

ONNETTOMUUSTUTKINTARAPORTTI

Dnro 4434/06/2003

AvestaPolarit Stainless Oy:n Tornion terästehtaan
sulatolla 19.9.2003 sattunut kolmen työntekijän
hengen vaatinut happilinjan tulipalo

Tiivistelmä

Sisällysluettelo

1	Johdanto	3
1.1	Yleiskuvaus onnettomuudesta	3
1.2	Turvatekniikan keskuksen onnettomuustutkinta	3
1.3	Toiminnanharjoittaja	4
2	Tapahtumapaikan ja laitoksen kuvaus	4
2.1	Onnettomuuspaikka	4
2.2	Sulaton toiminnallinen tilanne	5
2.3	Terästehtaan happijärjestelmä	5
2.3.1	Rakenne	5
2.3.2	käyttö	6
2.3.3	Luvat	7
2.4	Terässulaton laajennus	7
2.5	Turvallisuusselvitysvelvoite	8
2.6	Turvallisuusanalyysien käyttö	8
3	Onnettomuus	9
3.1	Onnettomuustapahtuman kuvaus	9
3.2	Tehtyjä havaintoja	10
4	Sulkuventtiili	12
4.1	Rakenne	12
4.2	Venttiili	12
4.3	Käyttöhistoria	13
5	Happiputkiston suunnittelu ja käyttöönotto	13
5.1	Happijärjestelmän suunnittelu	13
5.2	Happijärjestelmän käyttöönotto	15
5.3	Ohjeet ja koulutus	16
6	Pohdinta	16
6.1	Johdanto	16
6.2	Syttymissyyt	16
6.3	Syttymismekanismien tarkastelu	18
6.3.1	Hiukkasten törmäys	18
6.3.2	Itsesyttyminen	19
6.3.3	metallipalojen syttyminen ja leviäminen	21
6.3.4	Putkistopalojen syttyminen	22
7	Palon syttymissy	23
8	Ehdotukset vastaavien onnettomuuksien ehkäisemiseksi	25
9	lähdeluettelo	27
10	Liitteet	28

1 JOHDANTO

1.1 Onnettomuustapahtuma

AvestaPolarit Stainless Oy:n Tornion tehtaalla sattui 19. syyskuuta 2003 kolmen työntekijän hengen vaatinut raju tulipalo. Onnettomuus sattui perjantaina aamupäivällä muutamaa minuuttia vaille klo 11. Onnettomuuspaikka sijaitsi terästehtaan sulatolla.

Sulaton kolmannessa kerroksessa sijaitsevassa venttiilihuoneessa oli tapahtunut happilinjan äkillinen rikkoutuminen. Tapahtuma aiheutti räjähdysmäisen tulipalon venttiilihuoneessa, jolloin tilassa olleet kolme henkilöä menehtyivät heti. Palo oli voimakas ja katkenneesta happilinjasta purkautuvan puhtaan hapen johdosta lämpötila nousi korkeaksi siten, että myös metallirakenteet paloivat paikoin. Palossa venttiilihuoneen lattia-, seinä- ja kattorakenteet vaurioituivat ja osin romahtivat. Palo levisi osin myös rakennuksen sisäkattoon ja kattoon. Itse tulipalo saatiin varsin pian hallintaan, kun hapen tulo loppui ja palokunta aloitti sammutustoimet. Hapen tulo saatiin loppumaan sulkemalla käsin happivarastolla putkilinjojen venttiilit. Sammutuksen onnistumista edesauttoivat myös palo-osastoinnin pitävyys ja palamattomat kattorakenteet.

1.2 Onnettomuuden tutkinta

Onnettomuuden tapahduttua 19.9.2003 terästehtaalla Torniossa onnettomuustutkintakeskus päätti asettaa tutkintalautakunnan tutkimaan tapahtunutta räjähdysmäistä tulipaloa suuronnettomuuden vaaratilanteena. Tutkintalautakuntaan nimettiin jäseniä onnettomuustutkintakeskuksesta, työsuojeluhallinnosta, palo- ja pelastustoimesta sekä valtion teknillisestä tutkimuskeskuksesta (VTT).

Turvatekniikan keskus asetti myös omasta henkilöstöstään muodostetun kolmihenkisen ryhmän selvittämään onnettomuuden syytä. Tutkintaryhmään ovat kuuluneet turvatekniikan keskukselta Urho Aarnivuo, Taimo Tihinen ja Tapani Valanto.

Molempien ryhmien jäseniä oli jo tapahtumapäivän iltana onnettomuuspaikalla käynnistämässä tutkintaa.

Poliisi aloitti tapahtumasta lisäksi omat tutkimuksensa kuolemantapausten johdosta.

Onnettomuustutkimusten käynnistyttyä turvatekniikan keskuksen nimeämän ryhmän ja onnettomuustutkintakeskuksen edustajien kesken pidettiin kokous, jossa kartoitettiin siihenastisia tuloksia sekä jäljellä olevia epäselvyyksiä ja tutkimustarpeita. Tässä yhteydessä todettiin, että turvatekniikan keskuksen ryhmä saa tehtyjen henkilöhaastattelujen keskeiset tulokset käyttöönsä eikä tee uudelleen henkilöhaastatteluja onnettomuustapahtumassa mukana olleille. Samoin todettiin, että onnettomuuskohta happiputkistosta venttiileineen oli toimitettu VTT:lle Helsinkiin tutkimuksia varten. Edelleen todettiin myös, että VTT:ltä on tilattu laajempi

tutkimus/ selvitys happionnettomuuksista ja niihin mahdollisesti vaikuttavista tekijöistä. Myös VTT:n selvitysten tulokset sovittiin toimitettaviksi turvatekniikan keskuksen ryhmän käyttöön.

Turvatekniikan keskuksen tutkijaryhmä katsoi oman työnsä aikana, että onnettomuustutkintakeskuksen ryhmän työ on laajempi ja kattavampi eikä se näin ollen teetä omia tutkimuksia tai erillisiä lisäselvityksiä. Myös tutkinnan aikana ilmenneet tarpeet varmistua todennäköiseksi arvioitujen onnettomuussyiden oikeellisuuksista tehtaalla tehtävin kenttäkokein jätettiin onnettomuustutkintakeskuksen ryhmän ja VTT:n harkittaviksi ja mahdollisesti toteutettaviksi. Tätä tutkimusllostusta kirjoitettaessa ei myöskään VTT:n lopullinen raportti palaneen happiputken ja venttiilin laboratoriotutkimuksista ole vielä ryhmän käytössä.

Ryhmä on siten rajannut selvityksensä kattavuutta lupaviranomaisen kannalta keskeisimpiin onnettomuuden syihin.

Turvatekniikan keskuksen onnettomuustutkintaryhmä kävi tapahtumapaikalla Torniossa kolme kertaa. Kaikilla kerroilla tavattiin laajahko joukko sulaton, kunnossapidon, suunnittelun, suojelutoimen ja/tai Polargas Oy:n henkilöstöä. Koko-uksissa käytiin läpi onnettomuustapahtumaa, laitteiston suunnittelua, käyttöönottoa, koulutusta, menettelytapoja jne. Ryhmä tutustui myös laitosten sijaintiin tehdasalueella. Tehtaalta saatiin lisäksi pyydettyjä piirustuksia ja selvityksiä. Onnettomuustutkintakeskuksen kautta saatiin tutkijoiden ja poliisin laitteistoista ja tapahtumapaikasta ottamia valokuvia.

1.3 Toiminnanharjoittaja

Tässä raportissa on käytetty toiminnanharjoittajasta onnettomuusajankohdan mukaista nimeä AvestaPolarit Stainless Oy. Nykyisin toiminnanharjoittajan nimi on Outokumpu Stainless Oy.

AvestaPolarit Stainless Oy valmistaa ruostumatonta terästä Tornion kaupungin Röytässä. Tehdasalueella toimii myös Outokumpu Chrome Oy, joka valmistaa ferrokromia. Lisäksi tehdasalueella toimivat ilmakaasuja tehtaille toimittava Polargas Oy sekä nestekaasuja toimittava Tehokaasu Oy.

Terästehtaan muodostavat sulatto, kuumavalssaamo, kylmävalssaamo sekä metallurginen laboratorio ja tehdaspalvelu.

Sulatto tuottaa ruostumatonta ja haponkestävää terästä ns. valuaihioiksi valettuna. Raaka-aineina käytetään teräsromua, ferrokromia ja muita ferroseoksia sekä nikkeliä.

Ilmakaasuja käytetään prosessissa lähinnä apuaineina ja nestekaasuja lämmön tuottamiseen.

2 TAPAHTUMAPAIKAN JA LAITOKSEN KUVAUS

2.1 Onnettomuuspaikka

Onnettomuuden tapahtumapaikka sijaitsi terästehtaan sulatolla sen kolmannen kerroksen venttiilihuoneessa. Sulatto on noin 2 hehtaarin laajuinen rakennus, osin yksikerroksinen osin viisikerroksinen. Happilinjat tulevat sisään mainitun venttiilihuoneen kautta kuljettuaan sitä ennen ulkona, putkisillalla, sulaton kattorakenteiden yläpuolella.

Sulatolle tulee kaksi happilinjaa, joista toisessa kulkee raakahappi ja toisessa puhdas happi. Onnettomuus tapahtui puhtaan hapen linjalla. Putken halkaisija on n. 300 mm ja paine putkessa käytön aikana n. 32-35 bar. Hapenkulutuksen ollessa pysähtyneenä paine lähenee virtauksesta riippuen 35 bar, joka on happilaitoksen lähtöpaine.

2.2 Sulaton toiminnallinen tilanne

Terässulatto oli tapahtuma-aikaan pysäytettynä vuosihuoltoa varten. Terässulaton tuotantolinja 2 oli otettu käyttöön vuonna 2002. Nyt oli menossa sen toimintaan liittyvän puhtaan hapen linjan ensimmäinen huoltoseisokki. Seisokissa tehtävät venttiilien vaihdot oli päätetty antaa linjan rakentaneen Kalse Piping Oy:n tehtäväksi. Ensimmäiset venttiilien vaihtotyöt olikin tehty ennen onnettomuutta, samalla viikolla, mutta nämä työkohteet sijaitsivat virtaussuunnassa onnettomuudessa tuhoutuneen venttiilin jälkipuolella.

Huoltotöitä varten puhtaan hapen linja oli tyhjennetty ja tehty paineettomaksi avaamista varten. Onnettomuuskohdan venttiili oli po. linjan pääsulkuventtiili sulatolla kyseisen seisokin aikana siten, että venttiilin tulopuolella oli hapen täysi paine. Sulun pitävyyttä oli varmistettu laittamalla putkeen sokea laippa venttiilin jälkeen.

Onnettomuustilan kautta kulkee myös mainittu raakahapen linja sekä typpi-, argon-, nestekaasu- ja paineilmaputkia. Onnettomuuden yhteydessä tilassa olleen nestekaasuputken eristeet paloivat osittain ja paineilmaputki rikkoontui.

2.3 Terästehtaiden happijärjestelmä

2.3.1 Rakenne

Tornion tehtailla happea valmistetaan ns. VSA-laitoksessa, joka on molekyylliseulaan perustuva laitos. Siinä tuotetaan ns. raakahappea, jonka happipitoisuus on n. 96 %. Mainittu laitos on tehdasalueen vanhempi yksikkö. Hapen käyttötärpeen lisääntyä on alueelle aikanaan rakennettu myös erillinen kaasuasema, jossa varastoidaan ja käsitellään hapen lisäksi myös nestemäistä tyyppiä ja argonia. Puhdasta happea jaetaan Tornion terästehtaiden alueella vain tältä mainitulta kaasuasemalta.

