TARKASTELU

Mitatut pullojen pintalämpötilat kuumennuksen aikana kuvaavat lähinnä liekin ja pullon yläosan ilman lämpötilaa, sillä mittauksessa käytettyjen termoparien johtojen päitä ei saatu kunnolla kiinnitettyä pullojen pintaan eikä niitä saatu eristettyä liekeiltä. Johdon päät sijoitettiin heti pullon kaulan alaosaan. Kuitenkin voidaan olettaa, että pullon ulkopinnan lämpötila on lähellä mitattua arvoa anturin korkeudella. Hapen osalta mittaustulos voidaan katsoa merkityksettömäksi, koska pullon kaaduttua vain pohjaosa jäi liekeihin ja anturi oli näin astian ulkopuolella.

Happipullon kaatuessa on mahdollista, että paineputken ja pullon liitokseen tuli vuoto. Mittauskäyristä (Kuva 6) voidaan nähdä, että happipullon painemaksimi on pieni verrattuna argonilla ja vedyllä saatuun arvoon. Paineikäyrässä ei kuitenkaan näy mitään selkeitä epäjatkuvuuskohtia, mikä viittaa siihen, ettei mahdollinen paineen vuoto ole ollut ainakaan nopea. Argonilla ja vedyllä saadut paineenmittauskäyrät (Kuvat 7 ja 8) vaikuttavat realistisilta ja niiden maksimit räjähdyshetkellä suuruusluokaltaan samanlaisia kuin kyseisten pullojen valmistajan ohjeissakin on.

Heitteiden etäisyyksiä määritettäessä jouduttiin turvautumaan myös silmämääräiseen arvioon, koska kaikkia heitteitä ei löydetty maastosta. Tällöin virheeksi 300 metrin matkalla tulee helposti 50 - 100 metriä (kirjoittajan arvio).

Pullot sirpaloituivat arvion mukaan 2 - 4 osaan ja kaikkia kappaleita ei löydetty maastosta. Räjähdyksissä syntyneitä kappaleita on esitetty liitteessä 4. Pienet heitteet lensivät silmämääräisen arvion mukaan jopa 350 metrin päähän räjähdyspaikasta ja suuriakin 300 metrin vaiheille. Nykyisissä OVA- ja TOKEVA-ohjeissa turvaetäisyydeksi tulipalotilanteessa hapelle ja vedylle on määritetty 100 metriä. Tehdyissä kokeissa räjähtäneen happipullojen heitteitä lensi 250 metrin ja vetypullon 100 metrin paikkeille. Argonia ei mainita OVA-ohjeissa, mutta pullokuljetuksissa on yleensä mukana myös argonpulloja. Sen heitteiden kantamat olivat tehdyissä kokeissa enimmillään 300 - 350 metriä. Tehdyt havainnot heitteiden kantamista vahvistavat käsitystä, että kaasupullo räjähtäessään lähtee pituusakselinsa suuntaan, jolloin pystyssä olevan pullon kappaleet lentävät pidemmälle kuin kaatuneen pullon.

Räjähdysajat sytytyksestä olivat mittauksissa 6 min 21s - 12 min 35 s. Räjähdysaikoja ei ohjeissa ole mainittu, ja ne tietysti riippuvatkin aina kulloisestakin palotilanteesta.

Lyhin räjähdysaika saatiin pullokorikokeessa, jossa räjähtänyt pullo sisälsi argonkaasua. Tässä kokeessa myös kori rikkoontui ja sen osat kuten muut pullokin sinkoutuivat lähiympäristöön. Pullokorien yhteydessä ulkoilma ei pääse viilentämään pulloja samalla lailla kuin yksittäisten pullojen kohdalla, ja tästä aiheutunee lyhin räjähdysaika. (Hallemies 2006.) Pistoliekkikokeet osoittivat, ettei liekin antama lämpömäärä välttämättä riitä ainakaan ulkotilassa (kokeiden aikana lämpötila +4 °C) nostamaan kaasupullon painetta riittävästi, jotta se räjähtäisi.

## 8 YHTEENVETO JA SUOSITUKSET

Tutkimuksen päätarkoitus oli selvittää tietyille, kuljetusten näkökohdista katsottuna kolmelle yleiselle kaasulle, hapelle, argonille ja vedylle räjähdysajat ja heitteiden kantamat tulipalotilanteessa. Saatuja tuloksia on tarkoitettu käyttää ohjeistuksessa ja neuvonnassa. Kokeiden määrä oli käytännön rajoitusten takia varsin pieni, ja siksi jotkut asiat vaativat vielä lisätutkimuksia.

