



Tutkintaselostus

B 5/2003 Y

Räjähdysmäinen tulipalo terästehtaalla Torniossa 19.9.2003

Tämä tutkintaselostus on tehty turvallisuuden parantamiseksi ja uusien onnettomuuksien ennalta ehkäisemiseksi. Tässä ei käsitellä onnettomuudesta mahdollisesti johtuvaa vastuuta tai vahingonkorvausvelvollisuutta. Tutkintaselostuksen käyttämistä muuhun tarkoitukseen kuin turvallisuuden parantamiseen on vältettävä.

TIIVISTELMÄ

Ruostumatonta terästä valmistavalla AvestaPolarit Stainless Oy:n (12.1.2004 alkaen Outokumpu Stainless Oy) tehtaalla Torniossa oli meneillään sulaton edellisenä vuonna rakennetun linja 2:n ensimmäinen vuosihuoltoseisokki. Seisokin aikana niin sanottua raakahapetta ja puhdasta hapetta kuljettavat putkistot oli suljettu ja tyhjennetty, koska niihin asennettiin takaiskuventtiileitä. Työt oli pääosin tehty, joten tehtaan työnjohtaja ja alihankkijan työnjohtaja alkoivat valmistella happijärjestelmien ottamista jälleen käyttöön.

Miehet menivät sulaton kolmannen kerroksen venttiilihuoneeseen, jossa he onnistuneesti avasivat raakahappilinjan pääsulkuventtiilin. Sen jälkeen he alkoivat avata happilinjan pääsulkuventtiiliä. Venttiili oli kuitenkin ilmeisesti juuttunut, koska käsipyörää venttiilin akselissa kiinni pitävä sokka katkesi. Miehet pyysivät tuomaan putkipihdit, jolla he alkoivat kääntää venttiilin käsipyörän akselia. He saivat kierrettyä akselia noin yhden kierroksen vastaten venttiilin läpän 9 asteen kääntymistä. Silloin syttyi räjähdysmäinen tulipalo, joka jatkui voimakkaana hapen vuotaessa vaurioituneesta putkistosta. Onnettomuudessa kuolivat venttiiliä avaamassa olleet työnjohtajat ja paikalle juuri ennen onnettomuutta tullut hitsaaja.

Palojälkien perusteella palo alkoi happilinjan pääsulkuventtiilistä, joka oli nimellishalkaisijaltaan 300 mm:n läppäventtiili. Putkistossa kulki 35 baarin paineeseen puristettua kaasumaista hapetta. Venttiilin kohdalla oli ohituslinja, jonka kautta oli tarkoitus turvallisuussyistä tasata paine samaksi pääsulkuventtiilin molemmilla puolilla ennen venttiilin avaamista. Ohitusventtiili oli suljetussa asennossa onnettomuuden jälkeen, joskaan varmaa tietoa ohituslinjan käytöstä ei tutkinnassa saatu. Se, käytettiinkö ohituslinjaa vai ei, vaikuttaa eri syttymismahdollisuuksiin.

Tutkinnassa tarkasteltiin kymmentä perussyttymissyitä, joista tässä tapauksessa mahdollisia näyttäisivät olevan vain hankauskitka ja hiukkasten törmäys. Tutkinnan perusteella syttyminen on voinut tapahtua kolmella eri tavalla. 1. Venttiilin läpän akselin liukulaakerointi olisi vaurioitunut ja kyseiseen kohtaan olisi syntynyt kahden teräspinnan välinen tartunta. Venttiiliä avattaessa toisiinsa juuttuneet pinnat olisivat kumentuneet ja saaneet terästä helpommin syttyvän laakerimateriaalin syttymään. 2. Venttiili olisi avattu raolleen painetta tasaamatta, jolloin venttiilin raon nopeassa happivirtauksessa kulkeneet hiukkaset olisivat törmänneet venttiilin osiin, kumentuneet ja sytyttäneet venttiilin palamaan hapessa. 3. Vieras kappale olisi kiilautunut venttiiliin ja aiheuttanut venttiiliä avatessa kitkakuumenemisen mahdollistavan hankausparin. Kolmas vaihtoehto on mahdollinen vaikka ohituslinjaa olisikin käytetty, mutta kaksi ensimmäistä edellyttävät venttiilin avaamista painetta ensin tasaamatta.

Tutkintalautakunta suosittaa vastaavien onnettomuuksien välttämiseksi vaarallisten työtehtävien tunnistamista ja toimintaohjeiden laatimista niitä varten. Mahdollisesti vaaralliset häiriö-, vika- ja poikkeamatilanteet tulisi määritellä samaan tapaan ja niitä varten tulisi laatia yksityiskohtaiset toimintaohjeet. Toteutuneet normaalista poikkeavat tilanteet tulisi myös kirjata. Lisäksi tutkintalautakunta suosittaa, että EU-säädöksissä vaadittaisiin venttiilinvalmistajia laatimaan ohjeet venttiilien sopivuudesta eri kaasuille. Ohjeissa tulisi ottaa huomioon muun muassa olosuhteet ja käyttötarkoitus. Happilinjojen puhtauden varmistamiseksi tutkintalautakunta suosittaa, että putkistoille tulisi laatia suunnitelma ja ohjeet riittävän puhtauden varmistamiseksi. Lisäksi vaarallisiin toimintoihin liittyvät venttiilit tulisi lisätä yrittysten ennakkohuoltojärjestelmään.



SAMMANDRAG

EXPLOSIV BRAND VID SMÄLTVERK I TORNEÅ DEN 19 SEPTEMBER 2003

Smältverket för tillverkning av rostfritt stål i Torneå är en del av AvestaPolarit Stainless (Outokumpu Stainless fr.o.m. 12 januari 2004). Smältverkets linje nummer 2 som hade byggts året innan befann sig i sitt första årliga driftstopp för underhåll. Under driftstoppet skulle backslagsventiler installeras på de rörledningar som transporterar det så kallade råa respektive rena syret. Därför hade de stängts och tömts. De mesta av arbetet hade redan slutförts, och fabriken samt förmanen för underleverantören började förbereda igångsättningen av syresystemen.

Männen gick in i ventilrummet på tredje våningen i smälthuset, där de lyckades öppna huvudavstängningsventilen för det råa syret. Därefter började de öppna huvudavstängningsventilen för syreledningen. Ventilen satt uppenbarligen fast eftersom axelsprinten som höll fast handhjulet i ventilaxeln bröts av. Männen bad att få en rörtång med vars hjälp de började vrida runt ventilens handhjulaxel. De lyckades vrida axeln ungefär ett varv, motsvarande en vridning på 9° av klaffen. I samma ögonblick bröt en våldsam brand ut. Branden fortsatte att vara kraftig så länge som syre läckte ut från den skadade rörledningen. Både förmännen som hade öppnat ventilen samt en svetsare som kommit till platsen strax före olyckan blev dödade.

Att döma av brännmärkena startade branden vid huvudavstängningsventilen för syret; en klaffventil med en nominell diameter på 300 mm. Gasformigt syre som komprimerats till ett tryck på 35 bar strömmade i rören. Det fanns en shuntledning intill ventilen. Denna ledning var av säkerhetsskäl avsedd att användas för att utjämna trycket på båda sidorna om huvudavstängningsventilen innan man öppnade den. Efter olyckan befanns shuntventilen vara i stängt läge, även om ingen säker information om användningen av shuntledningen kunde hittas i utredningen. Om shuntledningen hade använts eller ej har betydelse för brandorsaken.

Under utredningen undersöktes tio grundläggande brandorsaker. I detta fall förefaller de enda möjliga orsakerna vara nötningsfriktion och partikelkollision. På grundval av utredningen kan branden ha antänts på tre olika sätt. 1. Glidlagren på ventilklaffaxeln kan ha varit skadade, och två stålytor kan ha kommit i kontakt i det skadade området. När ventilen öppnades kan dessa två vidhäftande ytor ha upphettats och satt eld på lagermaterialet som är mer lättantändligt än stål. 2. Ventilen kan ha öppnats en bit utan att trycket hade utjämnats. I detta fall skulle partiklarna i det snabba syreflödet i ventilspalten ha kolliderat med ventildelarna, blivit upphettade, och antänt ventilen att brinna i syret. 3. Ett främmande föremål kan ha fastnat i ventilen och bildat ett friktionspar som möjliggjorde upphettning genom friktion när ventilen öppnades. Det tredje alternativet är tänkbart även om shuntledningen hade använts, men för de första två alternativen krävs att ventilen öppnades utan att trycket utjämnats.

För att undvika liknande olyckor rekommenderar undersökningsnämnden att farliga arbetsuppgifter identifieras och att anvisningar för hur de ska utföras sammanställs. På samma sätt ska potentiellt farliga funktionsstörningar, fel och onormala situationer definieras, och detaljerade anvisningar för hanteringen av dessa ska tas fram. Onormala situationer som har inträffat ska också registreras. Undersökningsnämnden rekommenderar vidare att EU-direktiven ska kräva att ventiltillverkare sammanställer anvisningar angående användbarheten av ventiler med olika gaser.



Bland annat ska anvisningarna ta hänsyn till omständigheterna vid och ändamålet med användningen. För att kunna garantera renheten hos syreledningar rekommenderar undersökningsnämnden att en plan och anvisningar tas fram för att säkerställa en tillräcklig renhet i rörledningarna. Vidare bör alla ventiler som är inblandade i farliga verksamheter inkluderas i de förebyggande underhållssystemen hos företagen.

SUMMARY

EXPLOSIVE FIRE AT MELT SHOP IN TORNIO ON SEPTEMBER 19, 2003

The stainless steel manufacturing melt shop in Tornio is part of AvestaPolarit Stainless (Outokumpu Stainless as of January 12, 2004). The melt shop line number 2 that had been built the previous year was in its first annual maintenance stoppage. During the stoppage back pressure valves were to be installed to pipelines conveying the so called raw oxygen and pure oxygen. Therefore they had been closed and made gasfree. Most of the work had already been completed, and the foreman of the factory and the foreman of the subcontractor started preparing the start-up of the oxygen systems.

The men entered the valve room in the third floor of the smelting house, where they successfully opened the main shut valve of the raw oxygen line. Thereafter they started opening the main shut valve of the oxygen line. The valve was apparently stuck, because the bolt pin holding the hand wheel in the valve stem snapped. The men asked for pipe tongs, with the help of which they started turning the valve hand wheel stem. They managed to turn the stem about one turn, corresponding to a 9° turn of the disc. At that moment an explosive fire broke out. It kept burning strong as the oxygen was leaking from the damaged piping. Both the foremen that had been opening the valve and a welder who had come to the scene just before the accident were killed.

Judging by the burn marks the fire started from the oxygen line main shut valve; a butterfly valve with a nominal diameter of 300 mm. Gaseous oxygen compressed to a pressure of 35 bar was flowing in the pipes. There was a by-pass line beside the valve. Due to safety reasons this line was supposed to be used to equalise the pressure on both sides of the main shut valve before opening the latter. After the accident the by-pass valve was found to be in a closed position, although no certain information about the use of the by-pass line was found in the investigation. Whether or not the by-pass line was used will have affected the cause of the fire.

During the investigation ten basic causes for fire were looked into. In this case the only possible reasons seem to be friction and particle impact. On the basis of the investigation the fire may have ignited in three different ways. 1. The slide bearings of the valve disc stem may have been damaged, and two steel surfaces may have come into contact in the damaged area. When the valve was being opened, these two seized surfaces may have become hot and set fire on the bearing material which ignites more easily than steel. 2. The valve may have been opened ajar without equalising the pressure. In this case the particles in the fast oxygen flow of the valve gap would have struck valve parts, become hot, and ignited the valve to burn in the oxygen. 3. A foreign object may have gotten stuck in the valve and formed a friction pair that enabled friction



heating when the valve was being opened. The third option is possible even though the by-pass line had been used, but the first two necessitate the opening of the valve without equalising the pressure.

In order to avoid any similar accidents the Investigation Commission recommends that dangerous work assignments be identified and instructions for carrying them out be compiled. Potentially dangerous malfunction, fault, and abnormality situations should similarly be defined and detailed instructions to deal with them should be drawn up. Abnormal situations that have occurred should also be registered. The board of investigation further recommends that EU directives should require the valve manufacturers to compile instructions concerning the usability of valves with different gases. Among other things, the instructions should take into consideration the circumstances and purpose of use. In order to guarantee the cleanness of oxygen lines the board of investigation recommends that a plan and instructions should be drawn up for ensuring the sufficient cleanness of the piping. Furthermore, any valves connected with dangerous operations should be included in the preventive maintenance systems of the companies.

ALKUSANAT

Torniossa terästehtaalla tapahtui perjantaina 19.9.2003 onnettomuus, kun happilinjän pääsulkuventtiiliä avattaessa syttyi räjähdysmäinen tulipalo. Onnettomuudessa kuoli kolme miestä.

Onnettomuustutkimuskeskus arvioi onnettomuuden suuronnettomuuden vaaratilanteeksi ja asetti onnettomuuksien tutkinnasta annetun lain (373/85) 5 §:n 3 momentin nojalla tutkintalautakunnan tutkimaan tapahtunutta.

Tutkintalautakunnan puheenjohtajaksi nimitettiin johtaja **Tuomo Karppinen** Onnettomuustutkimuskeskuksesta ja jäseniksi yli-insinööri **Hannu Alén** sosiaali- ja terveysministeriön työsuojeluosastolta, tutkija **Jari Hämäläinen** Onnettomuustutkimuskeskuksesta, erikoistutkija **Risto Lautkaski** VTT Prosesseista ja pelastusjohtaja **Anssi Parviainen** Kainuun pelastuslaitokselta. Lisäksi lautakunnan asiantuntijoina toimivat johtava tutkija **Klaus Rahka** VTT Tuotteet ja tuotannosta, erikoistutkija **Lauri Eerikäinen** VTT Prosesseista ja tutkinnan loppuvaiheessa tutkija **Kai Valonen** Onnettomuustutkimuskeskuksesta. Tutkinnan aikana haastateltiin myös useita muita asiantuntijoita.