Puhdas happi toimitetaan tehdasalueelle po. asemalla olevasta nestemäisten hapen varastointi- ja höyrystysyksiköstä. Nestemäinen happi tuodaan kaasuasemalle auto- ja junakuljetuksin. Laitoksella tulevat kuormat puretaan aluksi nestemäisen

hapen kylmäsäiliöön. Nestemäisen hapen maksimi varastomäärä on 1200 tonnia. Kaasuasemalla on yksi n. 1000 m³ nestehappisäiliö (paine enintään 0,2 bar) ja kolme 100 m³ kaasumaisen hapen säiliötä sekä pumppauslaitteet ja höyrystimet.

Ennen käyttöön johtamista nestemäinen happi pumpataan varastosäiliöstä vesihaudehöyrystimeen, missä se höyrystyy ja lämpiää haluttuun lämpötilaan. Jokaisella kaasulla on kaksi pumppua, joista toinen on käytössä ja toinen varalta. Happea varten on kaksi höyrystintä.

Laitteistossa on ennen tehdasalueelle johtavaa runkoputkistoa kolme n. 100 m³ kaasumaisen hapen paineellista puskurisäiliötä. Säiliöiden tarkoituksena on tasata virtausvaihteluita sekä toimia tasaavana reservinä ennen kuin höyrystimien kapasiteettia ehtii reagoida mahdollisiin kulutuksen vaihteluihin.

Höyrystetty kaasumainen happi johdetaan AvestaPolarit Stainless Oy:n käyttökohteisiin putkilinjaa myöten. Putkilinjan pituus happilaitokselta sulatolle on n. 700 m. Samasta linjasta jaetaan happea myös muille alueen käyttölaitoksille, kuten muuraushalliin, valuun ja korjaamolle.

Ohjauksjärjestelmä valvoo siirtoputkistossa vallitsevaa painetta ja ohjaa pumppuja siten, että haluttu painevaatimus täyttyy, mutta myös siten, ettei paine ylitä asetettua maksimiarvoa. Siirtoputkistossa vallitsee paine, joka vaihtelee 32-35 bar välillä. Puskurisäiliöiden tehtävänä on antaa automaattiselle säätöjärjestelmälle aikaa reagoida sekä ottaa vastaan höyrystimessä oleva kaasu, jos kulutus vähenee äkisti.

Puhtaan hapen meno runkoputkistoon voidaan sulkea kahdesta kohtaa, n. 100 m päässä happilaitokselta on linjan pääsulkuventtiili, lisäksi jokaisen puskurisäiliön yhteydessä on sulkuventtiili. Happilinjän pääsulkuventtiili on sijoitettu ylös putkisillalle, joten sen käyttö esim. onnettomuustilanteissa edellyttää mainitun matkan kulkemista ja nousua ylös putkisillalle. Puskurisäiliöiden yhteydessä olevat venttiilit ovat kunkin säiliön kohdalla ja noin 3-4 metrin korkeudessa. Venttiilien käyttö edellyttää tikapuiden noutamista ja kiipeämistä niille, jotta venttiiliin pääsee käsiksi. Mitään kiinteitä työtasoja tai kulkusiltoja ei ole olemassa.

2.3.2 Käyttö

Kaasuaseman ja happijärjestelmän laitteistot omistaa AvestaPolarit Stainless Oy. Laitoksen käytöstä ja laitteistoista vastaa kuitenkin Polargas Oy:n henkilöstö, joka huolehtii laitteiden ja aseman toiminnasta yhtiöiden välisen palvelusopimuksen mukaisesti.

Kaasuasemalla työskentelee päivätyön puitteissa yksi Polargasin palveluksessa oleva henkilö. Hän huolehtii aseman kunnosta sekä kuormien tilauksesta ja purusta, lisäksi hän toimii samalla käytönvalvojana.

AvestaPolarit -yhtiön keskeytymättömässä kolmivuorotyössä työskentelevä kattilalaitoksen käyttöhenkilöstö valvoo lisäksi muina aikoina säiliöalueen toimintaa. Hälytykset menevät tällöin kattilalaitoksen (energialaitoksen) valvomoon. Heidän tehtävänä on ilmoittaa havaitsemistaan häiriöistä ja vuodoista ym. poikkeavista tilanteista laitoksen hoitajalle. Käytännössä tavanomaisia poikkeamia ja häiriötilanteita tällöin hoitaa energialaitos ja sen kunnossapito, jotka pyytävät ”apua” tarvitessaan Polargasin henkilöiltä.

Tehdasalueen happijärjestelmän kunnossapidosta oli yhtiöiden välillä sovittu siten, että Polargas Oy toimii kaasuaseman kautta kulkevien nesteytettyjen ilmakehien vastaanottajana sekä huolehtii säiliöautojen ja vaunujen purusta AvestaPolarit Stainless Oy:n säiliöihin, kuljettajien opastuksesta ja purkaustoimintojen valvonnasta.

Sopimukseen sisältyvät myös laitteiden kunnossapitopalvelut. Polargas Oy huolehtii kaasuasemalla ennakkohuolloista, paineastiatarkastuksista, laitteiden korjauksista, vaadittavista vuosihuolloista sekä varaosatarpeen ehdottamisesta AvestaPolarit -yhtiölle. Polargas Oy huolehtii myös alueen kaasulaitteiden yleisistä käyttöpäalveluista. Tällä on tarkoitettu kaasun riittävyden varmistamista ja käyttöilanteiden ennakoimista. Samoin siihen on sisällytetty varastoalueen suunnitelmien tarkistus ja kommentointi ennen niiden käyttöönottoa.

Tehdasalueella olevan hapen runkoputkiston suhteen vastuurajat on asetettu siten, että Polargas Oy huolehtii varastoalueesta. Runkoputkistot varastoalueelta tuotanto-osastojen ulkoseiniin ovat AvestaPolarit Stainless Oy:n tehdaspalvelun vastuulla. Tehdaspalvelun energia/sähköryhmän vastuulla on runkoputkiston ja siihen liittyvien laitteiden kunnossapito.

Terässulaton vastuualueen rajan happiputkistojen osalta on päätetty alkavan terässulattorakennuksen seinistä (kuorirakenteista), joiden ulkopuolella vastuu on edellä todetun mukaisesti tehdaspalvelulla ja sisäpuolella terässulattolla. Lisäksi on todettu, että terässulaton organisaatiolla ei ole oikeutta rakentaa tai tehdä muutoksia putkistoihin. Tällöin ne tilataan muilta toimijoilta, joilla on ns. oikeudet (paineastialuvat).

2.3.3 Luvat

Ns. teollisuuskemikaaliasetuksen (59/1999) perusteella sellainen laitos, jossa varastoidaan happia 200 ja 2000 tonnin välillä olevia määriä kuuluu ryhmään, jolle edellytetään laadittavaksi suuronnettomuuksien ehkäisemiseksi tarkoitettuja toimintaperiaatteita.

Teollisuuskemikaaliasetuksen voimaantullessa Polargas Oy on tehnyt olemassa olleesta laitoksesta, kaasuaseman happijärjestelmästä ns. toimintailmoituksen. Tähän turvatekniikan keskus on vastannut päätöksellään 5402/36/2001. Laitoksen muutos ja happijärjestelmien laajennus on puolestaan käsitelty luvassa 105/36/2002.

AvestaPolarit Stainless Oy on taas puolestaan ns. turvallisuusselvitystason laitos sekä palavien, että terveydelle ja ympäristölle vaarallisten kemikaalien määrien perusteella.

Happi-, häkä- ja nestekaasuputkistot on rakennettu AvestaPolarit Stainless Oy:n, AvestaPolarit Chrome Oy:n ja Polargas Oy:n tehtaiden alueelle laajana verkostona. Happiputkistot on rakennettu paineestialainsäädännön tarkoittaman A-ryhmän putkistomääräysten mukaisesti.

Turvatekniikan keskuksen vuoden 2002 elokuussa tehdyssä terässulaton laajennuksen käyttöönottotarkastuksessa on todettu, että putkiston on tehnyt Kalse Piping Oy. Putkistoa koskevat asiakirjat oli koottu omaksi kansioksi.

Terässulaton laajennuksessa rakennetun tuotantolinjan 2:n putkistot suunnitteli ja rakennutti Tupla H:n projektiorganisaatio, jossa oli erillinen putkistojen rakentamisesta vastannut ryhmä.

2.4 Terässulaton laajennus vuonna

AvestaPolarit Stainless Oy:n Tornion tehtailla on ollut menossa merkittävä tehtaiden laajennushanke ns. Tupla-projekti. Hanke on tarkoitus saada päätökseen vuoden 2004 aikana.

Muutoksen yhteydessä vuonna 2002 rakennettiin aiemman terässulaton rinnalle, toinen sulatuslinja, joka sisälsi myös onnettomuudessa rikkoontuneen happiputkiston. Uusi sulatuslinja sisälsi mm. seuraavat pääprosessilaitteet aputoimintoi-neen:

- valokaariuuni 2, jossa romu sulatetaan valokaarella,
- ns. AOD -konvertteri, jossa poistetaan hiili sulasta panoksesta,
- senkkauuni 2, jossa täsmätään sulan teräksen koostumus analyysien perustella ja säädetään lämpötila seuraavaa vaihetta varten,
- jatkuvavalukone 2, jossa sula teräs valetaan aihioiksi.

Prosessissa käytetään hähkäkaasua polttoaineena nestekaasun rinnalla romun kuivatukseen. Happea käytetään pääasiassa AOD-konvertteriprosessissa ja lisäksi kunnossapidossa sekä eräissä polttimissa. Natriumhydroksidin (lipeä) vesiliuosta käytetään puolestaan valukoneen jäähdytysveden pH:n säätöön.

Muutoksen myötä vaarallisten kemikaalien määrät (happi, nestekaasu ja hähkä) lisääntyivät vain putkiston sisältämällä määrällä ja lipeän määrällä (3 m³ säiliö).

Sulaton muutoksen yhteydessä tapahtuneet vaarallisten aineiden määriin ja käsittelylaitteistoja koskevat muutokset on käsitelty turvatekniikan keskuksen 17.5. 2002 antamassa päätöksessä nro 2045/36/2002.

2.5 Turvallisuusselvityksen tiedot

Teollisuuskemikaaliasetuksen mukainen Tornion tehtaiden turvallisuusselvitysvelvoite perustuu tehtailla olevien palo- ja räjähdysvaarallisten sekä terveydelle ja ympäristölle vaarallisten kemikaalien määriin. Päätösten mukaisesti tehtaalla voi mm. olla enintään 1200 t nestekaasua (F+), 80 m³ fluorivetyhappoa (T+), 50 m³ rikkidioksidia (T). Myös kylmävalssaamon sekahappo (1438 m³) ja regenerointihappo (420 m³) ovat myrkyllisiä (T). Lisäksi huomiota on kiinnitetty erityisesti hähkäkaasuun (F+,T). Hapen (O) maksimimäärä tehdasalueella on suhteellisen pieni. Selvityksen mukaan happea varastoidaan lähinnä kaasupulloissa (4,7 m³) tehdasalueella. Sen lisäksi happea on jakeluputkissa jokin määrä.

Hapen varastointi tapahtuu muun toiminnanharjoittajan (Polargas Oy) toimesta ja tehdas on sen käyttäjä, jolloin hapen määräksi tehdasalueella (AvestaPolarit Stainless Oy:n osuus) on laskettu vain putkistoissa (ja pulloissa) oleva määrä.

Päähuomio vaaran arvioinnissa on kohdistunut etenkin nestekaasun pallosäiliövarastointiin ja nestekaasuun yleensä.