Tutkimuksen perusteella nykyisten virallisten ohjeiden mukaiset varoetäisyydet eivät ole riittäviä, mikäli halutaan täysin varmistua ympäristön turvallisuudesta tulipalotilanteessa. Varoetäisyyksien tarkentaminen vaatisi vielä lisää kokeita, mutta jo näidenkin kokeiden perusteella maksimikantamat voivat olla 300 - 350 metriä. Toisaalta on ongelmallista lisätä varoetäisyyksiä niin suuriksi, ettei niitä käytännössä pystytä järkevästi soveltamaan. (Lautkaski 2006.)

Pullon ulkopinnan ja räjähdyslämpötilan selvittäminen vaatisi vielä tarkempia lisätutkimuksia. Tämä olisi tarpeellista, koska nämä koetulokset antaisivat viitteitä siitä, että pullon rikkoutumiseen johtava lämpötila voi olla alhaisempi kuin esimerkiksi nyrkkisääntönä käytetty aiemmin mainittu 350 °C:n lämpötila.

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin teoreettisen tiedon ja käytännön välistä yhteensopivuutta melko pinnallisesti. Näin pienillä koemäärillä sitä ei tietysti kovin syvällisesti voida tehdä, ja lähinnä siihen saatiin taustatietoa, mitkä seikat vaikuttavat esimerkiksi heitteiden kantamiin.

Täydellä pullokorilla tehty koe osoitti, että vaikka se johtaisi siinä vain yksittäisenkin pullon räjähtämiseen, vaaraa voi heitteiden lisäksi aiheuttaa pullojen sinkoileminen lähiympäristöön. Tämä seikka on tietysti huomioitava tulipalotilanteessa.

Korkeapaineisten kaasupullojen käyttäytyminen eri onnettomuustilanteissa vaatisi lisätutkimuksia. Yhtenä tutkimuksen kohteena voisi olla pullojen käyttäytyminen tilanteessa, jossa pullon venttiili katkeaa. Lisätutkimista vaatisi myös se, miten suuri määrä kaasupulloja käyttäytyy tulipalotilanteessa. Nyt tutkittiin yksittäisellä kokeella täyden pul-

lokorin pullojen käyttäytymistä tulipalotilanteessa. Mutta entäpä jos kyseessä onkin koko kuorma pullokoreja, kuten normaalisti kuljetuksessa on.

Pullojen räjähdysajat osoittautuivat lyhyiksi verrattuna aiemmin esimerkiksi asetyleenipulloilla tehtyihin kokeisiin. Tämä tarkoittaa sitä, että pahimmissa tapauksissa turvalliseen oleskeluun välittömästi onnettomuuspaikan lähellä ei ole kuutta minuuttia pitempää aikaa palon alkamisesta. Tämäkin seikka on tietysti otettava huomioon pelastustoiminnassa.

Mikäli halutaan kehittää räjähdysuojaa pelastustoiminnan tarpeisiin, vaatisi se lisää kokeita. Räjähdyksissä syntyvää painetta ja lämpöä vastaan käytetty suoja kesti hyvin, mutta ennen kaikkea sen antamaa suojaa erikokoisilta ja -muotoisilta heitteiltä pitäisi testata enemmän.

Tilanne, jossa pistoliekki kuumentaa kaasupulloa, ei johda vähäisen lämmitystehon takia helposti räjähdykseen, ainakaan lyhyen ajan kuluessa. Lisäkokeilla voisi tutkia tilannetta, jossa käytettäisiin asetyleeniliekkiiä tai olisi useita pistoliekkejä. Ilmalla rikastetun nestekaasun pistoliekin lämpötila on noin 1500 °C, kun asetyleeniliekillä lämpötila voi nousta jopa 3000 °C:een. (Halmemies 2006.)

Tämän tyypisten kokeiden tekeminen edellyttää riittävän suurta maa-aluetta, missä kokeet voidaan tehdä turvallisesti. Puolustusvoimien harjoitusalue Nurmeksen Sotinpurossa soveltuisi nyt ja aiemmin saatujen kokemusten mukaan erinomaisesti edellä mainittujen jatkokokeiden suorituspaikaksi.