Tutkintaselostuksessa kerrotaan tapahtumat ennen onnettomuutta ja onnettomuuden aikana sekä kuvataan tapaukseen liittyvää pelastustoimintaa. Lisäksi tutkintaselostuksessa esitetään tutkinnan tulokset ja analysoidaan räjähdysmäiseen tulipaloon johtaneita syitä. Lopuksi esitetään turvallisuussuosituksia, joiden tarkoituksena on vastaavanlaisten onnettomuuksien välttäminen. Tutkinnan ensisijaisena tarkoituksena on turvallisuuden parantaminen, joten syyllisyys- ja vahingonkorvauskysymyksiin ei oteta kantaa.

Tutkintalautakunta on kuullut useita onnettomuuteen liittyviä ja putkiston suunnitteluun ja rakentamiseen osallistuneita henkilöitä. Lisäksi tutkintalautakunta on kerännyt putkiston ja venttiilin rakennushankkeeseen liittyviä asiakirjoja ja tutustunut niihin. Pelastustoimien selvittämiseksi osa tutkintalautakunnan jäsenistä on haastatellut pelastustoimintaan osallistuneita ja kuunnellut hätäläilmoitus- ja radiopuhelintallenteet. Venttiilin tekniset erillistutkimukset tehtiin VTT:llä Espoossa sekä eräät toimintakokeet Outokumpu Stainless Oy:n Tornion tehtaalla. Valo- ja videokuvauksessa tutkintalautakuntaa avustivat Kemin ja Tornion kihlakuntien poliisilaitosten rikosteknisten yksiköiden tutkijat.

Tämä tutkintaselostus on ollut lausunnolla sisäasiainministeriön pelastusosastolla, kauppa- ja teollisuusministeriössä, Turvatekniikan keskuksessa (Tukes), sosiaali- ja terveysministeriön työsuojeluosastolla, Pohjois-Suomen työsuojelupiirissä, Tornion kihlakunnan poliisilaitoksella, Lapin hätäkeskuksessa, Lapin pelastuslaitoksella ja Outokumpu Stainless Oy:n Tornion tehtaalla. Lisäksi onnettomuuden uhrien omaiset ovat saaneet kommentoida tutkintaselostusta. Lausunnot ja kommentit on otettu huomioon tutkintaselostusta viimeisteltäessä. Lausunnot ovat liitteessä 1.

Tutkinta-aineisto on talletettu Onnettomuustutkimuskeskuksen arkistoon. Arkistoluettelo on tämän tutkintaselostuksen lopussa.

Tämä tutkintaselostus on myös Onnettomuustutkimuskeskuksen internet-sivuilla osoitteessa www.onnettomuustutkinta.fi.



SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	I
SAMMANDRAG.....	II
SUMMARY.....	II
ALKUSANAT.....	V
1 ONNETTOMUUS.....	1
1.1 Yleiskuvaus.....	1
1.2 Onnettomuuskohte, tapahtumapaikka ja sääolosuhteet.....	1
1.3 Tapahtumien kulku.....	4
1.4 Pelastustoiminta ja raivaus.....	10
1.4.1 Hälytykset.....	10
1.4.2 Toiminta onnettomuuspaikalla.....	10
1.5 Poliisin toiminta.....	11
1.6 Onnettomuudesta aiheutuneet vahingot.....	11
1.6.1 Henkilövahingot.....	11
1.6.2 Materiaalivahingot.....	12
1.6.3 Ympäristövahingot.....	12
1.7 Tiedottaminen.....	12
2 ONNETTOMUUDEN TUTKINTA.....	13
2.1 Rakennus.....	13
2.1.1 Onnettomuustila.....	14
2.1.2 Happijärjestelmä.....	14
2.1.3 Happilinja.....	16
2.1.4 Onnettomuusventtiili.....	21
2.2 Olosuhteet palon aikana.....	28
2.3 Onnettomuuteen liittyvät organisaatiot ja henkilöt.....	28
2.3.1 Tehdas ja sen turvallisuusorganisaatio.....	28
2.3.2 Projekti Tupla.....	29
2.3.3 Seisokin aikaisten töiden organisointi.....	30
2.3.4 Kaasujen toimitusorganisaatio.....	30
2.3.5 Tehtaan toimintaa valvovat tarkastuslaitokset ja viranomaiset.....	31
2.4 Pelastustoimen organisaatio ja toimintavalmius.....	32
2.4.1 Lapin hätäkeskus.....	32
2.4.2 Tehtaan laitospalokunta ja sammutusryhmät.....	32



2.4.3	Tornion kaupungin palolaitoksen operatiivinen organisaatio.....	33
2.4.4	Kaupungin palolaitoksen toimintavalmius terästehtaalle	33
2.5	Tallenteet.....	34
2.5.1	Rekisteröintilaitteet.....	34
2.5.2	Puhelin- ja radioliikenteentallenteet	34
2.5.3	Muut tallenteet.....	34
2.6	Asiakirjat.....	34
2.7	Määräykset ja ohjeet.....	34
2.7.1	Viranomaiset	35
2.7.2	Tehtaalla olleet ohjeet ja toimenpiteet turvallisuuden varmistamiseksi.....	37
2.7.3	EIGA:n ohjeet	39
2.8	Muut tutkimukset ja selvitykset	41
2.8.1	Kirjallisuustutkimus happiputkistojen syttymissyistä.....	41
2.8.2	Happiputkiston tekninen termodynamiikka	45
2.8.3	Venttiilin toimivuuden tutkimus.....	51
2.8.4	Virtauskoe	54
2.8.5	Happilinjän sisäpuolinen kuvaus.....	56
2.8.6	Venttiilien kunnossapitotoiminnassa tehtyjä havaintoja.....	56
2.8.7	Turvallisuustoiminnan tason arviointi.....	58
3	ANALYYSI.....	61
3.1	Todennäköiset syttymissyöt.....	61
3.1.1	Ulkopuolinen lämmönlähde.....	62
3.1.2	Hiukkasten törmäys.....	63
3.1.3	Hankauskitka.....	64
3.2	Tapahtumien kulun analysointi	67
3.3	Määräysten, ohjeiden ja viranomaistoiminnan analysointi	70
3.4	Pelastustoiminnan analysointi	73
4	JOHTOPÄÄTÖKSET	75
4.1	Toteamukset	75
4.2	Onnettomuuden syyt.....	77
5	SUOSITUKSET.....	80
6	TOTEUTETUT TOIMENPITEET	83

LÄHDELUETTELO

LIITTEET

Liite 1. Lausunnot



- Liite 2. Happiputkistojen syttymissyyt
- Liite 3. Tornion venttiilipalon todennäköiset syttymissyyt
- Liite 4. PTFE:n palaminen
- Liite 5. Venttiin ja putkiston tutkimukset
- Liite 6. Happilinjan pääsulkuventtiin virtauskokeet
- Liite 7. Terästehtaan happilinjan putkien elektronimikroskopia ja EDS-analyysit, yhteenveto
- Liite 8. Turvallisuustoiminnan tason arviointi

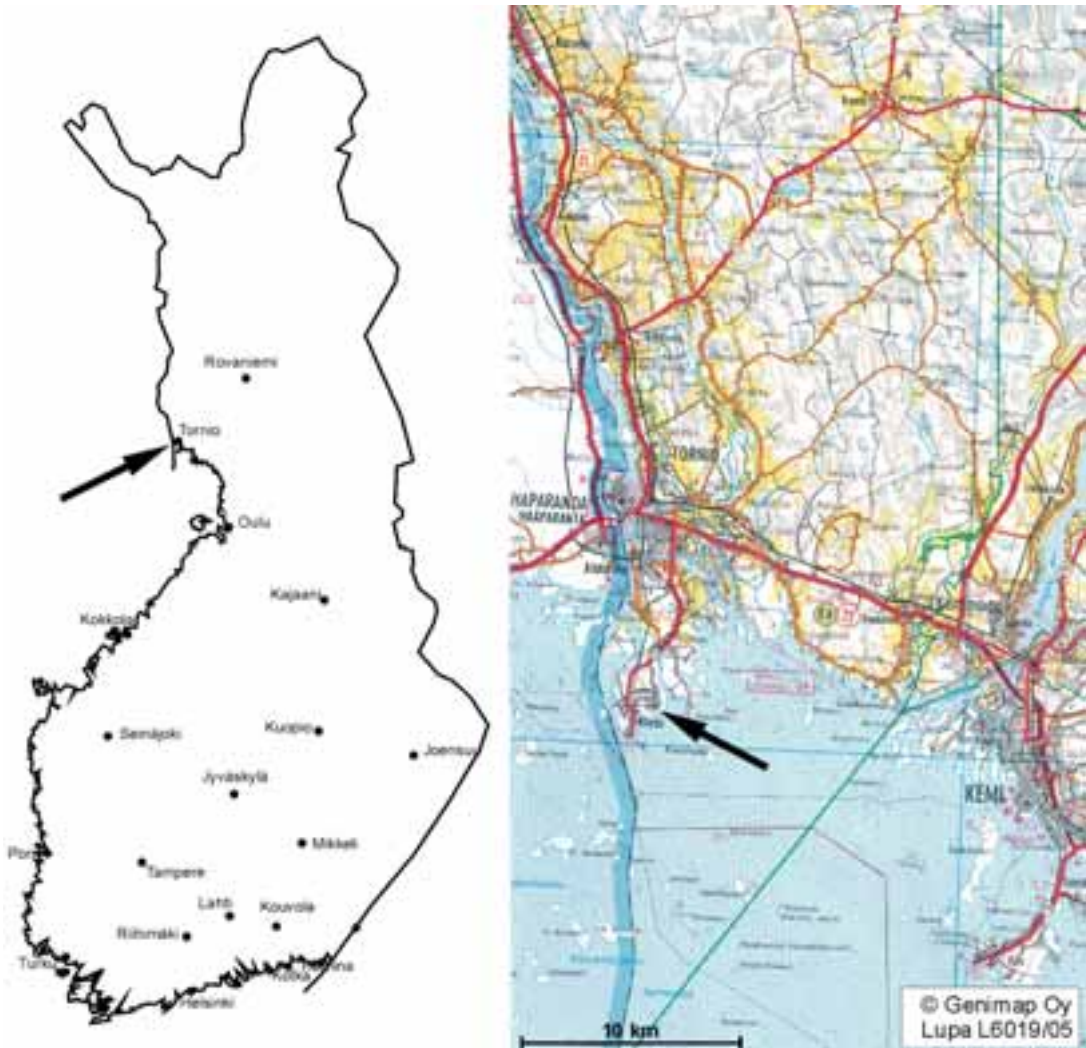
1 ONNETTOMUUS

1.1 Yleiskuvaus

Perjantaina 19.9.2003 tapahtui Torniossa onnettomuus, jossa terästehtaan happilinjän pääsulkuventtiiliä avattaessa syntyi räjähdysmäinen tulipalo. Onnettomuudessa menehtyi kolme henkilöä.

1.2 Onnettomuuskohte, tapahtumapaikka ja sääolosuhteet

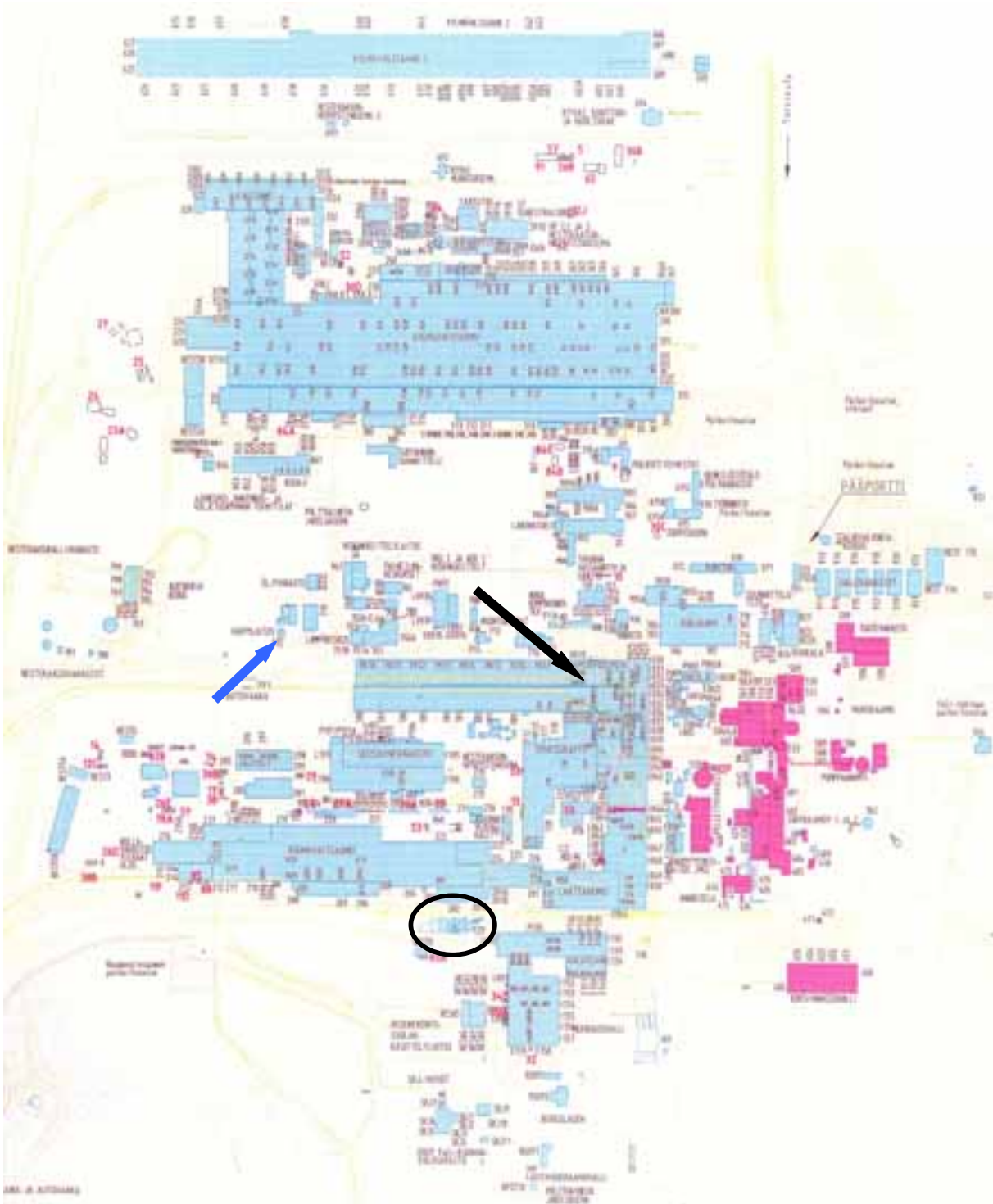
Onnettomuus tapahtui AvestaPolarit Stainless Oy:n (12.1.2004 alkaen Outokumpu Stainless Oy) Tornion terästehtaan sulaton linjalla 2, josta käytetään jatkossa nimitystä sulatto 2. Vanhemmasta sulattolinja 1:stä käytetään nimitystä sulatto 1. Tehdas on Röytän kaupunginosassa noin kymmenen kilometriä Tornion keskustasta etelään.