Suurempaa huomiota ovat saaneet myös kylmävalssaamon vaaralliset kemikaalit ja hähkäkaasun käyttö yleensä.

2.6 Turvallisuusanalyysien käyttö

Tornion tehtaiden vaarallisia kemikaaleja koskevaan turvallisuusselvitykseen sisältyvässä liitteessä 13 on lueteltu Tornion tehtailla tehty turvallisuusanalyysit. Missään kohdassa tehtyjä turvallisuus/ riskianalyysijä ei mainita happea tai happijärjestelmiä. Turvatekniikan keskuksen vaatimissa turvallisuusselvitystä koskevissa lisäselvityksissä todetaan, että hapen vaaroja on kartoitettu kaasuasemalla happijärjestelmän laajennuksen yhteydessä marraskuussa vuonna 2001. Analyysimenetelminä oli käytetty potentiaalisten ongelmien analyysia ja poikkeamatarkastelua. Analyysin tekivät AvestaPolarit Stainless Oy:n ja Polargas Oy:n henkilöt yhdessä ulkopuolisen asiantuntijan johdolla. Analyysien kattavuus rajoittui tietävästi vain itse kaasuasemalla oleviin happilaitteistoihin.

Muutoin yhtiö on turvallisuusselvityksessä kertonut käyttävänsä vaarojen tunnistuksessa ja seurausten arvioimiseksi seuraavia menetelmiä: poikkeamatarkastelu, toimintovirheanalyysi, potentiaalisten ongelmien analyysi. Muitakin menetelmiä saatetaan käyttää, jos se tapauskohtaisesti on perusteltua.

Sulaton tuotantolinjan 2 rakentamisen yhteydessä on sulaton happijärjestelmien muutoksille tehty turvallisuusanalyysi kahdessa vaiheessa, kesällä 2001 ja helmikuussa 2002.

Sattuneen onnettomuuden perusteella voidaan todeta, että kyseinen analyysi ei ole ollut riittävän kattava/syvällinen ajatellen putkilinjan rakentamista, sen käyttöä ja käyttöön liittyvää toimintaa.

Edellä selostetusta huolimatta ei sulaton happilaitteistoille ja niiden käytölle ollut tehty turvallisuusanalyysijä alun perin rakentamisen liittyen. Samoin tietävästi happiasemalta sulatolle ja muille tuotantoyksiköille johtaville happilinjoille ei ollut tehty turvallisuusanalyysijä tai mahdollisiin onnettomuustilanteisiin liittyviä seuraustarkasteluja.

3. ONNETTOMUUS

3.1 Onnettomuustapahtuman kuvaus

Tapahtumassa menehtyi kolme työntekijää, jotka olivat kaikki tapahtumapaikalla, venttiilihuoneessa tai sen välittömässä läheisyydessä. Tarkoituksena oli ollut avata puhdasta happea sulatolle tuovan happilinjan pääsulkuventtiili seuraavan putkijakson paineellistamiseksi.

Onnettomuustutkintakeskuksen tutkijoiden haastattelujen perusteella tehtävää olivat olleet suorittamassa sulaton työnjohtaja ja laitoksessa seisokkiin liittyneitä muutos- ja korjaustöitä tehneen urakoitsijan työnjohtaja. Miehet olivat menneet yhdessä avaamaan molempien sulatolle tulevien happilinjojen pääsulkuventtiilejä, jotka oli seisokin ajaksi suljettu. Sulkeminen oli varmistettu venttiilien jälkeen asennetuilla ns. sokeilla laipoilla. Tehtävä oli aloitettu avaamalla ensin raakahappilinjan venttiili. Ennen venttiilin avaamista oli ns. sokealaippa poistettu ja korvaava rengas asetettu paikoilleen. Sen jälkeen oli sulkuventtiilin jälkeinen putkisto paineistettu hapella avaamalla sulkuventtiilin ohittavassa pienempi läpimittaisessa putkessa oleva ns. ohitusventtiili. Paineiden tasaannuttua samoiksi venttiilin

kummallakin puolella oli avattu varsinainen pääsulkuventtiili. Puhtaan hapen linjan osalta oli kaikesta päätellen ollut tarkoitus menetellä vastaavalla tavalla. Työhön osallistuneiden menehdyttyä onnettomuudessa, ei ole tarkkaan tiedossa mitä oltiin yksityiskohdissaan tekemässä ja mitä tapahtui. Jälkeenpäin on todettu, että puhtaan hapen linjasta ns. sokealaippa oli poistettu ja tilalle tuleva rengas asetettu paikoilleen. Pääsulkuventtiilin ohitusputken sulkuventtiili oli kiinniasennossa.

Onnettomuustutkintakeskuksen tutkijoiden tekemien haastattelujen perusteella ilmeni, että avaamisessa mukana olleelle kunnossapitoyhtiön työnjohtajalle oli eräs yhtiön työntekijä soittanut kysyäkseen neuvoa omaan työhönsä. Keskustelun päätteeksi työjohtaja oli pyytänyt työntekijää tuomaan putkipihdit, koska jokin (se) liukui. Työntekijä oli vienyt pyydetty pihdit venttiilihuoneeseen ja poistunut paikalta, jonka jälkeen lähes välittömästi oli kuulunut voimakasta pamausta/ räjähdystä muistuttava ääni, jota seurasi voimakas kohina. Tätä puolestaan seurasi pölyn ja savun täyteinen tulipalo sulaton hallissa.

Jälkeenpäin on todettu, että kolmannen onnettomuudessa menehtyneen henkilön on täytynyt tulla paikalle ”sattumalta” juuri ennen onnettomuutta pihtejä viemässä olleen työntekijän poistuttua paikalta, koska hän ei tavannut paikalla käydessään muita henkilöitä kuin venttiilejä avaamassa olleet molemmat työnjohtajat. Onnettomuudessa menehtyneiden lisäksi kukaan ei loukkaantunut. Onnettomuushetkellä sulatolla oli ulkopuolisia urakoitsijoita ja AvestaPolarit –yhtiön omia henkilöitä seisokkiin liittyvissä asennustöissä.

Valtion teknillisessä tutkimuskeskuksessa tehdyissä laboratoriotutkimuksissa todettiin pääsulkuventtiilin karaan kuuluvan käsipyörän sokan olevan poikki. Tehdyissä laskelmissa voitiin arvioida sokan tilalla olleen ruuvin voivan mennä poikki, kun venttiilin käsipyörästä väännetään voimakkaasti. Tutkimuksissa havaittiin myös, että venttiilin karan päässä oli neljät tai viidet pihtien leukojen puristusotteesta syntyneet jäljet. Lisäksi todettiin venttiilin sulkulaipan asentoa ilmaisevan osoittimen jääneet asentoon, joka vastaa venttiilin vähäistä avausta (n. 9°).

Edellä todetuista seikoista syntyy se käsitys, että raakahappilinjan avauksen jälkeen työnjohtajat olivat siirtyneet onnettomuuslinjan eli puhtaan hapen linjan venttiilin avaukseen, mutta tällöin oli paineen tasaus työvaiheena ennen pääsulkuventtiilin avausta jäänyt tekemättä. Tämän seurauksena pääsulkuventtiiliä oli yritetty avata n. 35 bar paine-eroa vasten. Avausyrityksissä oli onnistuttu raottamaan venttiiliä vähän. Avautumisen seurauksena muodostuneeseen venttiilin rungon ja laipan väliseen rakoon oli syntynyt voimakas happivirtaus.

3.2 Tehtyjä havaintoja

Venttiilin avaamistoimenpiteiden yhteydessä käynnistynyt onnettomuus on ollut mitä ilmeisimmin varsin äkillinen ja hyvin nopea. Kaikki kolme onnettomuudessa menehtynyttä löydettiin itse tapahtumapaikalta tai sen välittömästä yhteydestä. Onnettomuudessa avattavana ollut venttiili syttyi palamaan ja paloi osin jäljettömiin. Venttiilin rungon ja sen alapuolisen putken puhkipalaminen johti paineellisen (n. 35 bar) hapen purkautumiseen tehdastilaan ja putken katkeamiseen. Katkeamisen seurauksena reaktivoimat työnsivät putkea ylöspäin vinoon asentoon,

johon se jäi. Happivirtaus jatkui kunnes venttiilit happilaitoksella saatiin suljettua. Tehdashallin sisälle syntyi eräänlainen pystyuuni, jossa happi ja liekit kohdistuivat kohti alempia tasoja ja hallin pohjaosaa kuumien savukaasujen noustessa puolestaan liekkien ympärillä ylös kohti kattorakenteita.

Syntyneessä palossa tuhoutui venttiilin lähistöllä olleita seinärakenteita, kaapeleita ym. Puhtaan hapen vapautuminen mahdollisti myös erilaisten paikalla olleiden teräsrakenteiden kuten kaiteiden, kävelytasojen ja kannatinrakenteiden palon. Tuhoutuneen venttiilin lähellä kulkenut raakahappilinja säilyi tapahtumassa kuitenkin ehjänä.

Selvityksissä todettiin, että tulipalossa happea kului ainakin kolmen puskurisäiliöllisen verran eli yhteensä 300 m^3 , joka vastaa NTP-olusuhhteissa n. 10500 m^3 . Lisäksi höyrystimet olivat kaasuttaneet tapahtuman aikana n. 4 tonnia nestemäistä happea. Edelleen pitkä, kaasumaisen hapen tehdasalueella oleva siirtoputkiston linja sisälsi paineistettua happea. Linjan halkaisija on DN 300 ja pituus n. 700 m. Tällöin happea on arviolta vapautunut normaalipaineisena ehkä n. 2000 m^3 vielä lisää. Katkenneesta putkesta voidaan näin ollen karkeasti arvioida virranneen happea n. $40\,000 \text{ m}^3$ (normaalipaineisena).

Onnettomuuspaikalta löydettiin mainitut (avausyryyksissä käytetyt) putkipihdit. Paikalle oli pudonnut myös sulkuventtiilin laippa, joka oli ilmeisesti irronnut itse venttiilirakenteista putken katketessa ja noustessa rekyylin vaikutuksesta ylöspäin.

Palon jälkeen todettiin happilinjän ja venttiilin palaneen varsin rajoitetulta alueelta. Putkiston osalta palo keskittyi avattavana olleeseen venttiiliin ja sen alapuolella olleeseen lyhyehköön putken osaan. Venttiilin runko-osa oli palanut osin ole-mattomiin ja sen alapuolella myös putkilinja oli palanut puhki ja katkennut kokonaan. Välittömästi venttiilin yläpuolella, virtauksen tulosuunnassa putken seinämässä oli myös läpipalanut kohta.

Venttiililautasesta oli myös paikoitellen palanut osia pois. Kaasun tulosuunnasta katsottaessa lautaseen on palanut yksi syvä alue ja joitain kohtia vastakkaiselta laidalta. Katsottaessa taustapuolelta venttiililautasta lautanen on palanut akseleita läheltä olevilta alueilta ja vähiten keskiosistaan.

Itse venttiilin osalta todettiin, että siitä puuttui käsipyörä, josta venttiiliä alennusvaihteen kautta käytettiin. Käsipyörää ei ole myöhemminkään löydetty ja sen on oletettu hävinneen palossa. Venttiilin akselin sisältä sen sijaan löydettiin katkenneen sokan (ruuvi) kappale, josta on päätelty sen katkenneen venttiilin avausyrytyksen aikana.

Venttiilin alennusvaihteistoon liittyneen asennon osoittimen perusteella on päätelty venttiilin olleen raollaan muutaman asteen verran.