## LÄHTEET

AGA 2005. Teollisuuskaasut. Tuoteluettelo.

Antila, A-M., Karppinen, M., Leskelä, M., Mölsä, H. ja Pohjakallio, M. 2003. Tekniikan kemia. EDITA. Helsinki.

Baum, M.R. 1988. Disruptive Failure of Pressuer Vessels: Preliminary Design Guidelines for Fragment Velocity and the Extent of Hazard Zone. Journal of Pressure Vessel Technology. May 1988, Vol 110.

Beskjutning av acetylengasflaskor inomhus. 1995. Karlstad. Räddningsverket.

Beskjutning av acetylengasflaskor inomhus 2. 1996. Karlstad. Räddningsverket.

Björnström H. ja Setterwall, T. 2002. Beskjutning av acetylengasflaskor. Karlstad. Räddningsverket.

Halmemies, S. 2006. TkT Sakari Halmemiehen tiedonanto, 30.5.2006, Lahden ammatikorkeakoulu.

Laitinen H. ja Jylhä, A. 1999. Nestekaasupullot tulipalossa. Opinnäytetyö. Kuopio. Pelastusopisto.

Lautkaski, R. 2006. TkL Risto Lautkasken tiedonanto, 29.5.2006, VTT.

Mikkonen, K. 1996. Kaasupullojen vaarattomaksi tekeminen ampumalla. Opinnäytetyö. Kuopio. Pelastusopisto.

NIST 2006. National Institute of Standards and Technology.

<http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>. (29.5.2006)

OVA 2006. Onnettomuuden Vaaraa aiheuttavat Aineet-turvallisuusohjeet (OVA-ohjeet). <http://www.occuphealth.fi/internet/ova/index.html>. (24.7.2006)

Salopuro, R. 1999. Lääkehapen palo- räjähdysvaara. Opinnäytetyö. Kuopio Pelastusopisto.

Wikipedia. <http://fi.wikipedia.org/wiki/Luokka:Kemia>. (14.3.2006)

## LIITE 1: KOKEESEEN OSALLISTUJAT

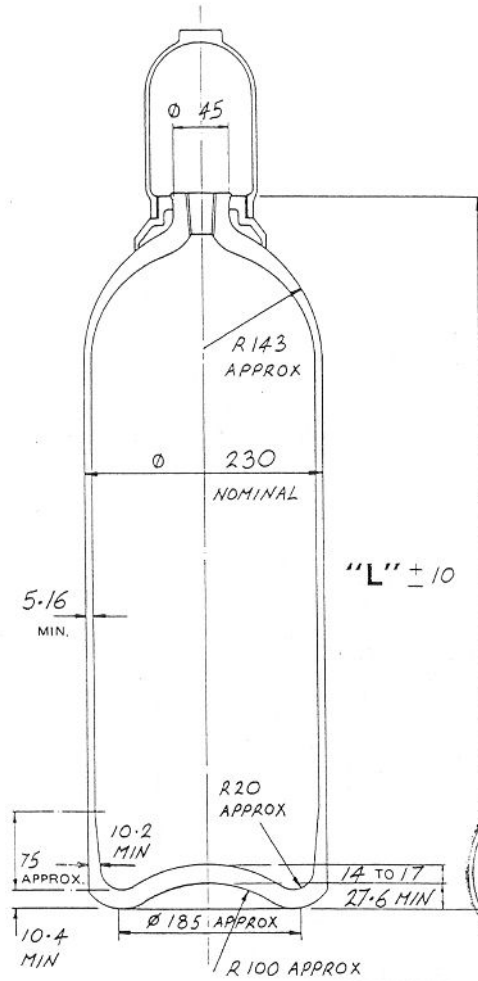
Sotinpurolla kokeissa mukana olleet; vasemmalta Markku Jeskanen, Kari Koivistoinen, Pertti Tolonen, Olli Haapanen ja Risto-Matti Raatikainen



LIITE 2: KAASUPULLON RAKENNE (AGA 2006)

# TI CHESTERFIELD

## SEAMLESS STEEL CYLINDER FOR AIR GASES



SPECIFICATION

To SWEDISH GAS CYLINDER CODE.

MATERIAL 2233 - 07 TO SIS 14 22 33

ULT. TENSILE 960/1080 N/MM<sup>2</sup>.