Kuva 1. Tehtaan sijainti.

Bild 1. Läget för fabriken.

Figure 1. Factory location.

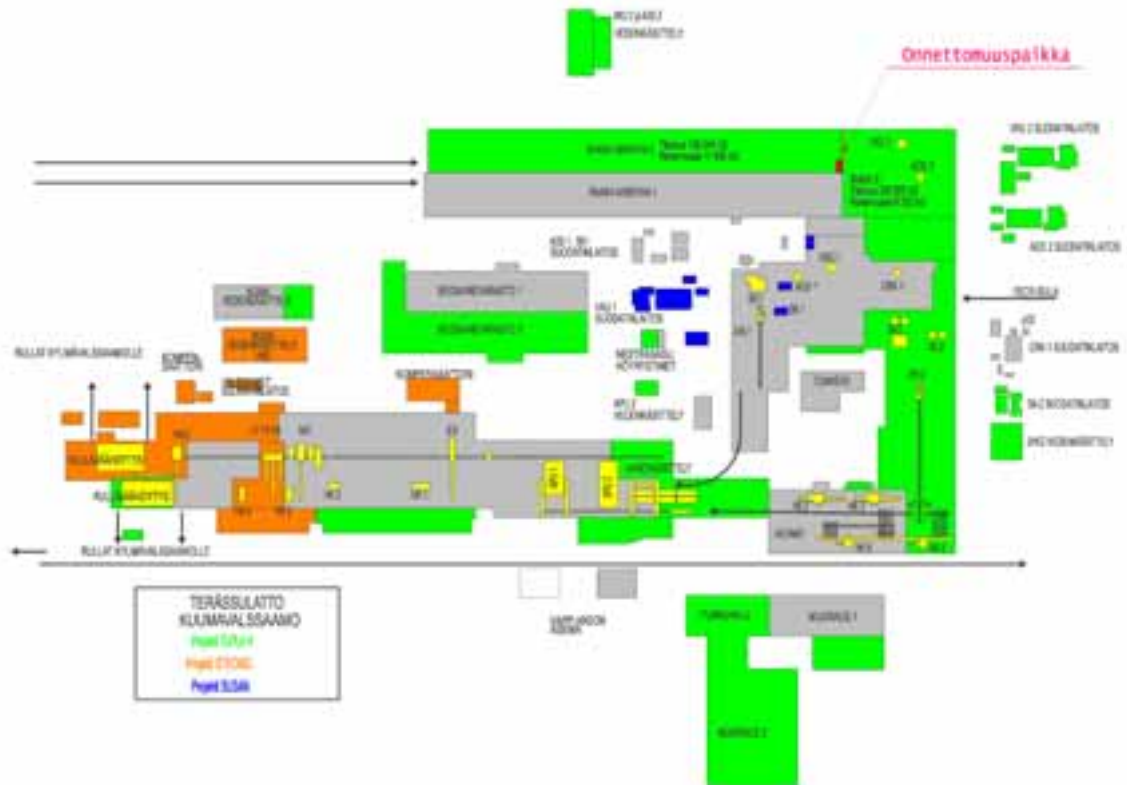


Kuva 2. Kartta tehdasalueesta. Musta nuoli osoittaa onnettomuustilaan ja sininen nuoli raakahapen valmistuslaitosta. Kaasuasema, josta happilinja alkoi, on ympyröity.

Bild 2. Karta över fabriksområdet. Den svarta pilen indikerar platsen för olyckan, och den blåa pilen indikerar anläggningen som producerade det råa syret. Gasstationen från vilken syreledningen ledde är markerad med en cirkel.

Figure 2. Map of the factory area. Black arrow points to the site of the accident and blue arrow to the raw oxygen plant. The gas station where the oxygen line started from has been circled.

Tehdasalueen koko on noin 4,2 km². Sulatto 1:n ja sulatto 2:n yhteiskerrosala on noin 63 000 m². Sulattohallin kerrosten lukumäärä vaihtelee tuotantotiloista riippuen yhden ja viiden kerroksen välillä. Onnettomuus tapahtui hallin kolmannen kerroksen venttiilihuoneessa, jonka pinta-ala oli noin 75 m² ja tilavuus noin 1 500 m³. Sillä kohtaa halli on viisikerroksinen. Sulatto 2:n happilinja oli otettu käyttöön vuonna 2002. Onnettomuus sattui sulatto 2:n ensimmäisen vuosihuoltoseisokin aikana.



Kuva 3. Sulatto ja kuumavalssaamo.

Bild 3. Smältverket och varmvalsverket.

Figure 3. Smelting house and hot rolling mill.

Sää oli onnettomuushetkellä selkeä ja ilman lämpötila oli noin +7 °C. Säällä ei ollut vaikutusta onnettomuuden syntyyn eikä seurauksiin.



Kuva 4. Venttiilihuone tulipalon sammuttua. Työnjohtajat olivat avaamassa venttiileitä tasolla, joka on vasemmalta näkyvältä tasolta seuraava ylöspäin. (Kuva: Tornion poliisi)

Bild 4. Ventilrummet efter att branden hade släckts. Förmännen öppnade ventilerna på arbetsplattformen ovanför plattformen till vänster.

Figure 4. Valve room after the fire. The foremen were opening the valves on a work platform that is the next one above the platform on the left.

1.3 Tapahtumien kulku

Perjantaina 19.9.2003 terästehtaan uuden sulatto 2:n ensimmäinen vuosihuoltoseisokki oli päättymässä. Seisokki oli alkanut edellisenä sunnuntaina ja tarkoitus oli käynnistää tuotanto maanantaina 22.9.2003. Torstaina 18.9.2003 pidetyssä seisokkipalaverissa oli käyty läpi seisokin aikana tehtävien töiden tilannetta ja todettu, että ”käyntiin lähtöä estäviä uhkatekijöitä ei ole tiedossa tällä hetkellä”.

Torstai-iltana oli saatu valmiiksi takaiskuventtiilien asennus niin sanotun raakahapen ja puhtaan hapen linjoihin. Asennustyö tehtiin venttiilitasolla noin 15 metriä onnettomuuspaikan alapuolella. Lisäksi takaiskuventtiileitä oli asennettu kaasunjakohuoneeseen, joka sijaitsi kauempana onnettomuuspaikasta kuin venttiilitaso. Onnettomuuspäivänä oli tarkoitus paineistaa linjat ja aloittaa järjestelmän testaus. Tätä työtä valmistelivat perjantaina aamupäivällä sulaton valvomossa tehtaan työnjohtaja sekä linjat rakentaneen ja muun muassa takaiskuventtiilit asentaneen yhtiön työnjohtaja. He lähtivät sieltä kello 10.35–10.40 yhdessä avaamaan linjojen pääsulkuventtiileitä kolmannessa kerroksessa sijaitsevaan venttiilihuoneeseen.

Matka valvomosta venttiilihuoneeseen kesti rauhallisesti kävellen muutamia minuutteja, joten he olivat perillä ilmeisesti noin kello 10.40 tai viimeistään noin 10.45, sillä likimain siihen aikaan eräs työtoveri soitti totuttuun tapaan tehtaan työnjohtajalle ja pyysi tätä kanssaan lounaalle. Työnjohtaja kertoi olevansa kolmannessa kerroksessa avaamassa venttiileitä ja tulevansa sen jälkeen syömään.

Vähän ennen kello 10.50 sulaton lattian tasolla töitä tehnyt asennusliikkeen putkiasentaja soitti venttiilihuoneeseen olleelle työnjohtajalleen. Putkiasentajalle oli syntynyt ongelma työssään ja hän kysyi työnjohtajalta neuvoa. Työnjohtaja vastasi suunnitelmien muuttuneen ja kehotti asentajaa keskeyttämään työn siihen saakka, että hän tulee alas ja selittää mitä pitää tehdä. Samalla työnjohtaja pyysi asentajaa tuomaan putkipihdit, sillä jonkin venttiilin käsipyörä luisti akselilla. Asentaja muisteli työnjohtajan myös sanoneen, että sokka oli mennyt rikki ja että he eivät saa venttiiliä avattua.

Asentaja vei putkipihdit ylös venttiilihuoneeseen, jossa hän oli parin minuutin kuluttua puhelun päättymisestä. Silloin molemmat työnjohtajat olivat venttiilihuoneen lattiatason yläpuolella olevalla työtasolla, josta pääsi kääntämään sekä raakahappilinjan pääsulkuventtiiliin että puhtaan hapen linjan pääsulkuventtiiliin käsipyörää. Asentaja nousi työtasolle vieviä tikkaita kolme askelmaa ja ojensi putkipihdit alihankkijan työnjohtajalle, joka ojensi kätensä ja otti vastaan pihdit mitään sanomatta. Asentaja ei nähnyt, minkä venttiilin kanssa miehet työskentelivät. Tikkailta katsottuna raakahappilinjan venttiili oli vasemmalla ja happilinjan pääsulkuventtiili siitä noin puolitoista metriä oikealle.

Asentaja oli venttiilihuoneessa korkeintaan noin puoli minuuttia. Sen jälkeen hän lähti portaita takaisin alas työpisteeseensä, jossa hänen työparinsa odotti. Portaissa hän ei nähnyt ketään. Heti asentajan päästyä työparinsa luokse kuului kova räjähdys. Asentaja näki liekkejä ja valtavasti pölyä ja savua venttiilihuoneen suunnassa.

Päämuuntoaseman järjestelmästä saadun ylivirtahälytyksen kellonajan perusteella räjähdys tapahtui noin kello 10.52. Sen jälkeen rekisteröitiin vikahälytys kello 10.54 ja toinen kello 10.55. Kattilalaitoksen järjestelmästä saatujen tietojen perusteella happilinjan paine oli 16,10 baaria noin kello 10.54, kun se oli ollut 34,74 baaria noin kello 10.50.

Noin 15 alihankkijoiden miestä oli asentamassa rataakselia ja valamassa betonilattiaa hallin lattiatasolla noin 40 m:n etäisyydellä onnettomuuspaikasta, viistosti sen alapuolella. Yksi miehistä kertoi kuulleen välittömästi ennen räjähdystä yläviihosta huudon "varo". Hän on aivan varma huudosta ja oli räjähdysten tapahtuessa nousemassa ylös katsoakseen, kenelle huudettiin. Muut lähistöllä olleet työntekijät eivät kuulleet varoituksia. Jotkut miehistä ovat kertoneet kuulleen ennen räjähdystä kovaa suhinaa, josta kuuluu esimerkiksi kaasun virratessa putkeen. Jotkut toiset taas olivat sitä mieltä, että suhina alkoi kuulua vasta räjähdysten jälkeen.

Tehtaan kaasuaseman yhteydessä noin 700 metrin päässä onnettomuuspaikasta oli kolme noin 100 m³:n kaasumaisen hapen paineellista puskurisäiliötä, jotka tyhjenivät happilinjan rikkouduttua ja syttyä palamaan. Yhteensä hapetta pääsi virtaamaan katkenneesta putkesta karkeasti arvioiden normaalipaineisena yli 15 000 m³. Valvomosta tehtiin "happi-pikapysäytys" kello 10.59 eli lopetettiin nestehapen syöttö höyrystimeen

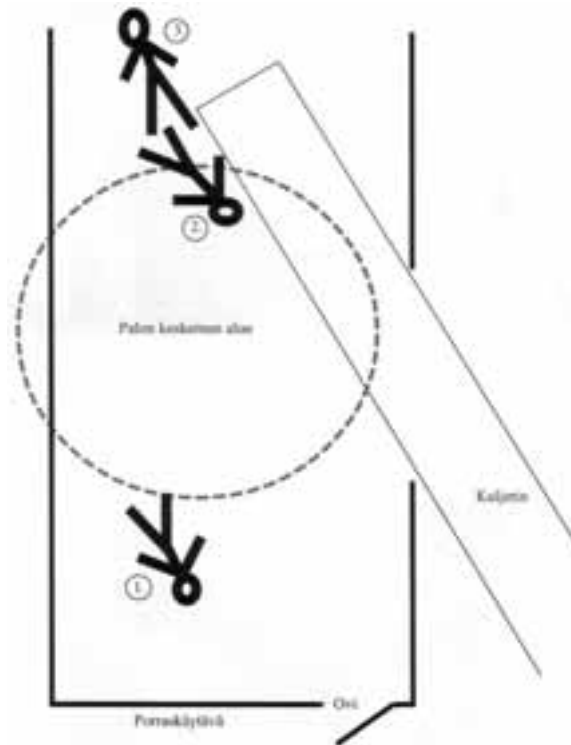
noin 7 minuutin kuluttua räjähdyksestä. Sen jälkeen suljettiin käsin happilinjan venttiileitä.