Onnettomuuspaikan jälkeisessä putkistossa on parinkymmenen metrin päässä sulkuventtiilien välissä paineanturi, joka automaatiojärjestelmän tallenteiden mukaan on osoittanut kohonnutta painetta. Koska paineanturi kuitenkin sijaitsee tapahtumaan nähden suljettujen venttiilien välissä, sen on päätelty ennemminkin reagoineen tulipalon aiheuttamaan lämpötilan nousuun kuin osoittavan putkiston olleen jossain määrin paineistunut.

Onnettomuuden tutkinnan aikana pyrittiin selvittämään mm. happiputkiston puh-

distusmenettelyjä ja -käytäntöjä tehtaalla linjojen käyttöönoton yhteydessä. Putki-
linjojen nykyisen puhtausasteen varmistamiseksi päätettiin linjoissa tehdä kame-
ravaunulla (endoskoopilla) kuvauksia happilinjoiden sisällä. Happilinjoi-
ja kuvattiin varsin laajasti onnettomuuspaikalta sekä eteenpäin kohti käyttökohteita että hapen
tulosuuntaan kohti happilaitosta ja sen varastoja. Kuvauksia tehtiin myös van-
hemmassa, ehjänä säilyneessä raakahapen käytössä olevassa linjassa.

Kuvauksissa todettiin, että putkistossa on varsin laajalti edelleen pölyä siten, että
kuvauksessa käytetyn kameravaunun jäljet näkyvät selvästi putkiston sisältä ote-
tuissa kuvissa.

Onnettomuuspaikan läheltä, kohti käyttökohteita otetuissa kuvissa näkyy runsaah-
kon pölyn lisäksi myös karkeampaa ainesta erilaisten murujen ja lastujen muodos-
sa. Kuvauksissa löytyi jopa yksittäinen hiomalaikan tai vastaavan kappale. Näin
ollen on mahdollista, että puhtaan hapen putkilinjassa on ollut ennen onnetto-
muuspaikkaa myös vastaavanlaista materiaalia kuin sen jälkeen nyt todettiin ole-
van. (On oletettavissa, että itse onnettomuustapahtumassa putkilinja ennen onnet-
tomuuskohtaa puhdistui ulospuhallusilmiön vaikutuksesta huomattavasti siellä
mahdollisesti olleista epäpuhtauksista).

Onnettomuustutkinnan aikana käydyissä keskusteluissa ilmeni, että venttiileistä
on kuultu käyttötapahtuminen aikana ns. soimista. Se on tulkittu käyttötilanteisiin
liittyväksi resonanssi-ilmiöksi.

Keskusteluissa ilmeni myös sisäisenä tietona, etteivät kaikki aina suinkaan käytä
putkistojen venttiilien ohitusputkia/venttiilejä, vaan käytännössä on saatettu ai-
emminkin avata pääventtiili suoraan ja antaa mahdollisten paine-erojen tasaantua
sitä kautta. Poiketen tehtaalla käytettävistä muista ilmakaasuista tyydestä ja ar-
gonista, on tällaisen menettelyn aiheuttama vaara hyvin erilainen hapen kohdalla.
Kuten jäljempänä ilmenee, ei tehtaalla ole ollut erityistä järjestelmällistä ohjeis-
tusta hapestä ja sen vaaratekijöistä, vaan sen käytön osaaminen ja ymmärtäminen
on keskeisesti ollut osa ammattitaitoa.

4. SULKUVENTTIILI

4.1 Rakenne

Onnettomuudessa tuhoutunut venttiili oli ranskalaisen Sapag-yhtiön tuote. Venttii-
li on rakenteeltaan lautasventtiili, jossa on polymeeritiiviste (PTFE) ja joka on
varmistettu metallirenkaalla tiiviyden takaamiseksi myös tulipalotilanteissa. Vent-
tiilin runko-osa on tehty ruostumattomasta teräksestä, samoin kuin venttiilin lau-
tanen. Venttiililautasen ylä- ja alapuoliset akselit on tehty myös vastaavan tasoi-
sesta materiaalista. Venttiilissä on lisäksi tiivisteiden yhteydessä sovitin/ lukitus-
renkas, joka koottaessa laitetaan viimeiseksi pitämään varsinaisia tiivisteitä pai-
koillaan. Lisäksi venttiilin yhteyteen on asennettu alennusvaihteisto, johon liike-
voima johdetaan käsipyörältä akselilla. Käsipyörä on paikoillaan akselin päässä ja
voiman akseliin välittää akselin läpi kulkeva sokka.

Venttiilin alennusvaihteisto on voideltu tavallisilla yleisesti käytössä olevilla voitelu-
öljyillä. Venttiililautasen akselin tiivisteenä on käytetty lähinnä venttiilin pesää

ruostumatonta terästä ja PTFE, alempana (ulompana) on myös grafiittitiiviste. Venttiilin runko on kiinnitetty tulevaan ja lähtevään putkeen tavanomaisesti laip-paliitoksilla ja pulteilla. Liitoksissa on käytetty normaaleja tiivisteitä, joita yhtiös-sä muutoinkin käytetään happiputkistossa.

4.2 Venttiili

Venttiili oli ostettu tehtaalle suomalaisen välittäjän kautta. Venttiiliä ei ole suunniteltu erityisesti hapelle tai nimenomaisesti kaasukäyttöön, vaan se on teollisuuteen tarkoitettu yleisventtiili. Venttiilit tilataan happilaitteistoihin ns. happipestyinä eli niille on pitänyt jo valmiiksi tehdä kaikki rasvat poistava pesu. Pesun jälkeen venttiilit pakataan siten, että ne pysyvät mahdollisimman puhtaina.

Onnettomuusventtiili on tyypiltään lautasventtiili, jonka merkintä on JHP FS ja nimelliskoko DN 300 sekä sen nimellispaine oli PN 40. Merkintä FS kertoo siitä, että venttiili on suunniteltu ns. fire safe –venttiiliksi, jolloin sen on tarkoitus säilyttää tiiveytensä tulipalossakin venttiilin sisällä olevan palamattoman metallisen lisätiivisteen ansiosta.

Onnettomuustutkinnan yhteydessä venttiilin rungossa todettiin olevan merkintä PN 20. Kysyttäessä valmistajalta selvitystä, miksi venttiilin kilvessä ja todistuksissa oli kuitenkin merkinnät 40 bar valmistajan vastaus oli, että merkintä valumuottiin on vain jäänyt vaihtamatta. Selvityksen mukaan venttiili oli aluksi suunniteltu enintään 20 bar paineelle, mutta myöhemmin oli todettu, että saman venttiilirungon mitoitus riittää 40 bar saakka.

Valmistajalle esitetystä selvityspyynnöstä kysyttiin myös venttiilin testaamisesta erityisesti happikäyttöä varten. Vastauksessa todettiin, ettei venttiiliä ole testattu erityisesti happikäyttöä varten. Se oli koestettu standardin ISO 5208 mukaisesti tyypellä. Mainittu standardi käsittelee lähinnä venttiilien tiiviyyden tarkastamista ja määrittelee suurimman hyväksyttävän vuodon suuruuden.

4.3 Käyttöhistoria

Putkisto, jossa venttiili sijaitsi, oli rakennettu noin vuotta aiemmin. Rakentamisen ja käyttöönoton yhteydessä venttiiliä oli tiettävästi käytetty jonkin verran. Merkin-töjä kokeiluista ja varmistuksista ei ollut olemassa. Tapahtuman aikaan menossa ollut seisokki oli tiettävästi venttiilin ensimmäinen varsinainen käyttötilanne asen-tamisvaiheen jälkeen. Happilinjaa ei tiedetty suljetun sulaton osalta kyseisen vuo-den aikana ja siten venttiiliin ei ole ollut syytä koskea.

Tapahtuma-aikaan menossa olleen huolto- ja korjausseisokin yhteydessä sulatto oli erotettu mm. puhtaan hapen putkiverkostosta sulkemalla po. venttiili ja laitta-malla sen jälkeen sokealaippa. Tutkinnan yhteydessä käydyissä keskusteluissa ei tullut esille viitteitä siitä, että kyseisen venttiilin sulkemisessa olisi ollut vaikeuk-sia tai epätavallisuuksia.

5. HAPPIPUTKISTON SUUNNITTELU JA KÄYTTÖÖNOTTO

5.1. Happijärjestelmän suunnittelu

Tehdasalueen kaasuasema on alun alkujaan ollut vain hapen varasto ja jakelulaitos. Laajassa muutoksessa asema muutettiin typen, argonin ja hapen varastoksi ja jakelukeskukseksi. Muutos ja siihen liittyneet laajennukset tilattiin Oy Aga Ab:ltä ns. avaimet käteen-periaatteella, jolloin Aga suunnitteli ja toteutti kaasuaseman tiettyyn rajakohdaksi määriteltyyn venttiiliin/laippaan asti. Laitos oli sovittu tulevaksi AvestaPolarit Stainless Oy:n omistukseen. AvestaPolarit-yhtiö puolestaan teki aseman käyttö- ja hoitosopimuksen Polargas Oy:n kanssa, joka muutoinkin jo hoiti kaasuihin liittyviä toimintoja tehdasalueella.

Tehdasalueella toteutettiin laaja ns. Tuplaprojekti, johon sisältyneet suuret muutostyöt jaettiin kolmeen kategoriaan, hot eli sula puoli, cold eli kylmävalssaamo ja infra. Jokaista kategoriaa veti oma päällikkö.

Terässulatto oli oma kokonaisuutensa, jonka suunnittelu ulkoistettiin. Terässulaton muutokset jaettiin neljään päälohkoon, rakentaminen, putkistot, sähkö ja prosessin ohjaus. Kyseinen matriisiorganisaatiotiimi kokoontui viikoittain käsittelemään projektin asioita.

Happijärjestelmän runkoputkisto toteutettiin myös mainitun Tupla H –projektiorganisaation toimesta. Organisaatio oli tiettävästi koottu eripuolilta hankituista henkilöistä, joista vain muutamat olivat pysyvästi AvestaPolarit –yhtiön palveluksessa. Varsinainen suunnittelutyö annettiin Projekti-insinöörit Oy:n tehtäväksi. Tehtävän toimeksianto perustui erilliseen konsulttisopimukseen, jossa kohteeksi oli nimetty terässulatto 2 ja sen tietyt lohkot. Varsinainen tehtävän määrittely ilmeni kohdasta, jossa todettiin: ”Konsultti sitoutuu tämän sopimuksen mukaisin ehdoin tekemään tilaajalle Terässulatto-2 lohkot A3 ja A4 PDS-laitossuunnittelun. Tehtävän laajuus ja tilaajan luovuttamat perusasiakirjat on tarkemmin määritelty liitteissä 1 ja 2”.

Suunnitteluperiaatteita sopimuksessa koskee lähinnä kohta ”Noudatettavat lait, asetukset ja standardit”. Kohdassa todetaan, että konsultin on noudatettava tehtävää suorittaessaan Suomessa voimassa olevia lakeja ja niiden perusteella annettuja asetuksia ja määräyksiä. Lisäksi todetaan myös, että konsultin on myös noudatettava Euroopan Unionin säännöksiä. Tämän todettiin tarkoittavan mm. sitä, että suunnitelmien on täytettävä CE-merkintää, työturvallisuus- ja ympäristöasioita koskevat vaatimukset. Edelleen todettiin että, työssä tulee noudattaa ensisijaisesti tilaajan tehdasstandardeja, SFS-standardeja ja täydentävin osin IES-standardeja.