YIELD / RPO.2 850 N/MM<sup>2</sup> MIN.

ELONGATION MIN. 14% ON L = 5.65 √A  
 CHARPY IMPACT VALUE AT -40°C  
 60 J/CM<sup>2</sup> MIN. AVERAGE VALUE  
 50 J/CM<sup>2</sup> MIN. INDIVIDUAL

TEST PRESSURE 300 BAR

WORKING PRESSURE 200 BAR

CAP TO DRG. NO. 46175P

COLLAR TO DRG. NO. 46174P REVI REF2

COLLAR THREAD Ø 80 X 11 T.P.I.

CYLINDER NECK THREAD

SCREWED TO DIN 477

Ø 27.8 MAJOR

TAPER 3 IN 25, 14 T.P.I.

TO GAUGE NO. 14

BRINELL HARDNESS : 285 MIN  
 325 MAX

HEAT TREATMENT : OIL QUENCH 840-920°C  
 TEMPER 550-650°C

MANUFACTURED FROM HOT PIERCED BILLET.



REF.	APPROX WATER CAPACITY LITRES	NOMINAL GAS CAPACITY M <sup>3</sup>	LENGTH "L"	NOMINAL WEIGHT CYLINDER & COLLAR KG
1	50	10	1462	57.4
2	40	8	1194	48.5
3				
4				

REV.	DATE	CHANGE
DRAWN	M.K. BURROWS.	DATE 12.6.87.

DRG NO. 48146 P

**TI CHESTERFIELD**

Reg. no. 166341 England. Reg. office. Derby Road, Chesterfield, Derbyshire.  
 A Member of the TI Group. © TI CHESTERFIELD LTD.



## LIITE 3: YHTEENVETO KOKEIDEN 1-9 TULOKSISTA

## Kokeet 1-8

Koe	räjähdysaika	Sirpaloitusminen	pullon maksimipaine [bar]	pullon maksimipintalämpötila [°C]	heitteiden kantama	muuta
1. (O <sub>2</sub> )	12 min 35 s	noin 4 osaan			pienet 250 m, isot 100 m	
2. (O <sub>2</sub> )	9 min 20 s	noin 4 osaan, kaula ja venttiili irtosivat	360	80	kaula ja suojus 60 m, venttiili 25 m	pullo kaatui alussa, perä jäi liekkeihin
3. (Ar)	ei räjähtänyt					
4. (Ar)	7 min 30 s	noin 4 osaan	490	140	iso osa 300 m, pieni osa 350 m, venttiilin suoja 30m	alusjakkaran jalka lensi 350 m päähän
5. (H <sub>2</sub> )	6 min 40 s	2-3 osaan			pullo 3 m, iso pala 100 m	pullon alaosasta repesi pala/paloja 50 cm: matkalta
6. (H <sub>2</sub> )	8 min 10 s	2-3	400	630	pullo 4 m, iso pala 100 m	pullon alaosasta repesi pala/paloja 50 cm: matkalta
7. (Ar)	8 min 40 s	noin 3 osaan			iso pala 150 m, pieni 70 m, kaularengas 80 m	pullo oli kyljellään yläosa kohti räjähdysuojaa, etäisyys 20 m, pullon alusjakkaran jalka tunkeutui suojan sisuksen läpi ja pysähtyen kuitenkin vastakkaisen puolen seinämämateriaaliin
8. kori (6O <sub>2</sub> +6Ar)	6 min 21 s (Argonpullo)	noin 4 osaan			pääosa Argonpullosta 80 m, muut pullot kokonaisuina 5 m:n säteelle, 4 pysyi korin paikalla	pullokorin kaksi seinää hajosivat täysin

## Koe 9 Nestekaasupistoliekkin (propaani) vaikutus happipulloon (50l)

Koe	räjähdysaika	muuta
9.a liekki kohdistettuna pullon kaulaan	ei räjähtänyt	varoventtiili avautui
9.b liekki kohdistettuna pullon keskiosaan	ei räjähtänyt	varoventtiili ei auennut

## LIITE 4: RÄJÄHDYKSISSÄ SYNTYNEITÄ KAPPALEITA



## LIITE 5: PULLOKORI ENNEN RÄJÄHDYSTÄ JA RÄJÄHDYKSEN JÄLKEEN