Pian onnettomuuden jälkeen aloitettiin toimet onnettomuuden rajaamiseksi kattilalaitoksen valvomosta, jossa valvottiin raakahappilaitoksen toimintaa. Raakahappilaitos oli kaasuasemaa vanhempi ja siellä valmistettiin niin sanottuun molekyyliseulaan perustuvalla menetelmällä raakahapetta, jonka happipitoisuus on noin 96 prosenttia. Kaasuasemalta varmistettiin, että hapen pumppaus oli pysäytetty ja että käsikäyttöiset pääsulkuventtiilit olivat kiinni. Raakahappilinjan käsikäyttöinen pääsulkuventtiili suljettiin ja tyhjennysventtiili aukaistiin varmistamaan linjan paineettomuus. Argon- ja typpikaasun pumppaus keskeytettiin kaasuasemalta ja typpilinjan käsikäyttöinen venttiili suljettiin onnettomuuspaikan läheisyydestä. Eteläinen paineilma-verkko suljettiin kattilalaitoksen suunnasta ja kaasumaisen nestekaasun linja suljettiin sulaton nestekaasuhöyrytimeltä.

Heti kun palokunta pääsi onnettomuuspaikalle, sieltä löytyi kaksi ruumista muutaman metrin päästä onnettomuusventtiilistä. Ruumiit olivat tasolla, jolta tikkaat nousivat ylös työtasolle. Myöhemmin löytyi samalta tasolta kolmas uhri. Ensin löydetyistä toinen oli alihankkijan työnjohtaja ja toinen hitsaaja, joka oli ollut työparinsa kanssa hitsaamassa kuljettimen siiloa neljännessä kerroksessa onnettomuuspaikan yläpuolella. Kolmas uhri oli tehtaan työnjohtaja.

Onnettomuuspaikan läheisyydessä olevaa siiloa oli ollut hitsaamassa kaksi miestä. Toinen miehistä oli ollut siilon ulkopuolella odottamassa vuoroaan ja toimi samalla siilossa sisällä olevan turvaparina. Siilon sisällä hitsaamassa ollut mies on kertonut, että hänen työparinsa oli sanonut lähtevänsä käymään tupakalla. Siiloon jäänyt hitsaaja oli ehtinyt kertomansa mukaan hitsata 2-3 puikkoa, mikä merkitsee muutaman minuutin kulumista työparin lähdöstä siihen, kun räjähdys tapahtui.

Tupakkapaikalle päästäkseen hitsaajan oli kuljettava alaspäin onnettomuuspaikalle johtavia portaita. Tupakkapaikka, jossa miehellä työparinsa kertoman mukaan oli tapana käydä, oli ulkona kattotasanteella puoli kerrosta onnettomuuskohteesta ylöspäin. Kukaan ei nähnyt miehen menevän onnettomuuspaikalle, joten hänen on täytynyt mennä sinne välittömästi putkipihtejä tuoneen asentajan poistuttua.



Kuva 5. Poliisin piirros onnettomuuden uhrien sijainnista onnettomuuden jälkeen.

Bild 5. Polisens markeringar av de förolyckade personerna efter olyckan.

Figure 5. Police drawing of the location of accident victims after the accident.

Siilon alapää oli noin 10 m:n etäisyydellä onnettomuuspaikasta ja sieltä johti onnettomuuspaikan ohi koteloitu kuminen hihnakuljetin, joka paloi onnettomuudessa. Onnettomuuspaikan välittömässä läheisyydessä paloivat muun muassa kulkutasot ja osa rakenteista. Onnettomuusventtiili paloi pahoin, putkilinja paloi puhki ja kääntyi reaktivoivan vaikutuksesta noin 3 metriä ylöspäin (kuva 6). Vain venttiili ja lyhyt osa putkea venttiilistä alaspäin eli alavirtaukseen päin paloivat. Happilinjän lisäksi onnettomuuspaikalla olleista putkilinjoista rikkoutui vain paineilmaputki, joka piti kovaa ujellusta siihen saakka kunnes sen venttiili suljettiin.



Kuva 6. Onnettomuusventtiilin yläpuolinen happiputki venttiilin jäänteineen taipui onnettomuudessa noin kolme metriä ylöspäin.

Bild 6. Syreledningen ovanför olycksventilen med återstoden av ventilen böjde sig uppåt ca. tre meter i olyckan.

Figure 6. The oxygen pipe above the accident valve with the valve remnants bent about three metres upwards in the accident.

Onnettomuusventtiilin pahoin palanut läppä löytyi onnettomuuspaikalta lattiaritilältä. Onnettomuusventtiilistä puuttui käsipyörä, jolla venttiiliä käytettiin vaihteen välityksellä. Et-sinnöistä huolimatta käsipyörää ei löydetty ja on mahdollista, että se paloi tulipalossa. Venttiilin vaihde vaurioitui vain vähän. Putkipihdit löytyivät samalta tasolta kuin uhrien ruumiit läheltä venttiilitasolle vieviä tikkaita. Alihankkijan työnjohtajan ruumiin käden läheltä löytyi hitsauspoltin, jossa ei ollut letkuja eikä niiden liitinosia.

Palaneen happilinjan lähemmässä tarkastelussa todettiin onnettomuusventtiilin olleen vähän raollaan. Onnettomuusventtiilin kohdalla olleen, paineen tasaukseen tarkoitetun ohuen ohitushaaran palloventtiili oli kiinni-asennossa siten, että sen säätökahva ei ollut aivan ääriasennossaan. Onnettomuusventtiilin käsipyörän akselin sokan reiästä löydettiin katkennut ruuvi.

Viereinen raakahappilinja säilyi ehjänä ja sen pääsulkuventtiili sekä ohitusventtiili olivat auki.



Kuva 7. Kuvassa putkipihdit, joilla onnettomuusventtiiliä yritettiin avata. Pihtien leuat ovat auki venttiilin käsipyörän akselin paksuuden verran.

Bild 7. Foto av rörtången med vilken mannen försökte öppna olycksventilens käftar. Avståndet mellan rörtångens käftar är lika med tjockleken hos ventilens handhjulaxel.

Figure 7. Photo of the pipe tongs with which the men tried to open the accident valve. The jaws are as wide open as the valve hand wheel stem is thick.



Kuva 8. Kuva venttiilin vaihteesta. Nuolen osoittamassa kohdassa käsipyörän sokan paikalla on katkennut ruuvi.

Bild 8. Foto av ventilens kuggväxel. Istället för handhulets axelsprint sitter en avbruten skruv (där pilen pekar).

Figure 8. Photo of the valve gear. In the place of the hand wheel bolt pin there is a broken screw (where the arrow points).

1.4 Pelastustoiminta ja raivaus

1.4.1 Hälytykset

Tehtaan laitospalokunnalla oli onnettomuushetkellä käynnissä paloharjoitukset tehdas-alueella. Osa harjoituksissa olleista paloryhmäläisistä kuuli pamauksen ja pian sen jälkeen he paikallistivat tarkemman onnettomuuspaikan ulkona näkyneestä pöly- ja savupilvestä.

Ensimmäinen ilmoitus onnettomuudesta kello 10.54 tuli tehtaan pääportilla olevaan aluevalvomoon automaattisen paloilmoitinjärjestelmän välityksellä vikailmoituksena ja välittömästi tämän jälkeen tuli paloilmoitus kaapelipalosta jaloterässulatto 2:lta. Portilta soitettiin puhelimitse kello 10.56 Lapin hätäkeskukseen ennalta laaditun ohjeen mukaisesti ja ilmoitettiin, että tehtaalta on tullut automaattisen paloilmoitinjärjestelmän kautta kaapelipaloa osoittava palohälytys.

Lapin hätäkeskus hälytti kello 10.57 paikalle Tornion ja Haaparannan palokuntien pelastusjoukkueen tehtävänä ”kaapelipalo AvestaPolarit jaloterässulatto”. Lisäksi paikalle hälytettiin sairaankuljetusyksiköitä Torniossa, Kemissä ja Haaparannasta, sekä kello 11.33 pelastushelikopteri SEPE Oulusta. Ensimmäiset kaupungin palolaitoksen yksiköt saapuivat onnettomuuskohteeseen kello 11.08. Paikalle hälytettiin seuraavat yksiköt: Pelastusyksikkö T11 (1+3)¹, säiliöyksiköt T14 (0+1) ja T24 (0+1) sekä miehistönkuljetusyksikkö T27 (0+1). Karungin VPK:sta kohteeseen hälytettiin karkiauto T40 (1+3), säiliöyksikkö T44 (0+2) ja Tornion SPR:n sairaankuljetusyksikkö T191. Lisäksi paikalle hälytettiin Ruotsista Haaparannasta pelastusyksikkö H-R 631 (1+4) ja säiliöyksikkö H-R 632 (0+1) sekä sairaankuljetusyksikkö H-R 92. Lisäksi paikalla oli Tornion palolaitoksen nostolavayksikkö T16 (0+1). Myöhemmin paikalle hälytettiin vielä sairaankuljetusyksiköt T192 ja K192. Yhteensä paikalla oli tehdaspalokunta mukaan lukien 12 palokunnan yksikköä ja 4 sairaautoa.

Hätäkeskuksen päivystäjä ilmoitti puhelimitse kello 11.40 onnettomuudesta Lapin lääninhallituksen päivystäjälle.

Oulun yliopistollinen sairaala kuuli onnettomuudesta tiedotusvälineistä ja kohotti oma-toimisesti valmiuttaan välittömästi. Sairaalassa varauduttiin alkuun vastaanottamaan useita palovammapotilaita.

1.4.2 Toiminta onnettomuuspaikalla

Tehtaan laitospalokunta saapui onnettomuuspaikalle kello 10.57 ja käynnisti pelastustoiminnan sekä tiedustelun. Samaan aikaan onnettomuuspaikan alapuolella olevaan kierrätysteräshalliin selvitettiin tehtaan omissa paloautoissa olleet vesitykit, joilla saatiin suunnattua suuri määrä vettä palokohteeseen alhaalta päin rakenteita apuna käyttäen. Vesisuihkut suunnattiin tehdashallin kattoon kohteen yläpuolelle, josta vesi putosi alas palokohteeseen. Osa tehtaan paloryhmäläisistä puki ylleen halliin ennakoita sijoitetut

¹ Suluissa yksiköiden henkilövahvuus muodossa (yksikön esimies + muu henkilöstö).

paineilmahengityslaitteet ja lähti paloryhmän johtajan johdolla tekemään sammutus-hyökkäystä onnettomuuskohteeseen portaita pitkin. Kovan kuumuuden ja savun vuoksi portaikosta ei aluksi päästy lähelle onnettomuuspaikkaa, joten yrityksestä luovuttiin

Tilannetta johti Tornion päivystävä palomestari, joka tässä tapauksessa oli Tornion kaupungin palopäällikkö. Palopäällikkö piti tehtaan sammutusryhmien esimiesten kanssa onnettomuuspaikalla tilannepalaverin, jossa selvisi että alueella on onnettomuuden jäljiltä kateissa muutama alueella työskennellyt henkilö. Heidän etsintänsä keskitettiin onnettomuuskohteen välittömään läheisyyteen. Kun tulipaloa oli saatu rajoitettua raaka-ainehallista käsin, Tornion palolaitoksen palomiehet menivät tehtaan paloryhmäläisten opastuksella onnettomuuspaikalle ja löysivät palaneesta tilasta kolme uhria.

Tulipaloa pidettiin kaapelipalona eikä kenelläkään ollut tietoa alkuvaiheessa siitä, että kysymyksessä oli happilinjan palo. Epäselvän tilanteen lisäksi pelastustoimintaa vaikeutti viestivälineiden heikko kuuluvuus tehdasalueella sekä katkenneesta paineilmalinjasta johtunut kova taustamelu.

1.5 Poliisin toiminta

Poliisille tuli tieto onnettomuudesta kello 11.03 tehtävänä ”suuri rakennuspalo.” Hälytyskeskus lähetti paikalle kahdeksan poliisipartiota, joista ensimmäinen oli paikalla kello 11.20. Loput poliisipartiot saapuivat paikalle niin, että viimeinen oli onnettomuusalueella kello 14.10. Poliisin toimintaa tapahtumapaikalla johti kenttäjohtajana toiminut Tornion kihlakunnan poliisilaitoksen ylikonstaapeli.

Tapahtumapaikalla poliisi eristi onnettomuusalueen, jotta pelastustoimet voitiin suorittaa ilman häiriöitä. Poliisi alkoi välittömästi selvittää onnettomuudessa kadonneiksi ilmoitettujen henkilöllisyyttä. Lisäksi poliisi järjesti pelastushelikopteri SEPE:n turvallisen laskeutumisen.

Poliisilaitosten rikosteknisten yksiköiden tutkijat aloittivat välittömästi paikalle saavuttuaan onnettomuuden tutkinnan ja onnettomuusaineiston taltioinnin. Poliisin tutkijat ottivat onnettomuuspaikalta valokuvia ja videokuvaa, jotka luovutettiin Onnettomuustutkimuskeskuksen tutkintalautakunnalle. Viimeiset teknisen tutkinnan poliisipartiot poistuivat onnettomuuspaikalta kello 21.00. Lisäksi poliisi suoritti onnettomuudessa menehtyneiden henkilöiden kuolemansyyntutkinnan.

1.6 Onnettomuudesta aiheutuneet vahingot

1.6.1 Henkilövahingot

Onnettomuudessa kuolivat 22-, 47- ja 48-vuotiaat miehet. He olivat kaikki samassa tilassa, jossa onnettomuus tapahtui. Lisäksi useat henkilöt saivat lähinnä savusta johtuvia lievempiä vammoja ja heidät ohjattiin tehtaan työterveysasemalle, johon myös perustettiin tehtaan henkilöstölle tarkoitettu kriisipiste. Tehtaan oma lääkintähenkilöstö antoi kriisiapua useille tehtaalla työskennelleille henkilöille.

1.6.2 Materiaalivahingot

Onnettomuuden aiheuttamien vahinkojen korjauskustannukset olivat noin kaksi miljoonaa euroa. Lisäksi merkittäviä kustannuksia aiheuttivat tuotannonmenetykset noin yhden kuukauden ajalta. Menetykset olivat yhteensä noin 60 000 tonnia terästä, joka vastaa katemenetyksinä noin 9 miljoonaa euroa.