Erityisiä mainintoja hapen tai käsiteltävien kemikaalien aineominaisuuksien huomioinnosta ei saatujen selvitysten mukaan ollut. Samoin ei ole ollut viittauksia erilaisiin ohjeisiin, oppaisiin tai suosituksiin tai vastaaviin, joita esim. eri alojen teollisuusjärjestöt tai vastaavat laativat mm. turvallisuuden varmistamiseksi ja edistämiseksi.

Onnettomuusselvityksen yhteydessä ilmeni, ettei yhtiössä oltu tietoisia ylipäätään

mainitunlaisten happea ja sen käyttöä koskevien turvallisuusohjeistojen olemassa-oloista.

Tutkinnan yhteydessä saadun selvityksen mukaan yhtiön sisäisissä standardeissa ei käsitellä happea tai muita kemikaaleja aineominaisuuksista tai vaaratekijöistä lähtien. Siten putkistojen suunnittelu on tapahtunut lähinnä yleistietämyksen pohjalta. Keskeinen kriteeristö on ollut paineastiamääräysten täyttyminen.

Hapteen liittyvät hajamaininnat ovat koskeneet lähinnä yksittäisiä asioita kuten venttiilien ja muiden putkiston varusteiden tilaamista ns. happipestyinä sekä putkiston sisäpuolisen likaantumisen ehkäisemiseen liittyneitä vaatimuksia (esim. suojatulppien käyttöä putkien päissä).

Suunnittelutausta on heijastunut mm. venttiilien ostotoimintaan siten, että venttiilejä hankittaessa potentiaalisilta toimittajalta on kysytty lähinnä voiko ao. venttiiliä käyttää happiputkistoissa. Tässä yhteydessä toimittajat ovat myös esittäneet ns. referenssilistaan ao. tuotteen käyttökohteista. Venttiilien osalta ei ole edellytetty esimerkiksi suunnittelua erityisesti happikäyttöön, testaustuloksia niiden turvallisuudesta, valmistajan vakuutuksia tai muita selvityksiä. (Onnettomuus selvityksen aikana saatujen tietojen mukaan happijärjestelmien venttiileille ei ole olemassa virallisia testausstandardeja, jos putkiston käyttöpaine on alle 100 bar). Onnettomuustutkinnan aikana muodostui se käsitys, että venttiilien tiiveyttä on pidetty lähinnä tärkeimpänä turvallisuusominaisuutena.

Tiiveyttä kerrottiin myös pyrityn kontrolloimaan sulaton käytön aikana mittaamalla happipitoisuuksia käyttölaitteiden lähistöllä.

Yhteydenpidosta ulkopuolisiin projektin osalta oli sovittu siten, että tilaaja hoitaa yhteydenpidon ulkopuolisiin laitoksiin, viranomaisiin ja maanomistajiin, hankkii tarvittavat luvat sekä suorittaa tarvittavat lainsäädännön edellyttämät toimenpiteet ellei muuta ole sovittu. Konsultin oli määrä avustaa tarvittaessa.

5.2 Happijärjestelmän käyttöönotto

Varsinaisen kaasuaseman toimitus, kuten aiemmin todettu, tapahtui ns. avaimet käteen periaatteella. Saadun selvityksen mukaan laitos luovutettiin toimintavalmiina ja kokonaisuuteen sisältyi perehdytys sen toimintaan sekä koulutusta mm. hapen ominaisuuksista. Toimitukseen sisältyi myös asiakirja-aineistoa kuten käyttöohjeita jne.

Runkoputkiston osalta ei ollut olemassa mitään ohjeita, muistioita tai kirjallisia menettelytapakuvauksia siitä millä edellytyksillä (esim. puhtausaste) putkisto saadaan ottaa käyttöön tai millainen ja minkä laajuinen käyttöönottotarkastus sille tuli tehdä.

Putkistolle oli tehty paineastiatarkastukset.

Putkiston puhdistus ja käyttöönotto tapahtui lähinnä siihen osallistuneiden aieman kokemuksen ja ammattitaidon perusteella. Lähtökohtana oli ensisijaisesti, että tehdään niin kuin vastaavanlaisissa kohteissa aiemminkin.

Putkiston puhtaudesta pyrittiin selvityksen mukaan käytännössä huolehtimaan suojatulppien käytöllä ja typpipuhalluksella. Putkisto pyrittiin puhaltamaan tyhjäksi roskista ja pölystä puhaltamalla tyypeä sen läpi. Puhalluksen tulosta pyrittiin arvioimaan asettamalla messinkilevy puhalluksen ulostulopäähän ja arvioimaan levyn likaantumista. Kun levy ei enää likaantunut, putken katsottiin puhdistuneen riittävästi ja puhallukset lopetettiin. Puhdistuksesta tai tuloksen arvioinnista ja siinä yhteydessä käytetyistä kriteeristä ei laadittu muistioita tai pöytäkirjoja. Samoin ei ole selvityksiä käytetyistä typpimääristä, paineista, virtausnopeuksista jne.

Putkiston vuotamattomuudesta oli kuitenkin selvitysten mukaan pyritty varmistamaan tiiviyskokein.

5.3 Ohjeet ja koulutus

Runkoputkiston käyttöönoton yhteydessä siitä ei selvitysten mukaan laadittu teknisiä kuvauksia tai ohjeistusta liittyen käyttöön, tarkastuksiin ja huoltoihin tai turvallisuustekijöihin muutoin. Kunnossapitovastuut oli sovittu siten, että tehdaspalvelu vastaa kunnossapidosta runkoputkiston osalta kunkin laitokseen seinään saakka.

Sulaton sisällä vastuu kunnossapidosta ja käytöstä on sulatolla, mutta putkiston suunnittelu ja käyttöönoton menettely on ollut paljolti edellä kuvatun kaltainen. Putkistoon liittyvää ohjeistusta oli kuitenkin laadittu jonkin verran ja se oli sijoitettu prosessin ohjausjärjestelmään help/(ohje) -nappulan taakse, jolloin se oli operaattoreiden käytettävissä nopeasti heidän työpisteissään.

Ohjaamossa työskenteleville kerrottiin annetun happea käsittelevää koulutusta lähinnä siitä näkökulmasta miten järjestelmää käytetään.

Hapteen liittyvää ohjeistusta tehtäillä on toki olemassa työsuojeluopas-vihkosen muodossa, jossa kerrotaan tehdasalueella yleensä käytettävistä kaasuista. Vihkonen on olemassa myös sulatolla käytettävissä.

Laitoksella kerrottiin otetun käyttöön myös tulos- ja kehityskeskustelumenettely, jossa voidaan ottaa esiin myös mahdollisia koulutustoiveita ja -tarpeita. Muutoin tiedonkulun ja informaation osalta viitattiin erilaisiin normaaliin työsuojelun puitteissa käytössä oleviin kokous- ja muihin menettelyihin.

6. POHDINTA

6.1 Johdanto

Kirjallisuusselvitysten perusteella hapen käsittelyyn ja käyttöön näyttäisi liittyvän se erikoispiirre, että se käyttäjiensä kannalta kykenee aiheuttamaan äkillisiä, yllättäviä onnettomuuksia, joihin ei useimmiten näyttäisi liittyvän etukäteen laitevikoja tai poikkeavaa toimintaa. Onnettomuuksia on esiintynyt kirjallisuus- ja rekisteritietojen perusteella niin hapen korkeapaine järjestelmissä (n. 200-300 bar/ pullokaasu) kuin valmistuslaitosten ja varastojen matalapaineisimmissa järjestelmissä. Onnettomuuden tutkinnan yhteydessä tutkijaryhmän käytössä olivat mm. Yhdysvalloissa sattuneiden kahden happiputkiston venttiilionnettomuuden melko katta-

vat kuvaukset.

Ryhmän käytössä oli myös onnettomuustutkintakeskuksen VTT:ltä tekemän tilauksen perusteella laaditun kirjallisuusselvityksen raportti. Raportti tarkasteli laajasti happionnettomuuksia ja niihin myötävaikuttaneita tekijöitä sekä erilaisia kokeellisia laboratoriotutkimuksia, joissa oli testattu mm. materiaalien ominaisuuksia ja niiden syttyvyyttä hapessa.

6.2 Syttymissytyt

Yllä mainitun VTT:n (Risto Lautkaski) toimesta laaditun kirjallisuusselvityksen tietojen mukaan happiputkistot ovat voineet syttyä palamaan mm. useista eri syistä. Eräissä lähteissä kehoitetaan esim. suunnittelijoita ottamaan huomioon mm. seuraavat syttymismekanismit:

1. **Hankauskatka.** Putkiston komponentit hankaavat toisiaan vasten. Kuumin kohta saavuttaa kyseistä hapen painetta ja pitoisuutta vastaavan syttymislämpötilan. Esimerkiksi edestakaisin liikkuvat komponentit tai värähtelevä varoventtiilin lautanen.
2. **Adiabaattinen puristus.** Happi puristuu alhaisesta korkeaan paineeseen kuumentuen samalla. Puristuvan hapen määrällä ei ole merkitystä. Korkea lämpötila sytyttää polymeerimateriaalit tai syttyvät epäpuhtaudet. Esimerkiksi korkeapaineisen happiputkiston suljetussa päässä oleva venttiili tai polymeerillä pinnoitettu letku.
3. **Mekaaninen isku.** Kappale, jolla on riittävän suuri massa tai liikemäärä, voi aiheuttaa muodonmuutoksen ja paljastaa tuoreen metallipinnan. Esimerkiksi magneettiventtiilin lautanen iskee polymeeritiivisteeseen.
4. **Hiukkasten törmäys.** Syttyvät hiukkaset törmäävät materiaalin pintaan yli 50 m/s:n nopeudella. Tällöin hiukkaset ja/tai materiaali syttyvät. Esimerkiksi putken epäpuhtaudesta irronneet hiukkaset törmäävät venttiilin nostimeen.
5. **Jännitys tai värinä.** Huonosti lämpöä johtavat materiaalit (esimerkiksi muovit) voivat kuumeta syttymislämpötilaansa jännityksen tai värinän vaikutuksesta. Esimerkiksi putkiston sisään tunkeutuvat kannakoimattomat liittokset.
6. **Staattinen sähkö.** Staattisen sähköpurkaus voi toisinaan kuumentaa materiaalin syttymislämpötilaansa. Esimerkiksi kuivan hapen virtauskatka voi kerätä staattista varausta epämetalliin.
7. **Valokaari.** Valokaaren energia voi sytyttää hapessa olevan materiaalin. Esimerkiksi oikosulku eristetyssä sähkölämmittimessä purkautuu vaipan lävitse happeen.

8. **Kemiallinen reaktio.** Happiputkiston ulkopuolinen kemiallinen reaktio voi tuottaa riittävästi lämpöä sytyttääkseen hapessa olevan materiaalin. Esimerkiksi kemiallisen prosessin tuottama lämpö.
9. **Akustinen resonanssi.** Suljettuun tilaan muodostuvat akustiset värähtelyt voivat nopeasti nostaa hapen lämpötilaa. Lämpötila nousee nopeammin ja saavuttaa korkeamman arvon, jos mukana on hiukkasia. Jos lämpö ei pääse nopeasti johtumaan pois, se voi sytyttää materiaalin. Esimerkiksi happi virtaa T-kappaleeseen, jonka toinen haara on suljettu.
10. **Virtauskitka.** Hapen virtaus saa polymeerimateriaalin värähtelemään, jolloin sen lämpötila nousee paikallisesti syttymislämpötilaan. Esimerkiksi esiin pistävä, väärän kokoinen laipatiiviste.
11. **Syttymisketju.** Helposti syttyvän materiaalin palamisen tuottama lämpö sytyttää vaikeammin syttyvän materiaalin.

Risto Lautkasken selvityksessä (kohdat 1-9 Stoltzfus, Dees ja Poe (1996) ja kohdat 10 ja 11 Lori Kubinski (2003) ASTM:n ryhmä.

Tornion onnettomuuden tutkinnassa on tapahtuman välitöntä syytä alkuvaiheen jälkeen tarkasteltu siitä lähtöolettamuksesta, että venttiiliä on yritetty avata paineellisena. Raakahappilinjan onnistuneesta avaamisesta huolimatta po. puhtaan hapen linjan avaamisen yhteydessä on tapahtunut inhimillinen erehdys siten, että hapen painetta ei ole tasattu sulkuventtiilin molemmilla puolilla samaksi ennen avausyritystä. Onnettomuuden jälkeen todettiin, että mainittu venttiilin ohitusputken venttiili oli kiinniasennossa. Mikäli venttiili olisi avattu ja paine tasattu, mikään tunnetuista syttymissyistä ei näyttäisi olevan ryhmän käsityksen mukaan mahdollinen tehtyjen havaintojen ja saatujen tietojen perusteella.

Edellä luetelluista, kirjallisuudessa tunnetuista syttymissyistä ei kohdissa 2, 5 - 8 mainituista syttymismekanismeista näyttänyt löytyvän sellaista lähtökohtaa, että ne olisivat mukana tässä onnettomuustapahtumassa.

6.3. Syttymismekanismien tarkastelu

6.3.1 Hiukkasten törmäys

Hiukkasten törmäys näyttäisi olevan sellainen mahdollinen syttymissy, jolle po. onnettomuudessa olisi saattanut olla edellytyksiä. Happiputkistossa on havaittu runsaasti hiukkasia onnettomuuden jälkeen. Ennen onnettomuusventtiiliä oleva osuus on tosin tullut puhalletuksi puhtaaksi onnettomuuden yhteydessä syntyneessä kaasupurkauksessa, joten täyttä varmuutta tilanteesta ei voitu saada. Venttiiliä avattaessa on muodostuneessa raossa arvioitu syntyneen kaasuvirtauksen, jonka nopeus voi lähennellä jopa 300 m/s. Tällöin venttiilin lautaseen ja seinämiin iskeytyvä pöly omaa huomattavan liike-energian. Toisaalta avautumisvaiheessa olevan venttiilin aukon pinta-ala on varsin pieni. Laskennallisesti arvioitiin, että kaasun nopeus putkessa voisi tuolloin olla n. 1,5 m/s, joka ei riittäne karkeamman

aineen mukaan tempaamiseen.

Happiputkistojen suunnitteluohjeessa (EIGA 2002) todetaan suurimman sallitun virtausnopeuden määräytyvän painevalilla 15-100 bar kaavasta (450 bar m/s)/P, jos hiukkaset törmäilevät rakenteisiin. Tällöin onnettomuusventtiilissä nopeus saisi olla enintään n. 13 m/s.

Kirjallisuusselvityksessä referoitiin myös hiukkasten törmäämistä koskevia tutkimuksia. Niissä mm. Wegener (1964) on tutkinut tilanteita, joissa happiputkistoihin oletetaan kertyvän valmistuksen, muutostöiden ja käytön yhteydessä valssihilsettä, hitsauskuonaa ja ruostetta. Lisäksi hiekkapuhallusten ym. yhteydessä putkistoihin voi päästä hiekkaa. Kokeissa käytettiin myös masuunipölyä sekä hiekan ja rautapölyn seoksia. Osa hiukkasista oli jauhettu ja osa rakeita (raekoko enintään 5 mm).

- Ruoste, masuunipöly, hiekka. Nopeus kokeiden lopussa 84 m/s, ei syttyiä
- Hitsauskuona. Kun koejärjestelyssä oli mukana putkikäyriä hiukkaset syttyivät kun nopeus ylitti 18 m/s, putki ei syttynyt vielä kun kokeen lopussa nopeus oli 84 m/s.
- 80 % hiekkaa, 20 % rautaa. Koejärjestelyssä mukana putkikäyriä, kun nopeus oli 13 m/s hiukkaset syttyivät. Nopeuden ollessa 31 m/s putki syttyi.
- Valssaushilse. Kun koejärjestelyssä oli mukana putkikäyriä ja nopeuden ollessa 33 m/s osassa kokeita hiukkaset syttyivät. Nopeuden ollessa 84 m/s putki syttyi.

Tutkijat päättelivät, että happivirtauksen kuljettamat metallihiukkaset voivat syttyä, jos niissä (kuten valssaushilse tai hitsauskuona) on mukana hapettumatonta metallia ja niiden nopeus on tarpeeksi suuri.

Williams, Benz, ja McIlroy (1988) ovat tutkineet teräslevyjen syttymistä hapessa, kun niihin törmää rautahiukkasia. Kokeissa käytettiin rautahiukkasia, joiden halkaisija oli 50-150 µm sekä hiekan jyviä, joiden halkaisija oli 150- 800 µm. Virtaukseen sekoitettiin hiukkasseos, jossa oli 2 g rautahiukkasia ja 3 g hiekan jyviä. Ruostumattomasta teräksestä AISI 316 tehty koekappale syttyi palamaan hiukkasten nopeuksilla 51 m/s ja 54 m/s. Pienemmillä nopeuksilla levy ei syttynyt. Tutkijat toteavat, että kaikissa tapauksissa levyn syttymisen edellytys oli siihen törmänneiden rautahiukkasten syttyminen. Tutkijat päättelivät myös, että turvallinen hapen virtausnopeus on 45 m/s. Tällöin hiukkaset eivät syty palamaan törmätessään pintoihin. He päättelivät myös, ettei turvallinen nopeus riipu hapen paineesta, joka kokeissa vaihteli 40-300 bar.

Vastaavanlaisia koejärjestelyjä on tehty myös neljälle happiputkistoissa yleisesti käytetylle polymeerimateriaalille, mm. PTFE:lle. Niissä pieniä hiukkasia (250 µm) ammuttiin yksitellen tai pienissä ryhmissä päin levyä. Kokeita tehtiin myös käyttäen suurempia alumiinihiukkasia, joiden halkaisija 2 mm. Kaikissa kokeissa

happi virtasi äänennopeutta suuremmalla nopeudella. Hapen paine vaihteli 69-275 bar ja lämpötila 10-205 °C. Tarkoituksena oli mitata alin lämpötila, jossa kohtio syttyy törmäyksestä. Onnistuneita kokeita oli yhteensä 32 kappaletta eikä PTFE:stä tehty kohtio syttynyt yhdessäkään kokeessa.

Torniossa onnettomuusputkistoista otettujen näytteiden kemiallinen analyysi osoittaa, että näytteissä on mukana huomattavasti jo valmiiksi hapettuneita komponentteja (liite 5).

6.3.2 Itsesyttyminen

Palavat aineet syttyvät itsestään ilmassa ja hapessa, kun niiden lämpötila on tarpeeksi korkea. Metallien itsesyttymislämpötilat ovat paljon korkeammat kuin tavanomaiset käyttölämpötilat. Metallien itsesyttymislämpötilan määrittämistä varten ei ole standardisoitua testausmenetelmää. Lisäksi testaukseen näyttäisi liittyvän useita ongelmia, jotka rajoittaisivat testaustuloksen soveltamista: koekappaleen koon, muodon ja lähiympäristön sekä oksidikerroksen vaikutus, lämpötilan mittausongelmat sekä vaikeus päätellä, milloin koekappale on syttynyt.

Metalli voi syttyä huomattavasti alemmassa lämpötilassa, jos sen oksidikerros on vahingoittunut esimerkiksi säröilyn, hankauksen tai kulumisen seurauksena. Kun pintaa suojaava oksidikerros poistetaan, tuoreelle metallipinnalle muodostuu uusi oksidikerros. Kuitenkin toisilla metalleilla tuoreen pinnan paljastuminen saattaa helpottaa syttymistä hankauskitkan, hiukkasten törmäyksen ym. tekijöiden vaikutuksesta.

Bates ym. (1979) ovat tutkineet raudan ja teräksen syttymistä virtaavassa, puristetussa hapessa. Hapen lämpötila oli 150–260 °C, paine 68 bar ja virtausnopeus noin 430 m/s. Koekappaleina käytettiin metallipuikkoja. Puikkoa kuumennettiin johtamalla sen läpi sähkövirta. Kun haluttu lämpötila oli saavutettu, puikko katkaistiin kiertämällä sitä yläpästä. Samalla puikon ylemmää puoliskoa nostettiin 2,5 mm. Tällöin puikon puoliskojen välisessä raossa iski pieni sähkökipinä.

Kokeessa tutkittiin neljää ruostumatonta terästä: AISI 304, AISI 410, 17-4 PH ja ASTM A296. Kun puikkoa ei katkaistu, yksikään näistä materiaaleista ei syttynyt edes 815 °C:n lämpötilassa. Tästä pääteltiin, että syttymisen edellytyksenä on joko puikon murtuminen ja tuoreen metallipinnan hapettuminen. Korkea lämpötila ja puristetun kuumen hapen virtaus eivät yksinään riittäneet sytyttämään puikkoja.

Ruostumaton teräs AISI 304 saatiin palamaan 538 °C:n lämpötilassa, kun hapen paine oli 20,7 bar. Kun paine nostettiin 34,5 baariin, teräs saatiin palamaan lämpötilassa 400 °C. Paineessa 69 bar, tämä lämpötila oli 315 °C. Muilla ruostumattomilla teräksillä saatiin suunnilleen samanlaisia tuloksia. Lämpötilat eivät riippuneet puikon halkaisijasta.

Ngyen ja Branch (1987) ovat tutkineet kolmen metallin, mm. ruostumattoman teräksen AISI 302, itsesyttymistä hapessa. Koekappaleena oli lieriö, jonka halkaisija ja korkeus olivat 5 mm. Lieriö puhdistettiin asetonilla, mutta sen oksidikalvoo ei koskettu. Koekappale sijoitettiin kammioon, joka paineistettiin hapella enintään

69 baarin paineeseen. Lieriön yläpintaan kohdistettiin hiilidioksidilaserin säde ja pinnan lämpötila mitattiin. Kuumennuksen aikana pinnalle muodostui rosainen oksidikalvo, jonka paksuus kasvoi. Lieriön syttyminen havaittiin sen pintalämpötilan nopeasta noususta. Syttymislämpötila oli kaikilla hapen paineen arvoilla ruostumattoman teräksen AISI 302 sulamisaalueella 1399–1421 °C.

Venäjällä on tutkittu hiiliteräksen ja ruostumattoman teräksen itsesytytystä hapessa. Bolobov ym. (1991) ovat tutkineet venäläisen 12H18N10T -ruostumattoman teräksen syttymistä hapessa. Hapen paine vaihteli 2–700 bar. Kokeissa käytettiin kolmea eri menetelmää.

Kahdella menetelmällä hapessa kuumennettu puikko syttyi hieman sulamispistettä alemmassa lämpötilassa. Tämä osoitti, että ruostumattoman teräksen pinnalle kuumentamisen aikana muodostunut oksidikalvo estää happimolekyylejä diffundoitumasta teräspintaan ja näin estää tehokkaasti terästä syttymästä korkeissakin hapen paineissa.

Kun sähköllä kuumennettujen koekappaleiden lämpötila nousi sulamispisteeseen, koekappaleet syttyivät kaikilla hapen paineilla. Syttyminen johtui siitä, että sulan hapen pinta pääsi kosketukseen hapen kanssa. Kun vastaavat kokeet tehtiin ilmassa ja inerttikaasussa, murtumakohdassa havaittiin sulaa metallia.