Onnettomuudessa tuhoutui tulipalon vaikutuksesta happilinjan putkistoa 30 cm. Lisäksi putkisto vaurioitui usean metrin matkalta. Myös samassa tilassa olleet raakahapen, argonin, nestekaasun ja paineilman putkistot vaurioituivat. Onnettomuusventtiiliin lähellä ollut paineilmaputki halkesi kuumuuden vaikutuksesta. Lisäksi palossa vaurioitui huomattava määrä erilaisia sähkökaapeleita.

Raaka-ainepihan ja onnettomuustilan alapuolella olevan hallin ulko-ovena toiminut metallinen nosto-ovi oli yläasennossa, josta se putosi alas.

Onnettomuustilan alapuolella oleva seuraava venttiilitasanne kärsi myös huomattavia vahinkoja. Tason teräksiset kannatinpilarit vääntyivät kuumuuden vaikutuksesta. Lisäksi siellä olevat kaasuputkistot kärsivät huomattavia vahinkoja. Halkaisijaltaan suuret runkoputket säilyivät kuitenkin ehjinä.

1.6.3 Ympäristövahingot

Onnettomuus ei aiheuttanut ympäristövahinkoja.

1.7 Tiedottaminen

Onnettomuudesta järjestettiin onnettomuuspäivänä kello 14.00 ensimmäinen tiedotustilaisuus tehtaassa ruokalassa. Tiedotustilaisuuteen osallistuivat AvestaPolarit Stainless Oy:n, Tornion kihlakunnan poliisilaitoksen sekä Tornion palolaitoksen edustajat. Onnettomuustutkimuskeskuksen tutkijat eivät olleet paikalla ennen tiedotustilaisuuden alkua.

Onnettomuustutkimuskeskus antoi 22.9.2003 lehdistötiedotteen tutkintalautakunnan kokoonpanosta ja siihen mennessä saadut tiedot onnettomuuden tapahtumisesta. Onnettomuus herätti suurta kiinnostusta tiedotusvälineissä ja tutkintalautakunta vastasi tiedotusvälineiden tiedusteluihin.

Tutkinnan valmistumisen yhteydessä tiedotusvälineille annettiin tiedote, jonka sisältö vastasi tutkintaselostuksen tiivistelmää.

2 ONNETTOMUUDEN TUTKINTA

Onnettomuustutkintakeskuksen päivystäjä sai tiedon onnettomuudesta puhelimitse kello 12.10 sisäasiainministeriön päivystävältä pelastusviranomaiselta. Sitä ennen tieto oli jo saatu tiedotusvälineiltä. Kolme Onnettomuustutkintakeskuksen tutkintalautakuntaan myöhemmin nimettyä tutkijaa saapui onnettomuuspaikalle samana päivänä kello 18. Tapahtumapaikalla suoritettiin paikkatutkintaa ja henkilöiden kuulemisia kahden vuorokauden ajan ja myöhemmin vielä useana päivänä. Tutkintalautakunnan jäseniä kävi useita kertoja tehtaalla kuulemassa henkilöitä. Samalla tutustuttiin vaurioihin ja kaasujen käsittelyyn tehtaalla.

Onnettomuusventtiili sekä osa siihen liitettyä putkistoa toimitettiin VTT:lle Espooseen, jossa se koottiin samanlaiseen muotoon kuin se oli ollut ennen onnettomuutta. Venttiilille, venttiilin lautaselle ja katkenneelle sokan tilalla olleelle ruuville tehtiin erilaisia tutkimuksia. Myöhemmin VTT:lle toimitettiin tehtaalta neljä muuta onnettomuuslinjassa olutta ehjää venttiiliä ja niille tehtiin tarkempia tutkimuksia.

Osa tutkintalautakunnan jäsenistä kävi tutkinnan aikana tutustumassa Rautaruukin Raahan terästehtaaseen ja muun muassa aineistoon, joka oli kerätty siellä tammikuussa 1997 tapahtuneen happiventtiilionnettomuuden jälkeen. Lisäksi tutkintalautakunta perehtyi muiden valmistajien venttiiliratkaisuihin.

Pian onnettomuuden jälkeen tehdas teetti happilinjan sisäpuolisen kuvauksen ja samassa yhteydessä otettiin näytteitä putkesta löytyneistä epäpuhtauksista. Epäpuhtauksia analysoitiin sekä tehtaalla että VTT:llä. Onnettomuustutkintaa varten tehdas rakensi Tornioon koelaitteiston, jolla tehtiin venttiilin toimintakokeita. Lisäksi tutkinnan yhteydessä tehtiin tehtaalla yleinen turvallisuustason arviointi ja sen loppuraportti on tämän tutkintaselostuksen liitteenä.

2.1 Rakennus

Onnettomuus tapahtui rakennuksessa, jossa on terässulatto. Sulatto tuottaa ruostumattomaa ja haponkestävää terästä valuaihioiksi valettuna. Raaka-aineina käytetään kierrätysterästä, ferrokromia ja muita ferroseoksia sekä nikkeliä. Kierrätysteräksen varastointia varten on suuri varastohalli. Vanhan terässulaton rinnalle rakennetussa uudessa sulatto 2:ssa on muun muassa valokaariuuni, niin sanottu AOD-konvertteri, jossa hiili poistetaan sulasta panoksesta sekä jatkuvavalukone. Happea puhalletaan valokaariuuniin ja konvertteriin. Rakennuksessa on myös useita valvomotiloja, joista tuotantoa ohjataan.



Kuva 9. Kuvakooste sulattorakennuksen yläosasta. Onnettomuuskohte on nuolen osoittamassa paikassa seinän sisäpuolella. (Kuva: Tornion poliisi)

Bild 9. Fotosammansättning av den övre delen av smältverket. Olycksplatsen är innanför väggen där pilen pekar.

Figure 9. Photo compilation of the upper part of the smelting house. The site of the accident is on the inside of the wall where the arrow points.

2.1.1 Onnettomuustila

Onnettomuus tapahtui venttiilihuoneessa, joka oli kevytrakenteinen, osittain avoin tila. Lattia oli pääasiassa teräsritilää ja seinät aaltopeltiä. Happilinja oli johdettu venttiilihuoneeseen suoraan ulkoseinän läpi. Huonetilan avoimuus ja kevytrakenteisuus estivät osittain onnettomuuden laajenemisen, koska paine pääsi purkautumaan onnettomuustilasta lähes vapaasti. Tila oli erotettu paloseinillä valokaariuunista ja porraskäytävästä. Muut seinät ja katto olivat lähinnä sääsuojina. Huoneen sulaton puoleisella reunalla oli kotolettu kuljetin, jonka hihna oli kumia.

Samassa tilassa oli happilinjnan lisäksi muita putkistoja, joissa kulki argonia, raakahappoa, nestekaasua, paineilmaa ja hiilimonoksidia. Putkistoihin kuului muun muassa pääsulkuventtiileitä, ohituslinjoja, tyhjennysyhteitä ja niihin liittyviä venttiileitä.

2.1.2 Happijärjestelmä

Hapen käyttö ja ominaisuudet

Happikaasua käytetään Tornion terästehtaalla pääasiassa konverterissa teräksen hiilipitoisuuden vähentämiseen sekä vähäisempiä määriä tulenkestävillä materiaaleilla vuorattujen sulankäsittelyastioiden kuumennuspolttimissa.

Yleisesti happea käytetään hitsauksessa ja leikkauksessa polttokaasun ohessa. Lisäksi sitä käytetään valkaisuun selluteollisuudessa, jäteveden puhdistuksessa, elintarvikkeiden suojakaasupakkauksissa, kalanviljelyssä, kasvihuoneiden kasteluvesissä sekä sairaaloissa. Hapesta valmistetaan myös otsonia (O₃), jota käytetään pääasiassa erilaisiin puhdistustarkoituksiin.

Happi (O₂) on väritön ja hajuton kaasu. Kaasun tiheys on 1,1-kertainen ilman tiheyteen verrattuna. Hapetta voidaan varastoida ja kuljettaa puristettuna kaasuna tai nestemäisenä. Nestemäisen hapen tiheys on 1,1-kertainen veteen verrattuna. Litra nestemäistä hapetta vastaa noin 840 litraa kaasumaista hapetta. Nesteytetty happi on vaaleansinistä ja erittäin kylmää.

Happi ylläpitää palamista ja lisää tulipalon voimakkuutta ilmassa tapahtuvaan paloon verrattuna. Sen vuoksi hapen vuoto aiheuttaa syttymisvaaran ja palo on kiivas ja vaikeasti sammutettavissa. Ilman happipitoisuuden noustessa myös monet vaikeasti syttyvät tai palamattomat materiaalit palavat ja voivat syttyä itsestään palamaan. Rakennemateriaaleista vain keraamiset oksidit ja jalometallit eivät pala hapessa.

Tornion tehtaalla putkistot oli valmistettu ruostumattomasta teräksestä, jota oksidikalvo suojaa syttymiseltä. Oksidikalvon ansiosta ruostumattoman teräksen syttymislämpötila hapessa on noin 1 400 °C. Syttymislämpötila on huomattavasti alempi, jos oksidikerros on vahingoittunut. Syttyminen putkistossa on mahdollista myös silloin, jos putkistossa on jotain alemman syttymislämpötilan omaavaa ainetta. Tiivistemateriaalina ja liukulaakerin pinnoitteena käytetyn polytetrafluorieteenin² (PTFE) eli teflonin itsesyttymislämpötila on eri lähteiden mukaan hapessa 420-530 °C.

Hapen vaaraa osoittavana standardilausekkeena on R8: Aiheuttaa tulipalon vaaran palavien aineiden kanssa. Turvallisuustoimenpiteitä osoittavana lausekkeena on S17: Säilytettävä erillään syttyvistä kemikaaleista. Varoitusmerkinä käytetään merkkiä *Hapettava (O)*.

Tehtaan happijärjestelmä

Tehtaan happijärjestelmään kuuluivat kaasuasema, raakahappilaitos, hapen varastosäiliöitä ja hapen siirtoputkisto.

Kaasuasemalla käytettiin nestehapetta, joka tuotiin sinne säiliöautoilla ja säiliövaunuilla. Nestehappi varastoitui tilavuudeltaan noin 1 000 m³:n kylmäsäiliössä. Nestehappi pumpattiin varastosäiliöstä vesihaudehöyrystimeen, jossa se höyrystyi ja lämpeni haluttuun lämpötilaan. Tässä pumppauksessa nestemäisen hapen paine nostettiin kaasumaisen hapen siirtoputkiston paineeseen ja happi johdettiin puskurisäiliöihin. Puskurisäiliöitä oli kolme ja jokaisen tilavuus oli 100 m³. Rinnan kytkettyjen puskurisäiliöiden tarkoituksena oli pitää siirtoputkiston paine 32–35 baarissa myös silloin, kun hapen kulutus vaihteli nopeasti. Ohjausjärjestelmä sääti nestehapen pumppausta höyrystimeen siten, että siirtoputkiston paine pysyi halutulla alueella.

Kaasumaisen hapen syöttö puskurisäiliöihin voitiin keskeyttää kaasuasemalla olevalla happijärjestelmän hätäpysäytyspainikkeella. Hätäpysäytys ei kuitenkaan eristänyt puskurisäiliöitä siirtoputkistosta. Jokaisessa puskurisäiliöstä lähtevässä happilinjassa oli käsikäyttöinen sulkuventtiili 3–4 m:n korkeudella maanpinnasta. Sulkuventtiilien luona ei

² Polytetrafluorietyyleeni (PTFE) tunnetaan myös kaupanimellä Teflon. Materiaalin ominaisuuksia ovat muun muassa hyvä kemikaalien kestävyys ja alhainen kitkakerroin. Jos PTFE-kappale sytytetään ilmassa, palo ei leviä siinä. Sen sijaan hapella rikastetussa ilmassa palon leviäminen on mahdollista.

kuitenkaan ollut työtasoja tai kulkusiltaa, vaan niiden sulkemiseksi oli haettava tikkaat ja kiivettävä sulkuventtiilien luo. Lisäksi hapen runkoputkistossa oli linjan pääsulkuventtiili noin 100 m:n etäisyydellä kaasuasemalta. Pääsulkuventtiiliä käytettiin kulkusillalta.

Onnettomuudessa tyhjenivät puristettua happea sisältäneet puskurisäiliöt sekä noin 700 m halkaisijaltaan 300 mm:n runkoputkea. Näiden yhteistilavuus oli 350 m³, joka vastaa normaalilämpötilassa ja -paineessa (NTP) noin 12 000 m³ kaasumaista happea. Lisäksi höyrystin höyrysti noin 4 000 kg nestehappea, joka vastaa noin 3 000 m³:ä kaasumaista happea. Kaikkiaan siis vuotoaukon kautta pääsi purkautumaan sulattorakennukseen normaalipaineisena noin 15 000 m³ kaasumaista happea.

Raakahappilaitoksella valmistettiin molekyyliaseulamenetelmällä raakahappea. Menetelmässä käytetään kahta alumiinisilikaattirakeilla täytettyä säiliötä, jotka paineistetaan vuorotellen. Kun säiliön kautta puhalletaan puristettua ilmaa, ilman tyyppi sitoutuu rakeisiin, mutta happi ja argon eivät sitoudu. Säiliön läpi kulkenut kaasu sisältää siten noin 95 % happea ja 5 % argonia sekä muita kaasuja. Tätä seosta kutsutaan raakahapeksi. Raakahapen paine nostettiin kompressorilla siirtoputkiston paineeseen.

Terästehtaalla sattui vuonna 1986 tulipalo, jossa kaasujen jakohuoneessa syttyi niin sanotun mutapesän sihti palamaan. Palo poltti reiän happiputkeen, josta palava suihku purkautui huoneeseen ja sytytti kaapelointia palamaan. Henkilövahinkoja palo ei aiheuttanut. Lisäksi tehtaalla sattui vastaava sihdin palaminen elokuussa 2002 senkkaseman venttiilihuoneessa. Kyseinen palo oli sammunut itsestään, eikä se aiheuttanut henkilövahinkoja. Itsestään sammunut palo havaittiin myöhemmin huollon yhteydessä. Tämän tapahtuman jälkeen tarkastettiin kaikki happilinjassa olevat sihtipesät ja myöhemmin sihdit poistettiin kokonaan käytöstä.