Murtuminen tapahtui alle sekunnissa. Ruostumattoman teräksen mitattu syttymislämpötila 1360 ± 30 °C oli käytännöllisesti katsoen sama kuin kokeessa mitattu sulamislämpötila. Lämpötila ei riippunut paineesta, joka vaihteli 2–700 bar.

VTT:n kirjallisuusselvityksen mukaan on venttiilien tiivistemateriaaleja vastaavasti tutkittu ja raportoitu. Chou ja Fiederowicz (1997) vertailevat kolmea testausmenetelmää, joilla eri polymeerien soveltuvuutta happiputkistoihin on tutkittu. Menetelmien korkein testauslämpötila oli 400, 425 tai 450 °C. Millään menetelmällä PTFE ei syttynyt, kun hapen paine oli 100–345 bar.

Barthelemy ja Vagnard (1988) antavat kahdeksan PTFE-tuotteen itsesyttymislämpötilojen vaihteluaueksi 472–500 °C. Shelley, Wilson ja Beeson (1997) antavat PTFE:n itsesyttymislämpötilaksi 512–527 °C. Bryan ym. (2000) ovat mitanneet kymmenen polymeerin itsesyttymislämpötilan hapessa eri paineilla. PTFE:n itsesyttymislämpötilaksi 34 baarin paineessa on saatu 418 °C.

6.3.3 Metallipalon syttyminen ja leviäminen

Palon leviämistä metalleissa on tutkittu sytyttämällä metallipuikko alapäästään öljyllä. Tarvittaessa lisäsytyttimenä on käytetty puikon alapään ympärille kiedottua 0,5 mm:n rautalankaa. Kokeiden perusteella on määritelty pienin hapen paine, jossa näin sytytetty metallipuikko palaa kokonaan. Tätä kutsutaan kynnyspaineeksi. Myöhemmät kokeet osoittivat, että kynnyspaine riippuu olennaisesti koejärjestyistä, minkä vuoksi sen soveltuvuus happiputkistoihin voidaan kyseenalaistaa.

Seuraavassa on kuitenkin referoitu tutkimuksia ja niiden tuloksia. McIlroy, Zawierucha ja Drnevich (1988) ovat tutkineet yli 40 metalliseoksen syttymistä puristetussa hapessa. Koekappaleena oli 100 mm pitkä puikko, jonka halkaisija oli 3,2 mm. Puikon alapää oli upokkaassa, jonka pohjalla oli 0,5 g öljyä. Öljy sytytettiin sähkökipinällä. Osassa kokeista lisäsytyttimenä käytettiin 0,5 mm:n rautalankaa, jonka alapää oli upotettu öljyyn ja joka oli kiedottu puikon alapään ympärille. Koska rautalangan palamislämpötila oli jopa 3000 °C, se kuumensi koekappaleita voimakkaasti pieneltä alueelta.

Hiiliteräspuikko saatiin syttymään öljyllä hapen paineissa 69–331 bar. Sen sijaan ruostumattomat teräkset (mm. AISI 304 ja AISI 316) eivät syttyneet edes hapen paineessa 345 bar. Käyttämällä lisäsytytintä saatiin ruostumattomat teräkset palaamaan. Painealueella 69–110 bar useiden ruostumattomien terästen (mm. AISI 304 ja AISI 316) koekappaleet paloivat kokonaan. Näillä paineilla palo eteni koekappaleessa ylöspäin nopeudella 9 mm/s.

Janoff ja Pedley (1997) toteavat, että 3,2 mm:n puikolla tehtyjen testien perusteella määritellyt kynnyspaineet ovat olleet perustana luokiteltaessa metalliseoksia sen nojalla, kuinka helposti ne syttyvät hapessa.

Ruostumattomien terästen AISI 304 ja 316 kynnyspaineeksi saatiin 3,2 mm:n puikoilla 34,5 bar. Kun puikon halkaisija kasvatettiin 6,4 mm:iin, kynnyspaine nousi 69 baariin. Sen sijaan ruostumattomista teräksistä AISI 304 ja 316 valmistetut putket, joiden ulkohalkaisija oli 8 mm ja sisähalkaisija 6 mm, syttyivät ilmakehän paineessa.

Myös ruostumattoman teräksen AISI 316 verkosta (langan paksuus 0,2 mm) tehty rulla syttyi ilmakehän paineessa. Ruostumattomasta teräksestä AISI 316 valmistetulle levyille (150 mm x 13 mm), jonka paksuus oli 3 mm, saatiin sama kynnyspaine (34,5 bar) kuin 3,2 mm:n puikolle. Sen sijaan ohuemmalle levyille, jonka paksuus oli 0,8 mm, saatiin kynnyspaineeksi 345 bar.

Werley ja Hansel (1997) tekevät yhteenvedon ruostumattomien terästen AISI 304, 308 ja 316 kynnyspaineen arvoon vaikuttavista tekijöistä:

- kynnyspaine laskee, kun sytytysenergia kasvaa
- kynnyspaine nousee, kun puikon halkaisija kasvaa
- kynnyspaine nousee, kun putken seinämän paksuus kasvaa
- putken kynnyspaine on samaa luokkaa kuin puikon, jonka halkaisija on yhtä suuri kuin putken seinämän paksuus
- pintakäsittely vaikuttaa vain vähän kynnyspaineeseen
- hehkutus vaikuttaa vain vähän kynnyspaineeseen
- hapen virtaus putken lävitse laskee kynnyspainetta.

Myös De Wit, Steinberg ja Haas (2000) tarkastelevat koekappaleen muodon ja mittojen vaikutusta kynnyspaineeseen. Ruostumattomalla teräksellä AISI 316 kynnyspaine riippuu puikon halkaisijasta seuraavasti: 34,5 bar (3,2 mm), 172 bar (6,4 mm) ja 138 bar (12,7 mm). Vaikka kaikkia kokeita ei ollut vielä tehty (6,4 mm:n halkaisijalla oli tehty vasta viisi koetta), näytti siltä, että kynnyspaine kasvaa puikon halkaisijan kasvaessa.

6.3.4 Putkistopalojen syttyminen

Fano, Faupin ja Barthelemy (2000) esittelevät menetelmiä, joita Air Liquide on käyttänyt hapen siirtoputkien venttiilimateriaalien valinnassa. Hapen siirtoputkien pituus vaihtelee 1–500 km. Hapen paine oli ennen 1980-lukua käyttöön otetuilla putkilla 40 bar ja uudemmilla 64 bar tai 100 bar. Ensimmäisen käyttövuoden aikana sattuneista putkistopaloista saatu kokemus osoitti, että

- putkistoissa on aina hiukkasia
- virtausnopeuden vaihtelut tyhjentävät silloin tällöin pölyloukut
- hiukkasten törmäysten on arvioitu sytyttäneen 90 % putkistopaloista
- hiukkaset syttyvät palamaan (rautajauheen itsesyttymislämpötila hapessa on noin 325 °C) ja sytyttävät tiivisteiden tai ohuen metalliosan, joka puolestaan sytyttää paksun metalliosan
- kriittisiä kohtia ovat venttiilit, joiden suunnitteluun ja materiaalivalintaan tulee kiinnittää erityistä huomiota.

7. PALON SYTTYMISSYY

Tehdyn kirjallisuusselvityksen perusteella näyttäisi siltä, ettei mikään kirjallisuudessa mainituista syttymissyistä ehkä selkeästi ja suoraan näyttäisi selittävän palon syttymistä sulkuventtiilissä.

Tutkija ryhmä päätyi kuitenkin siihen, että palon syttymiselle venttiilissä voitiin päätellä venttiilin rakenteen, materiaalien ja olosuhteiden perusteella olevan kaksi eri syttymismahdollisuutta. Kummankin oletuksena on, että venttiiliä on oltu avaamassa huomattavan paine-eron vallitessa venttiililautasen eri puolien välillä.

- 1) Palon syttymisen näyttäisi mahdollistavan akustinen resonanssi. Tällöin katsotaan, että venttiilin vähäinen aukeaminen muodostaa raon, jossa raon leveys muuttuu koko matkan ajan häviten lopulta akselien kohdalla olemattomiin. Kaasun virratessa paine-eron johdosta suurella nopeudella raossa ja törmätessä ympäristön rakenteisiin, venttiilin runkoon sekä polymeeri- ja metallitiivisteeseen, virtaus mitä ilmeisimmin on myös varsin turbulenttinen. Virtaustapahtuma saa metallitiivisteiden värähtelemään, jolloin tiiviste kuumenee värähtelyn vaikutuksesta voimakkaasti ja sytyttää viereisen polymeeritiivisteeseen. Tiivisteiden palosta vapautuva lämpö riittää kuumentamaan tiivisteitä paikallaan pitävän ruostumattomasta teräksestä valmistetun lukkorenkaan ja/tai metallitiivisteiden sekä sytyttämään sen.

Syttymismekanismien olemassaoloa tukee se, että tehtaalla tiedetään kaasuventtiilien toisinaan ns. soineen, kun niitä on avattu tai suljettu. Tällöin venttiileissä on varsin ilmeisesti täytynyt olla voimakas värähtelytapahtuma menossa.

Muulla tapahtuneiden putkistopalojen selvitysten yhteydessä on todettu, etteivät happipalot juurikaan etene syttymiskohdastaan hapen tulosuuntaan vaan vauriot ja lisäpalot syntyvät putkessa yleensä ns. alavirtaan. Tällöin niitä voi syntyä syttymiskohdasta varsin pitkänkin etäisyyden päähän virtaussuunnassa. Näin ollen tä-

män palon eniten palanut alue näyttäisi keskittyvän venttiilin runkoon ja kokonaan hävinneisiin tiivisteisiin ja niiden kiristysrenkaaseen.

- 2) Palon syttyminen venttiilissä on voinut johtua myös useamman samanaikaisen tekijän yhteisvaikutuksesta. Edellä selostetun virtauksen aiheuttaman metallitiivisteiden värähtelyn lisäksi tiivisteeseen tai venttiililautasen reunaan tai kapeaan rakkoon itsessään on voinut osua kaasuvirtauksen mukaansa tempaamia hiukkasia. Virtauksen suuresta nopeudesta johtuen törmäävät hiukkaset ovat saattaneet törmäyksessä muuttua hehkuviksi ja myötävaikuttaa metallitiivisteiden lämpiämiseen ja myös värähtelyn lisääntymiseen. Venttiilin laipan reuna on lautasen laidoilla avausvaiheessa hyvin lähellä metallitiivistettä tai suoraan vielä kiinni siinä. Tällöin on myös mahdollista, että virtauksen mukana iskeytyvä hiukkanen jää venttiililautasen ja metallitiivisteiden väliin, jolloin värähtely voimistaa sen hankaavaa vaikutusta ja johtaa tuoreen metallipinnan syntymiseen ja värähdysliikkeen voiman paikalliseen keskittymiseen ja kohdan kuumenemiseen. Avautumisvaiheessa olevan venttiilin lautanen on lähtökohtaisesti käytännössä kiinni metallitiivisteessä lähellä lautasen akseleita. Tällä alueella värähtelyliike voi johtaa myös vastaavaan edellä todettuun tilanteeseen värähtelevien metallipintojen hankaamiseen, kohdan kuumenemiseen, uuden hapettumattoman pinnan paljastumiseen ja sitä edelleen syttymiseen. Kirjallisuusselvitysten perusteella on mahdollista, että ruostumaton teräs voi otollisissa olosuhteissa ja putkessa vallinneella painealueella syttyä jo n. 400 °C ja tiivistepolymeeri (PTFE) hieman yli 400 °C.