2.1.3 Happilinja

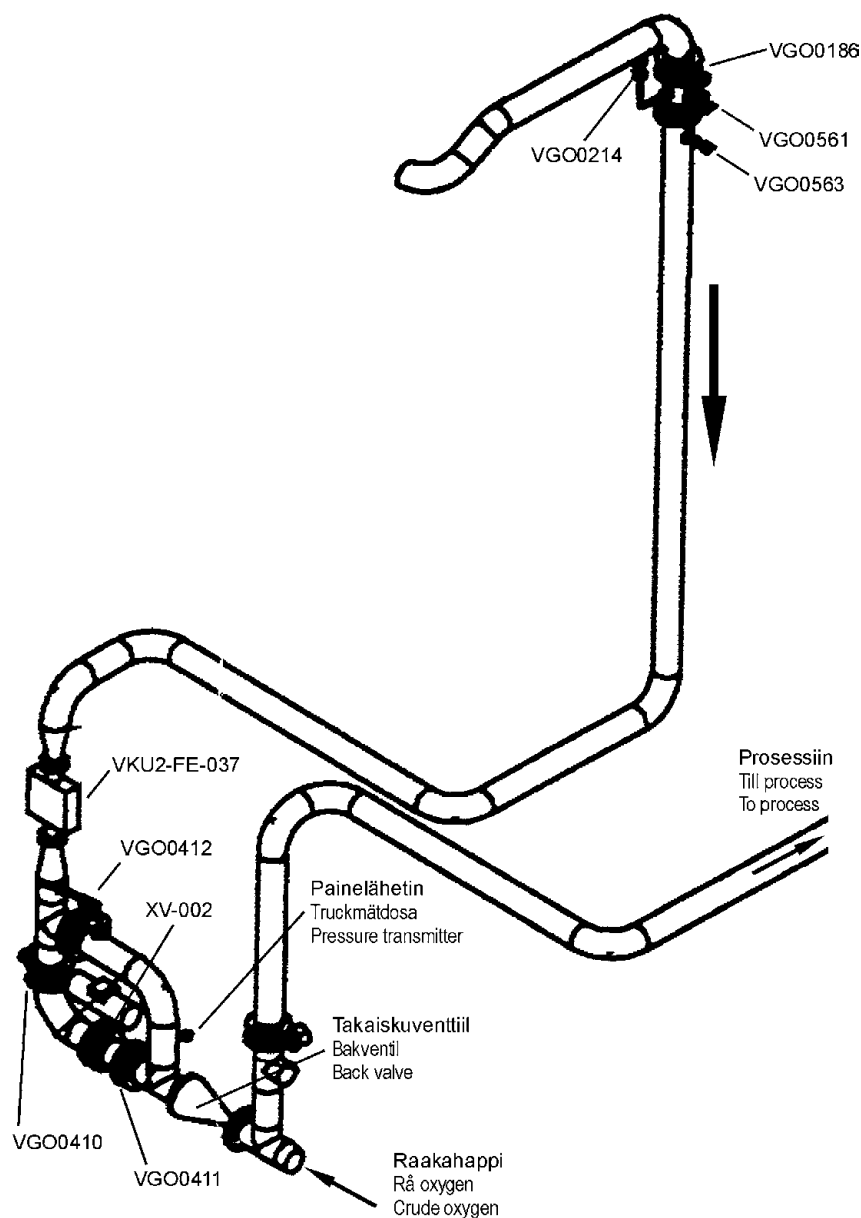
Sulatto 2:n happiputkisto suunniteltiin ja rakennettiin 40 baarin paineelle, kun sulatto 1:ssä nimellispaine on 25 baaria. Sulatto 2:n happiputken nimellishalkaisija on 300 mm ja sulatto 1:n happiputken halkaisija on 150 mm. Sulatto 2:n happiputkiston paine on korkeampi ja putken halkaisija suurempi kuin sulatto 1:ssä, koska putkisto suunniteltiin mahdollisesti myöhemmin rakennettavaa toista konvertteria ajatellen. Sulaton 2 kaasu-
linjat otettiin käyttöön 30.7.2002. Aluksi myös sulatto 2:n happilinjassa käytettiin 25 baarin painetta. Paine kuitenkin nostettiin 18.8.2002 35 baariin sen jälkeen, kun sulatto 1:n happilinjaan oli asennettu paineenalennusventtiili.

Onnettomuudessa vaurioitunut hapen runkolinja tuli ulkoa sulaton kolmannessa kerroksessa olevaan venttiilihuoneeseen, jossa onnettomuudessa palanut venttiili oli. Happiputken halkaisija oli noin 300 mm ja seinämän paksuus 6 mm. Putki oli valmistettu ruostumattomasta teräksestä kuten kaikki muutkin venttiilihuoneessa olleet putket nestekaasuputkea lukuun ottamatta.

Venttiilihuoneessa välittömästi onnettomuusventtiilin yläpuolella happilinjassa oli 90 asteen mutka, jossa linja kääntyi vaakasuuntaisesta pystyyn. Venttiilihuoneen ulkopuolella happilinja kulki putkisillalla sulaton kattorakenteiden yläpuolella useiden satojen metrien

matkan. Tällä tulovirtauksen suunnalla happilinjan lähin sulkuventtiili oli noin 600 metrin päässä onnettomuusventtiilistä. Kaasuaseman ja onnettomuusventtiilin välisen putkilinjan pituus oli noin 700 metriä.

Kuvassa 10 esitetyn happilinjan kaaviokuvan mukaisesti linja jatkui venttiilihuoneesta alemmalle venttiilitasolle. Välittömästi onnettomuusventtiilin alapuolella happilinjassa oli kaksi lyhyttä palloventtiiliä ja umpilaipalla varustettua sivuhaaraa, joiden halkaisija oli 25 millimetriä. Niitä voitiin käyttää muun muassa linjan tyhjennykseen ja typtettämiseen.



Kuva 10. Kuva happilinjasta. Onnettomuusventtiili on kuvan yläosassa merkittynä tunnuksella VGO0186.

Bild 10. Ritning av syreledningen. Olycksventilen markerad med VGO0186 är i den övre delen av bilden.

Figure 10. Drawing of the oxygen line. The accident valve marked as VGO0186 is in the upper part of the drawing.



Kuva 11. Happilinja venttiilitasolla, noin 15 m venttiilihuoneen alapuolella. Vasemmalla on onnettomuusventtiilin kanssa samanlainen läppäventtiili VGO0410.

Bild 11. Syreledning på ventilnivån, ca. 15 m nedanför ventilrummet. Till vänster sitter en klaffventil VGO0410 av liknande typ som olycksventilen.

Figure 11. Oxygen line on valve level, about 15 m below the valve room. On the left there is a butterfly valve VGO0410 similar to the accident valve.

Happilinjaa pitkin virtaussuunnassa noin 20 metrin etäisyydellä onnettomuusventtiilistä oli Micro Motion CMF400 –massavirtamittari, joka kuvassa 10 on merkitty tunnuksella VKU2-FE-037. Mittarin valmistaja tarkasti mittarin onnettomuuden jälkeen eikä havainnut siinä palojälkiä. Likimain onnettomuushetkellä mittari rekisteröi pienen massavirran, joka saattoi johtua hapen virtauksesta onnettomuusventtiiliin kautta seuraavaan putkijaksoon.

Sulkuventtiilit onnettomuusventtiilistä virtaussuuntaan

Happilinja oli vaakasuorassa jälleen venttiilitasolla, noin 15 metriä venttiilihuoneen alapuolella. Ennen mutkaa linjassa oli samanlainen käsikäyttöinen läppäventtiili kuin onnettomuusventtiili. Venttiilin tunnus oli VGO0410 (kuvat 10 ja 11). Venttiilin etäisyys onnettomuusventtiilistä happilinjaa pitkin oli noin 22 metriä. Tästä venttiilistä noin 1,4 metrin etäisyydellä linjan vaakasuorassa osassa oli paineilmalla toimiva instrumenttiventtiili XV-002, joka voitiin avata ja sulkea valvomosta. Venttiili oli myös painevalvottu, eli se sulkeutui automaattisesti paineen laskiessa alle 18 baarin. Tämä merkitsi sitä, että venttiiliä ei ollut tarkoitettu avattavaksi ennen kuin linja oli paineistettu siihen saakka.



Instrumenttiventtiilistä noin puolen metrin etäisyydellä happilinjassa oli taas samanlainen käsikäyttöinen läppäventtiili VGO0411 kuin onnettomuusventtiili. Heti läppäventtiilin jälkeen linjaan yhtyi ylhäältä tuleva ohitushaara, jonka halkaisija oli noin 300 millimetriä. Haaran alkupäässä, noin 700 millimetriä läppäventtiilin VGO0410 yläpuolella oli käsikäyttöinen läppäventtiili VGO0412, jolla haara voitiin sulkea. Normaalitylanteessa prosessin ollessa käynnissä tämä venttiili oli suljettu ja happivirtaus kulki instrumenttiventtiilin läpi. Tarvittaessa oli mahdollista esimerkiksi huoltotoimenpiteiden vuoksi irrottaa instrumenttiventtiili katkaisematta prosessia, kun läppäventtiilit VGO0410 ja VGO0411 suljettiin ja virtaus johdettiin sivuhaaran ja venttiilin VGO0412 kautta. Heti onnettomuuden jälkeen tehdyssä tarkastuksessa kaikkien venttiilitasolla olleiden venttiilien todettiin olevan kiinni. Myös onnettomuusventtiilistä seuraava venttiili VGO0410 oli kiinni, mutta tarkastuksessa havaittiin, että sitä ei ollut väännetty tiukasti kiinni.

Venttiilin VGO0412 jälkeen sivuhaaran pystysuoraan osaan oli liitetty painelähetin, joka mittasi linjassa vaikuttavaa painetta. Prosessiautomaatiojärjestelmä oli onnettomuushetkellä tallentanut suljetun läppäventtiilin takana olleen painelähettimen mittaustulokseksi noin 6 baaria, mikä oletettavasti johtui onnettomuuden aiheuttamasta mittausvirheestä.

Venttiilien vaihdot seisokin aikana

Happilinjaan, noin puolen metrin etäisyydelle ohitushaaran yhtymäkohdasta, tarkoitettuna takaiskuventtiilissä oli havaittu vuotoja ennen putkilinjaan asennusta vuonna 2002 ja se oli lähetetty takaisin valmistajalle Italiaan korjattavaksi. Samalla oli lähetetty korjattavaksi myös raakahappilinjaa vastaava takaiskuventtiili ja 21 pienempää takaiskuventtiiliä, jotka oli tarkoitettu kaasunjakohuoneeseen. Happilinjaa ja raakahappilinjaa takaiskuventtiilien tilalle oli silloin asennettu niin sanottu mannekiini eli takaiskuventtiilin korvaava putki, jossa oli takaiskuventtiilinä toiminut läppä.

Korjatut takaiskuventtiilit asennettiin paikoilleen huoltoseisokin aikana. Valmistaja on kertonut tehneensä venttiileille korjauksen jälkeen teollisuuden standardiproseduurin mukaisen puhdistuksen happikäyttöä varten. Venttiilit toimitettiin tehtaalle Tornioon umpiopakattuina.

Asennuksen yhteydessä takaiskuventtiileille tehtiin niin sanottu happipesu kahteen kertaan ja ne koeponnistettiin tyypeä käyttäen. Joissakin korjatuissa takaiskuventtiileissä havaittiin vielä vuotoja, mutta ne korjattiin tehtaalla. Takaiskuventtiilien asennustyö saatiin valmiiksi onnettomuutta edeltäneenä iltana 18.9.2003. Takaiskuventtiilit asensi tehtaan ulkopuolinen, linjaa rakentanut alihankkija. Asennuksia valvoi tehtaalla puolesta sama ulkopuolinen konsultti, joka oli valvonut myös kaasulinjojen asentamista.

Vaihdettaessa venttiileitä työn turvallisuus pyritään teollisuudessa yleensä varmistamaan sulkemalla linja sulkuventtiilin lisäksi sokealla laipalla, jolla mekaanisesti estetään kaasun virtaus putkessa. Sokeaa laippaa varten oli paikka noin puoli metriä onnettomuusventtiilin alapuolella ja lisäksi alemmalla venttiilitasolla. Tutkintalautakunnan saamien tietojen mukaan sokeaa laippaa ei seisokin aikana käytetty, koska takaiskuventtiili oli kahden suljetun pääsulkuventtiilin takana.

Seisokin aikana happilinjaan vaihdettiin myös ferrokromitehtaalle menevässä haarassa pääsulkuventtiili VGO0182, joka oli haponkestävä palloventtiili nimellishalkaisijaltaan 100 mm. Vaihtotyön teki 17.9.2003 tehtaan oma tehdaspalveluosasto. Vaihdon yhteydessä tyhjennettiin myös ennen onnettomuusventtiiliä ollut putkilinjan jakso kaasuseman suunnasta. Venttiilin vaihdon jälkeen runkolinja paineistettiin uudestaan pääsulkuventtiiliin VGO0197 ohitusventtiilin avulla. Vaihtotyön jälkeen ferrokromitehdas käytti kyseistä hapen runkolinjaa normaalisti kaksi päivää ennen kuin onnettomuus tapahtui.

Happilinjän rakentamisen laadunvalvonta

Happilinjän, kuten muutkin sulatto 2:n putkistot, suunnitteli ja rakennutti projektiorganisaatio, jossa oli erillinen putkistojen rakentamisesta vastannut ryhmä. Putkistot tilattiin vanhojen painelaitesäädösten ja SFS-standardien mukaisesti, mutta ne valmistuivat kokonaisuudessaan vasta painelaitesäädösten siirtymäkauden päättymisen jälkeen.

Putkistojen toimittajalle annetun ohjeen mukaan putket peitattiin typpi- ja fluorivetyhappolla, pestiin pesuaineella ja painepesulla, huuhdeltiin vedellä, kuivattiin ja lopuksi putkien päät tulpattiin.

Putket ja osat kuljetettiin asennustyötä varten esivalmistustelttaan, jossa niille tehtiin vastaanottotarkastus. Esivalmistustyön aikana suojatulpat poistettiin ainoastaan työn sitä vaatiessa. Liitoksia hitsattaessa suojatulpat poistettiin liitettävien putkien päistä ja suojakaasutulpat asennettiin paikoilleen, jonka jälkeen asennus tehtiin putken keskittäjää apuna käyttäen. Silloitus suoritettiin siten, että vältyttiin hiomiselta. Hitsaustyön jälkeen tarkastaja tarkasti hitsausliitoksen ja valvoi suojakaasutulppien poiston putkesta.

Asennusliitokset hitsattiin putkisillalla samaa menettelyä käyttäen kuin esivalmistuspaikalla. Liitos suojattiin alumiiniteipillä. Lopuksi vapaaksi jäänyt putken pää tulpattiin.

Happilinjän valmistuksen aikaisesta laadunvalvonnasta vuonna 2002 vastasi Laadunvarmistus Oy. Se vastasi muun muassa putkiston materiaalin valvonnasta aineodistusten ja pistokokeiden avulla, hitsausliitosten NDT³-tarkastuksesta, tiiveyskokeista, koeponnistuksesta ja käyttöönottotarkastuksesta. Happilinjän NDT-tarkastus tehtiin röntgenkuvaamalla yli 10 % hitsausliitoksista. Onnettomuuskohtaan ympärille ei ollut sattunut kuvattuja liitoksia. Happirunkolinjasta löytyi kuvauksissa yksi korjattava virhe. Laadunvarmistus Oy:n mukaan hitsausliitosten laatu oli tavallista parempi.

Ennen kuin uusi putkilinja otettiin käyttöön, sen puhtaus varmistettiin suositusten mukaisella puhallusmenetelmällä. Ensin puhallettiin uudet päärunkolinjat ja sen jälkeen sivuhaarat. Puhallettava putki suljettiin kummastakin päästä ja paineistettiin tyypellä. Toisen päään eteen asennettiin messinkinen näytelevy. Näytelevyn puoleisessa päässä putkea ollut venttiili avattiin ja virtaus kohti näytelevyä alkoi. Puhalluksen aikana hiukkasia ja muita epäpuhtauksia iskeytyi näytelevyyn, joka tarvittaessa vaihdettiin puhtaaseen. Puhallus toistettiin kunnes jälkiä ei enää tullut messinkilevyyn. Lisäksi puhdistuksen onnistumisesta pyrittiin varmistamaan ottamalla putkistosta näytteitä liinalla. Puhalluksesta vastasi putkilinjan rakentanut alihankkija.

³ NDT = Non-Destructive Testing, ainetta rikkomaton tarkastus

Vauriot

Happilinja vaurioitui onnettomuudessa alemmalle venttiilitasolle saakka. Putkiliitos katkesi palaneen venttiin alapuolelta niin, että linjassa ennen venttiiliä olleeseen mutkaan kohdistuneen paine-eron vaikutuksesta venttiili ja sen yläpuolinen putkilinjan osa nousivat noin kolme metriä kiertyen ylöspäin. Ohituslinja oli katkennut ohitusventtiin alapuolelta ja sen loppupää puuttui aina happilinjaan asti. Ohituslinjan alkupää nousi putkilinjan mukana ja ohitusventtiili vaurioitui lähinnä ulkopinnaltaan. Pääsulkuventtiin alapuolelta putkea paloi pois noin 30 cm:n matkalta ja tyhjennesyhde irtosi osittain. Myös noin 15 metriä alempana olevan alemman venttiilitason venttiilit jouduttiin vaihtamaan.

2.1.4 Onnettomuusventtiili

Kuvassa 12 on onnettomuusventtiin kanssa samanlainen venttiili. Venttiin läppä on käännettynä lähes auki-asentoon.



Kuva 12. Ehjä venttiili, joka on samaa tyyppiä kuin onnettomuusventtiili.

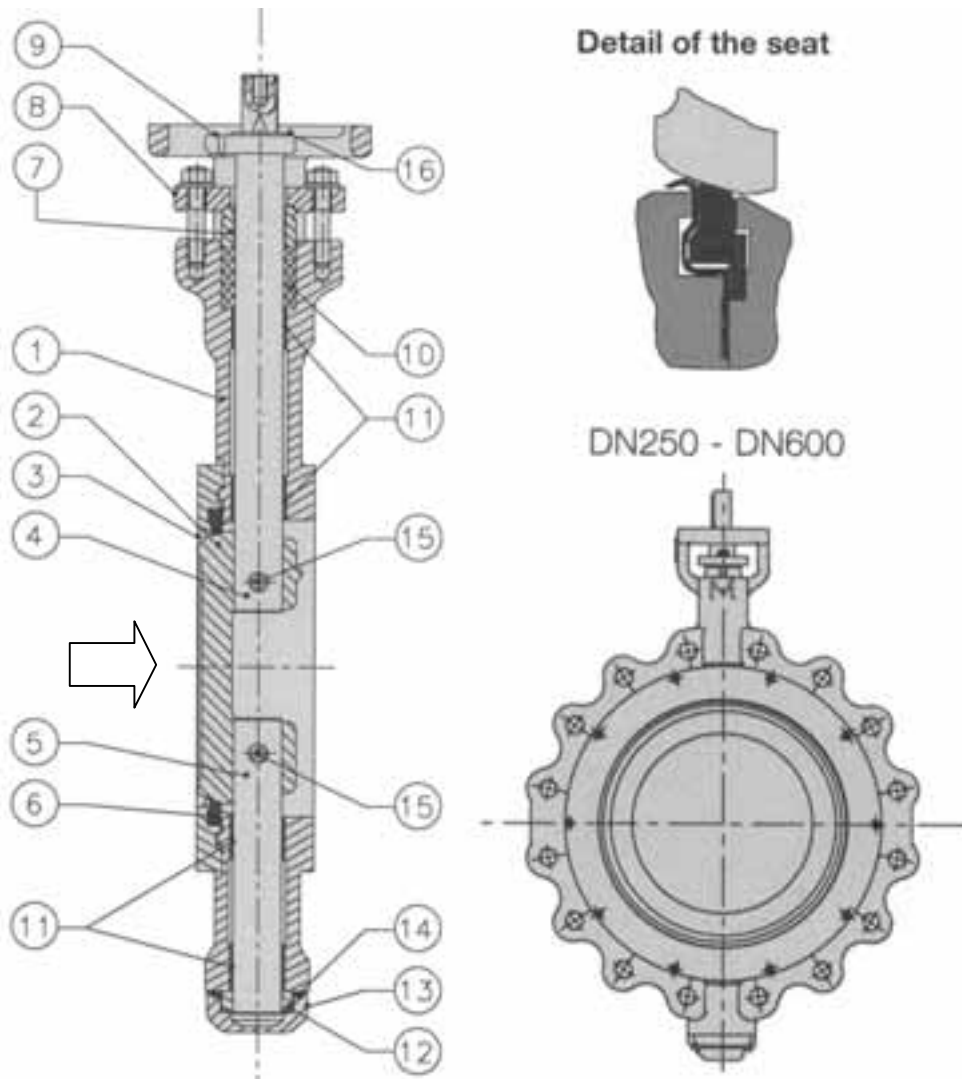
Bild 12. En intakt ventil av samma typ som olycksventilen.

Figure 12. An intact valve; the same type as the accident valve.

Tyyppi

Onnettomuudessa tuhoutunut venttiili oli ranskalaisen venttiilivalmistajan Sapag S.A:n toimittama läppäventtiili, jota yleisesti kutsutaan myös perhosventtiiliksi venttiin englan-

ninkielisen nimityksen "butterfly valve" mukaisesti. Valmistustodistuksen mukaan venttiili oli tyyppimerkinnältään "JHP BUTTERFLY VALVE 77113 SIZE 300 PN40-DEGREASED OXYGEN". Merkinnän mukaisesti venttiililautasen eli läpän nimellishalkaisija oli 300 millimetriä ja venttiilin nimellispaine, eli suurin käyttöpaine 40 baaria. Venttiilin runko ja läppä oli valmistettu niin sanotusta haponkestävästä teräksestä AISI 316. Läpän akselit oli valmistettu lujasta ruostumattomasta teräksestä 17-4Ph.



Kuva 13. Periaatepiirros venttiilistä ilman vaihdetta. Kuva esittää onnettomuusventtiiliä pienempää venttiiliä, joten mittasuhteet ovat poikkeavat. Tiivisterakenne (6) näkyy suurennettuna kuvan oikeassa yläreunassa. Kuvan numeroinnit: 2. läppä, 4. kara-akseli, 5. vapaa akseli ja 11. säteittäislaakerit.

Bild 13. Principdiagram över ventilen utan kuggväxel. Bilden visar en ventil som är mindre än olycksventilen, därför stämmer inte proportionerna. Den förstörade packningsstrukturen (6) kan ses i det övre, högra hörnet av bilden. Numrering i bilden: 2. klaff, 4. spindelaxel, 5. fri axel, samt 11. radiällager.

Figure 13. Drawing of the valve without the gear. Figure presents a smaller valve than the accident valve, so the proportions are divergent. The enlarged seat structure (6) can be seen in the right upper corner of the figure. Figure numbers: 2. disc, 4. spindle stem, 5. free stem, and 11. radial bearings.

Venttiilin runko oli testattu ISO 5208 -standardin mukaisesti 60 baarin ja venttiilin tiiveys 44 baarin paineella. Venttiili oli teollisuuden yleiskäyttöön tarkoitettu venttiili, mutta se oli tyyppimerkinnän mukaisesti puhdistettu happikäyttöä varten, eli sille oli tehty niin sanottu happipesu. Venttiilin painekokeissa oli käytetty tyyppiä.

Venttiilin 40 baarin nimellispaineesta huolimatta venttiilin rungossa oli 20 baarin nimellispainetta osoittava merkintä. Venttiilin valmistajalta saadun vastauksen mukaisesti venttiili oli alun perin suunniteltu 20 baarin nimellispaineelle, mutta se oli uudelleen suunniteltu ja laskettu 40 baarin nimellispaineelle. Tässä yhteydessä oli todettu, että rungon paksuus on riittävä myös 40 baarin nimellispaineelle eikä rungon valussa käytettyä muuttia tarvinnut muuttaa. Näin ollen rungossa oli edelleen merkintä PN 20. Saman tyyppisissä uudemmissa läppäventtiileissä rungon merkintä on muuttunut.

Venttiilissä oli PTFE-tiiviste, jonka sisällä oli metallinen epäyhtenäinen tukirengas. Lisäksi tiivisterakenteeseen kuului ohuesta ruostumattomasta teräslevystä valmistettu rengas tiiveyden takaamiseksi, kun ulkoinen tulipalo kuumentaa venttiiliä ja polymeeritiiviste pehmenee. Tätä osoittamassa venttiilissä oli FS-merkintä, eli se täytti tulipalotilanteessa asianomaisten standardien vaatimukset ja oli "fire safe". Venttiilin kokoamisvaiheessa fire safe- eli metallitiiviste tiivistettiin kiinnitysrengasta vasten silikonityyppisellä kitillä.

Venttiilin läppä on muodoltaan pallostaa, hieman isoympyrän sivusta, leikattu viipale. Akselit ovat isoympyrätasossa ja siten noin 25 millimetriä sivussa läpän tiivistyspinnasta, joka on osa mainittua pallopintaa. Läppää on kierrettävä noin viisi astetta ennen kuin sen reunaan alkaa syntyä aukkoa läpän tiivistyspinnan liu'uttua lakialueiltaan ulos rungossa olevasta tiivisteestä. Ensimmäisten viiden asteen alueella läpän tiiviste vastustaa kuormittamattoman venttiilin avaamista vähän.

Läpän akseli oli kaksiosainen. Läppää käyttävä akseli eli kara-akseli oli säteislaakeroitu runkoon kahdella liukulaakeriholkilla. Tiivisteenä toimi kiristettävä "poksi". Läppää tukeva eli vapaa akseli oli laakeroitu runkoon kahdella säteislaakeriholkilla. Läpän vapaan akselin päässä oli läpän keskittävä aksiaalilaakeri. Kaikkien säteislaakeriholkkien liukupintana oli teräskuoreen liimattu kudosvahvisteinen PTFE-kerros. Aksiaalilaakerin voitelemiseksi liukupinnoille oli pantu kuivavoiteluainetta.

Läpän akseleiden halkaisija oli 35 mm. Venttiilin pidättäessä suljettuna paine-eroa 40 baaria, kohdistui kahdelle akselille yhteensä kuorma 280 kN, eli 28 tonnia. Akselien pienen halkaisijan ja korotetun käyttöpaineen vuoksi laakeriin kohdistui hyvin suuri pintapaine. Kuorma aiheutti läppä-akselit-yhdistelmän taipumisen ja suurin pintapaine kohdistui siksi laakeriholkin reuna-alueelle. Laakeriholkkeja ei ollut suojattu putkistossa virtaavilta aineilta.

Venttiilin läpän kääntämistä varten käyttöpyörä oli yhdistetty kara-akseliin kierukkavaihteella, jonka välityssuhde oli 40. Tästä seurasi, että läpän avaaminen kokonaan auki, eli 90 astetta, vaati kymmenen käsipyörän kierrosta. Vaihte oli asennettu venttiilille siten, että aukiasentoa ilmaisevat tekstit "open" olivat ylösalaisin ja voideltava kierukkaosa näin ollen vaihteen karahammaspyörän yläpuolella (kuva 8). Teknisesti tämä asento ei

ole voitelun tai läpän asennon ilmaisimen lukemisen kannalta oikea. Vaihteen voitelu oli kuitenkin väärästä asennosta huolimatta toiminut, sillä avattaessa rasvaa oli myös yläpuolisella kierukka-akselilla, eikä vaihteen vastus tuntunut normaalia suuremmalta. Vaihteen avaamisen ja poistamisen yhteydessä voitiin myös todeta, että karapesä ja akseli olivat täysin kuivia. Tämä näyttäisi osoittavan, että vaihteen voitelurasvalla ei ollut mahdollisuutta päästä itse venttiiliin. Voitelulla ei siten näytä olleen yhteyttä venttiilin palamiseen.