Tarkasteltaessa venttiilin suhteellisen hyvin säilynyttä lautasta todetaan, että lautanen on eniten palanut kaasun tulosuunnan puolella lautasen akselin vieressä olevasta sektorista, joka on avausyrityksissä kallistunut kaasun tulovirtaukseen päin. Tällä alueella rako lautasen ja tiivisteiden välillä on ollut pienin ja hankaus on voinut tapahtua todennäköisimmin. Tarkasteltaessa venttiililautasen kaasun menosuunnassa olevaa puolta on todettu, että vastaavanlaiset paloalueet ovat havaittavissa kaikissa neljässä akselista lähinnä olevassa sektorissa. Syttyminen on tapahtunut näin ollen todennäköisesti lautasen kummankin akselin lähellä olevassa sektorissa alueilla, jotka avattaessa kallistuvat kaasuvirtaan päin. Näihin nähden alapuolisissa sektoreissa on myös havaittavissa voimakkaampaa palamista kuin venttiilissä yleisesti. Sitä ovatko nämä kaksi aluetta syttyneet samalla mekanismilla kuin yläpuoliset sektorit vai sen seurauksena, että yläpuolelta kaasuvirta tuo mukanaan palavaa metallia ei voi varmuudella sanoa. Palojäljet kuitenkin tukevat sitä olettamusta että palo on syttynyt akseleista lähinnä olevissa sektoreissa, joissa metallitiiviste ja venttiililautanen ovat kiinni toisissaan tai niiden välinen rako on ollut hyvin pieni.

Venttiililautasen valmistuksen yhteydessä hiotussa reunassa oli lisäksi havaittavissa tumma suora juova. Juovaa analysoitaessa osoittautui, että siihen on selvästi rikastunut raudan oksideja enemmän kuin ympäröivään perusaineeseen. Tämä voinee myös viitata siihen, että metallitiiviste ja laippa ovat olleet kiinni toisissaan ja niiden välillä on palamisreaktio.

Palojälkien tarkastelussa kiinnittyy huomio myös siihen, että palo on voimakkaasti kuluttanut venttiilin tiivisteiden lukitusrenkaan, joka on palanut kokonaan. Siitä on jäänyt jäljelle vain pieni palanen yhden kiinnitysruuvien ympärille. Samoin sekä metallinen että PTFE-tiiviste olivat hävinneet kokonaan palossa.

Havaintojen perusteella vaikuttaa siltä, että palo on syttynyt venttiililautasen ja metallitiivisteiden kosketuskohdissa lähellä lautasen akseleita. Syttymiskohdasta palo on levinnyt tiivisteiden ja lukitusrenkaan kautta venttiilin varsinaiseen runkoon ja itse putkistoon.

8. EHDOTUKSET VASTAAVIEN ONNETTOMUUKSIEN EHKÄISEMISEKSI

Onnettomuuden tutkinnan aikana nousivat esiin mm. seuraavat happijärjestelmään liittyvät suositukset vastaavien onnettomuuksien ehkäisemiseksi ja turvallisuus-toiminnan tehostamiseksi ja jäntevöittämiseksi. Joitain suosituksista toiminnan-harjoittaja on jo päättänyt toteuttaa.

- 1) Onnettomuuden toistumisen estämiseksi tulee onnettomuuskohteena olleen venttiilin turvallisuudesta happikäytössä varmistua riittävän laajoin ja kattavin menettelyin tai vaihtaa venttiilit sellaiseen tyyppiin, jonka on osoitettu kokein tai muin luotettavin menettelyin toimivan turvallisesti puhdasta happea sisältävissä paineellisissa putkistoissa.

Henkilövahingon vaaraa voidaan venttiilien osalta vähentää myös siirtymälä venttiilien kaukokäyttöön (ml. kohteiden tyhjentäminen henkilöistä) tai rakentamalla venttiilien yhteyteen suojaseiniä, joiden takaa venttiilejä käytetään.

- 2) Happiputkiston käytön turvallisuutta voidaan parantaa paineistamalla putkistot ensin tyhjiällä ja avaamalla venttiilit tyhjiällä ja aloittamalla hapen syöttö putkistoon vasta tämän jälkeen.
- 3) Tehdasalueella kulkevan hapen runkoputkiston hallittavuutta tulee parantaa siten, että onnettomuus- ja häiriötilanteissa hapen meno runkoputkeen voidaan pysäyttää nopeasti. Lisäksi putkistossa oleva paineellinen happi tulee voida nopeasti tyhjentää vaarattomaan paikkaan
- 4) Yhtiössä tulee määritellä happijärjestelmille asetettavat suunnittelu- ja turvallisuusvaatimukset sekä noudatettavat happijärjestelmiä koskevat suunnitteluohjeet.

Happijärjestelmille ennen käyttöönottoa vähintään tehtävät puhdistukset, tarkastukset ja koestukset tulee määritellä kirjallisesti. Samoin tulee määritellä tarkastusten tulosten hyväksymiskriteerit. Ohjeissa tulee ottaa kantaa myös tarkastajan pätevyys- ja kokemusvaatimuksiin sekä siihen kenellä on oikeus hyväksyä putkisto tai sen muutos lopullisesti käyttöön otettavaksi.

Putkistolle tulee laatia selkeät ja kattavat käyttö- ja huolto-ohjeet, joiden tulee olla kaikkien niitä tarvitsevien saatavilla. Toiminnan aikaisista poikkeamista tulee laatia raportit, jotka tulee käsitellä.

- 5) Happijärjestelmien käyttöön, huoltoon ja korjauksiin osallistuville tulee laatia ja järjestää riittävän kattava ja monipuolinen koulutus ja perehdytys happijärjestelmien turvallisesta käytöstä ja hapen vaaraominaisuuksista eri tilanteissa.
Toiminnanharjoittajan tulee varmistaa käyttöönsä myös riittävän syvällinen ja kattava hapen asiantuntijaosaaminen.
- 6) Koska happiputkisto ja varasto muodostavat usean yhtiön hallinnoiman kokonaisuuden, tulee happijärjestelmästä ja sen toiminnasta laatia selkeä ja järjestelmällinen, kirjallinen kuvaus. Kuvaukseen tulee liittää eri osapuolia koskevat menettelytapaohjeet poikkeus-, häiriö- ja onnettomuustilanteiden varalta. Edelleen ohjeistuksen tulee sisältää keskinäistä tiedottamista ja yhteistoimintaa koskevat velvoitteet ja menettelytavat. Samoin siihen tulee sisällyttää tarkastuksia, huoltoja ja kunnossapitoa koskevat yhteiset periaatteet, velvoitteet ja vastuurajat sekä dokumentointimenettelyt.
- 7) Happiputkistoissa ja venttiileissä tulee olla riittävät, selkeät ja helposti havaittavat merkinnät inhimillisten erehdysten minimoimiseksi sekä oikean toiminnan varmistamiseksi onnettomuus- ja pelastustilanteissa. Venttiilihuoneissa ja muissa vastaavissa kohteissa on syytä olla myös ns. huoneen taulut, joissa oikeat menettelyt ja toimintajärjestykset on yksilöity käyttökäyttöhenkilöstön muistin tueksi.
- 8) Hapen käyttöön ja varastointiin liittyvien vaarojen arvioimista tulee tehostaa. Käytettäviä analyysimetoodeja on myös syytä monipuolistaa (esim. toimintovirheanalyysi) tarpeen mukaan menettelyjen kattavuuden ja tuloksellisuuden parantamiseksi. Analyysit tulee aina dokumentoida kirjallisesti ja ne tulee päivittää tarpeen mukaan. Analyyseissä tulee huomioida myös alueen muiden toiminnanharjoittajien kokemukset, tehtaan omat kokemukset sekä alan tietous ja tutkimus laajemminkin.

Mahdollisten happionnettomuuksien seurausanalyysijä on aiheellista laatia happijärjestelmän osalta kattavammin. Erityisesti runkoputkiston osuus tulee huomioida. Tällöin on syytä käsitellä mm. ulkopuoliset palot, kaasuvuotojen valuminen ja kertyminen tehdasrakennusten väliin jne.

- 9) Organisaation happeen ja muihin vaarallisiin aineisiin sekä niiden turvallisuuteen liittyvää osaamista, sitoutumista ja vastuiden tiedostamista tulee korostaa ja jäntevöittää.

Onnettomuustutkinnan aikana tutkijaryhmälle muodostui käsitys, ettei happea oltu aiemmin koettu aivan täysipainoisesti vaaralliseksi kemikaaliksi. Tehdasalueen muiden vaarallisten aineiden kuten nestekaasun, hääkäkaasun ja fluorivetyhapon edellyttämän turvallisuusjohtamisjärjestelmän kuvaukset ja menettelyt eivät myöskään näyttäneet olleen sillä tavoin elävää ja vahvaa

todellisuutta tehtailla, että ne olisivat toimineet menettelytapoina tai malleina/ esikuvina sulatolle ja hapen käytölle.

Vaarallisten aineiden lainsäädännössä pienemmän ainemäärän perusteella happijärjestelmän osalta edellytetyt vähäisemmät turvallisuusjohtamisjärjestelmän kattavuutta koskevat velvoitteet näyttävät entisestään hiipuneen toimijoiden ja vastuurajojen moninaisuuteen.

Toisaalta happijärjestelmän toimijoiden moninaisuus ja selkeiden kirjallisten menettely- ja toimintatapojen vähäisyys ovat omiaan luomaan sattumanvaraisuutta. Tällöin usein korostuvat asioita hoitavien henkilöiden osaaminen ja henkilösuhteet.

Vaarallisiin kemikaaleihin liittyviä hallintamenettelyjä tulisikin kehittää ja tehostaa siten, että turvallisuus varmistetaan kattavasti ja monitasoisesti organisaation ja yksilöiden toiminnassa.

Nyt käytössä olleet menettelyt eivät näyttäisi tarjonneen sellaista suunnitelmalista ja järjestelmällistä tapaa, jolla kaikki turvallisuuden osa-alueet tulevat luotettavasti hoidetuiksi sekä menettelytavat ja toteutukset myös dokumentoituiksi.

9. LÄHDELUETTELO

Happiputkistojen syttymissyöt

Risto Lautkaski

Tutkimusselostus PRO3/1031/03. VTT Prosessit; 2003

Raporttiluonnos: Tornion happiputkiston sulkuventtiilin räjähdysten omainen palaminen 19.9. 2004

Klaus Rahka

VTT Tuotteet ja tuotanto, Espoo

Newton B. ja Forsyth E.T., Cause And Origin Analyses Of Two Large industrial Oxygen Valve Fires. Teoksessa T.A. Steinberg, H. D. Beeson, and B. E. Newton, toim. Flammability and Sensitivity of Materials in Oxygen Enriched Atmospheres: vol. 10, Philadelphia, PA. ASTM STP 1454.

Oxygen pipeline systems

IGC Doc 13/02/E

European Industrial Gases Association (EIGA)

Fire Hazards of Oxygen and oxygen enriched atmospheres

IGC Doc 04/00/E

European Industrial Gases Association (EIGA)

Cleaning of equipment for oxygen service;

Guideline IGC Doc 33/97/E

European Industrial Gases Association (EIGA)

10. LIITTEET

- Liite 1 VTT:n laboratoriossa tutkimusten yhteydessä onnettomuuslaitteistosta otettuja kuvia.
- Liite 2 Onnettomuuspaikalta ja sen ympäristöstä otettuja valokuvia.
- Liite 3 Onnettomuusventtiilin toiminta- ja rakennekuvat.
- Liite 4 Piirros happiputkilinjan kulusta onnettomuusalueella
- Liite 5 Happiputkistoista onnettomuuden jälkeen otettujen pölynäytteiden mikroskooppikuvia sekä alkuaineanalyysin spektrejä.