Venttiilin hankinta ja käyttö

Onnettomuusventtiiliin toimitti tehtaalle suomalainen maahantuoja kesäseisokin 2002 aikana. Samalla toimitettiin suurehko erä saman valmistajan venttiileitä. Tehtaalla venttiileissä havaittiin vuotoa tiivisteiden kohdalta ja terästehdas palautti onnettomuusventtiiliin, seitsemän muuta samanlaista venttiiliä ja yhdeksän halkaisijaltaan pienempää samanlaista venttiiliä niiden valmistajalle tarkastettaviksi. Venttiilivalmistaja teki kaikille venttiileille tiiveyskokeet molempiin virtaussuuntiin 44 baarin paine-erolla ja palautti testin läpäisseet venttiilit terästehtaalle sellaisinaan. Tiiveyskokeessa vuotaneisiin venttiileihin vaihdettiin uusi tiiviste ja koe toistettiin. Koestuksessa ei pidetty erillistä testauspöytäkirjaa, joten ei tiedetä, vuotiko onnettomuusventtiili ensimmäisessä painekokeessa. Valmistaja palautti onnettomuusventtiiliin takaisin terästehtaalle 14.6.2002, jonka jälkeen se asennettiin paikalleen.

Tutkintalautakunnan saaman tiedon mukaan venttiili vuoti vielä asennuksen jälkeen tehdyssä koeponnistuksessa vähän. Saippuuliuoksen avulla todettu vuoto oli kuitenkin niin vähäistä, että sillä ei katsottu olevan merkitystä ja venttiili jätettiin sellaisena paikalleen.

Venttiilin asennuksen ja happilinjan käyttöönoton 2002 jälkeen onnettomuusventtiiliä ei tiettävästi suljettu ennen kuin seisokin alussa. Venttiili oli siis yhtäjaksoisesti auki aina seisokkiin saakka. Sulkemisesta ei ole kirjallisia tietoja, mutta kuulemisten ja keskustelujen perusteella sulkemisessa ei ollut ongelmia tai tavallisesta poikkeavaa. Kaiken kaikkiaan onnettomuusventtiiliä oli avattu ja suljettu arvioiden mukaan noin 5 kertaa.

Kiinnitys

Venttiili oli kiinnitetty molemminpuolisin ruuvein putkiston laippoihin venttiilinrunгон toimiessa liitosvoimien välittäjänä. Kummassakin liitoksessa oli 16 ruuvia. Venttiilin reikäjako poikkesi putkien irtolaippojen reikäjaosta, joten ruuveja oli ohennettu sorvaamalla ruuvin kaulasta. Silloin niihin jäi hieman liikutteluvaraa ja ne saatiin sopimaan venttiilin rungon kierteisiin.

Onnettomuusventtiiliin ruuvit kuvattiin onnettomuuden jälkeen röntgenlaitteella. Näin varmistuttiin siitä, että vastakkain olleiden ruuvien päiden välille oli jäänyt tyhjää tilaa ja ruuvit oli ollut mahdollista kiristää riittävän kireälle.

Venttiili onnettomuuden jälkeen

Venttiilin rungon palovauriot kasvoivat siirryttäessä kehää pitkin pois päin vaihteesta (kuva 14). Täysin puhki palanut rungon ja putken alue sijaitti likimain vaihteen vastakkai-

sella puolella vapaan akselin vieressä alueella, jossa läppä oli kääntynyt ylävirtaan (kuva 16). Täällä läpän puoleinen laakeriholkki ja akseli sen kohdalla olivat palaneet pois lähes kokonaan. Akselia ja holkkia oli vähän jäljellä vain ylävirran puolella. Laakeriholkkin alapuoli ja akselia ympäröivä rungon alapuoli olivat palaneet pois. Paljastunut akselin kohta oli palanut jonkin verran ja pintaan oli tarttunut palamistuotteita (kuva 16). Vaihteen puolella oleva laakeriholkki ja akseli olivat palaneet pois virtausaukon puoleisesta päästä, mutta täällä akselin alapuoli ja runko olivat jäljellä. Runko oli palanut kara-akselin alueella pääsääntöisesti vain virtauskanavan pinnalta. Venttiili oli palanut yläpuoleltaan eli päätiivisteiden alueelta melko täydellisesti joka suuntaan.



Kuva 14. Onnettomuuden jälkeen VTT:llä uudelleen koottu onnettomuusventtiili. Kuvassa näkyy ohituslinjan venttiili. Vaihteen keskellä näkyvästä keskiöstä on irtotettu muovinen osoitinkansi.

Bild 14. Olycksventilens återuppbyggd efter olyckan av VTT (Statens tekniska forskningscentral). Fotot visar shuntledningens ventil. Indikatorkåpan i plast har avlägsnats från mitten av kuggväxeln.

Figure 14. Accident valve reassembled after the accident by VTT (Technical Research Centre of Finland). The photo displays the by-pass line valve. The plastic indicator cover has been removed from the centre of the gear.

Venttiilin läppä irtosi venttiilin rungosta ilmeisesti silloin, kun linja katkesi ja putki ponnahti äkillisesti ylös. Tutkijoiden mennessä onnettomuuspaikalle läppä oli lattialla vinosti

onnettomuusventtiilin paikan alapuolella noin kolme metriä sivussa. Läppä oli palanut puhki vaihteen puoleisen kara-akselin kohdalta ylävirtaan kääntyneessä läpän sektorissa (kuva 15, kohta 1). Läpän tiivistyspinta oli palanut myös vapaan akselin vierestä sektorista, jossa se oli kääntynyt ylävirtaan (kuva 15, kohta 2). Tältä alueelta vapaan akselin vierestä venttiilin runko oli palanut täysin pois (kuva 16). Läpän tiivistyspinta oli täysin palanut alavirtaan kääntyneellä läpän puoliskolla vaurion ollessa suurin vapaan akselin vieressä (kuva 15, kohta 3). Tiivistyspinta oli ehjä ylävirtaan kääntyneen puoliskon keskellä (kuva 15, kohta 4).



Kuva 15. Venttiilin läppä ylhäältä (vasemmalla) ja alhaaltapäin valokuvattuna. Vasemmassa kuvassa läpän oikea puolisko on auki asennossa ylävirtaan päin ja vasen puolisko painuneena alavirtaan. Vaihteen puoleisen akselin eli kara-akselin tynkä on kuvissa alhaalla.

Bild 15. Ett foto taget uppifrån (till vänster) och ett foto underifrån av klaffen. Vänster foto: I öppet läge är höger sida av klaffen vänd uppströms, vänster sida är vänd nedströms. Den återstående delen av spindelaxeln (axeln på kuggväxelsidan) är nertill i bilderna.

Figure 15. A top (from left) and a down view photo of the disc. Left photo: The right side of the disc opens towards upstream, and the left side towards downstream. The stub of the spindle stem (the stem on the gear side) is in the lowest in the photos.

Palaneen venttiilin vaihteen asennosta voitiin päätellä, että palon aikana läppä oli ollut noin yhdeksän asteen kulmassa mitattuna tiivistepinnan määrittelemästä tasosta. Koska läppää oli kierrettävä noin viisi astetta ennen kuin sen reunaan alkoi syntyä aukkoa, oli läppä noin neljä astetta raollaan. Aukon leveys oli silloin suurimmillaan noin kolme millimetriä putkilinjan poikittaisessa suunnassa ja kuunsirpin muotoinen aukko oli noin 150 mm pitkä. Läpän kummallakin puolella olleiden kuunsirpin muotoisten aukkojen pinta-alat olivat yhteensä noin 600 mm².

Venttiilin vaihteen irrotuksen yhteydessä havaittiin myös, että karan kääntökulman liikerajoitin oli selvästi väärässä asennossa ja karan vaihteeseen sisälle ulottuva osuus oli noin 10 mm pitkä, kun sen olisi pitänyt olla 25 mm pitkä. Akseli oli ilmeisesti liikahtanut läpän irrotessa.



Kuva 16. Venttiilin runko paloi onnettomuudessa eniten läpän vapaan akselin läheltä. Edelleen rungon sisällä oleva vapaan akselin tynkä on osoitettu nuolella.

Bild 16. Vid olyckan blev venttilhuset mest bränt i området nära klaffens fria axel. Pilen pekar på den återstående delen av den fria axeln inuti venttilhuset.

Figure 16. In the accident the valve body was burnt most in the area near the free stem of the disc. The arrow points at the free stem stub inside the body.

Venttiilin liikerajoittimen lukkoruuvi puuttui. Lukkoruuvi oli sijoitettu siten, että sen pystyi irrottamaan vain venttiilin ollessa auki-asennossa. Liikerajoittimen alueella ei ollut palovaurioita, joten venttiili ei ole voinut syttyä tältä alueelta. Vaihde oli varustettu säädettävillä liikerajoittimilla, jotka varsinaisesti pysäyttivät läpän liikkeen ääriasentoihin.

Välittömästi onnettomuuden jälkeen todettiin, että onnettomuusventtiilin vaihteessa ei ollut käsipyörää ja että käsipyörän kiinnittänyt sokka oli katkennut. Käsipyörän akseli oli taipunut ilmeisesti palon yhteydessä tapahtuneen osittaisen sulamisen vuoksi. Itse käsipyörää ei ole myöhemminkään löydetty.

Sokan tynkä irrotettiin ja se osoittautui halkaisijaltaan 6 mm:n ruuvin pätkäksi. Alkuperäinen putkisokka oli mahdollisesti jossain vaiheessa korvattu ruuvilla tai ruuvia oli käytetty sokkana alusta alkaen. Standardin mukaisen putkisokan lujuus olisi ollut yli kaksinkertainen ruuviin verrattuna. Nämä nimellishalkaisijaltaan 300 mm:n läppäventtiilit toimitettiin valmistajalta niin, että käsipyörä ei ollut niissä valmiiksi kiinnitettynä akseliin. Ruuvin tyngän tyssäytyneistä kierteistä ja pään taipumasta pääteltiin, että ruvisokka oli ilmeisesti katkennut venttiiliä avattaessa.

Käsipyörän akselilta löydettiin metalliin painuneita jälkiä, joiden tulkittiin olevan neljän tai viiden putkipihtiötteen tartuntapainauksia.

2.2 Olosuhteet palon aikana

Onnettomuudessa happea purkautui noin 10 minuutin ajan venttiiliin puhjenneesta aukosta ja se muodosti yhdessä teräksen palamistuotteiden kanssa kuuman happisuihkun, jossa osa kävelytason teräsristikosta ja muista rakenteista paloi.

Raudan palamislämpötilaksi on laskettu noin 3 100 °C. Tällöin on oletettu, että hapetusreaktioiden reaktiolämpö kuluu reaktiotuotteiden, oksidipisaroiden, lämmittämiseen. Happisuihkussa oksidipisarot jäähtyvät ja jähmettyvät pölyksi lämmittäen samalla happea. Toisaalta happisuihkuun sekoittuva ilma jäädyttää suihkua. Suihkun lämpötila ja happipitoisuus siis laskevat, kun etäisyys vuotoaukosta kasvaa.

Kävelytason ristikot olivat sinkittyä hiiliterästä. Sinkki sulaa jo 420 °C:n lämpötilassa. Koska tässä tapauksessa sulaminen johtui kosketuksesta kuumaan happeen, sinkitys paloi pois paljastaen teräspinnan. Sinkin palamisen tuottama lämpö yhdessä happisuihkusta pintaan siirtyneen lämmön kanssa syytti teräksen palamaan. Teräs palaa sulana, jolloin hapetusreaktioita tapahtuu sekä sulassa metallissa että sen pinnalla. Palo ei kuitenkaan päässyt leviämään suihkun ulkopuolelle, jossa ilman happipitoisuus ei ollut riittävän korkea ylläpitämään teräksen paloa.

2.3 Onnettomuuteen liittyvät organisaatiot ja henkilöt

2.3.1 Tehdas ja sen turvallisuusorganisaatio

Onnettomuus tapahtui Outokumpu Oyj:n tytäryhtiön AvestaPolarit Stainless Oy:n Tornion terästehtaalla sulatto 2:lla, joka valmistui kesällä 2002. Tehtaalla valmistetaan ruostumatonta terästä.

Outokumpu Oyj on suomalainen pörssinoteerattu metallialan konserni, jonka palveluksessa oli vuonna 2004 noin 19 000 henkilöä 40:ssä eri maassa. AvestaPolarit Stainless Oy työllisti 9 000 henkilöä, joista Tornion terästehtaalla oli noin 2 200. Yhtiön nimi on 12.1.2004 alkaen ollut Outokumpu Stainless Oy.

Terästehtaan muodostavat sulatto, kuumavalssaamo, kylmävalssaamo, metallurginen laboratorio ja tehdaspalvelu. Tehdasalueella toimii myös Outokumpu Chrome Oy, joka valmistaa ruostumattoman teräksen valmistuksessa tarvittavaa ferrokromia.

Tehtaan turvallisuusjohtamisjärjestelmä on kuvattu tehtaan laatimassa turvallisuusselvityksessä ja sen tausta-asiakirjoissa. Turvallisuudesta vastaa linjaorganisaatio, jossa jokaiselle on määrätty omat tehtävät ja vastualueet. Turvallisuusasioita on käsitelty säännöllisesti yrityksen johtoryhmässä. Nimetty kemikaalivastuuhenkilö kehittää ja seuraa kaikkea vaarallisiin aineisiin liittyvää toimintaa Tornion tehtaiden alueella. Vaarallisille aineille on nimetty aine- ja osastokohtaisesti hyväksytyt ja asiantuntemuksensa osoittaneet käytönvalvojat eli niin kutsutut kemikaalivastuuhenkilöt. Asiantuntijoista nimetyt henkilöt vastaavat tehtaiden paineastia- ja sähköturvallisuudesta.

Tehtaiden työsuojeluorganisaatio toimii hallintojohtajan alaisuudessa. Organisaatioon kuuluu päätoiminen työsuojelupäällikkö, päätoimisia työsuojelutarkastajia ja päätoiminen työsuojeluvaltuutettu. Päätyösuojelutoimikunnan lisäksi tehtaalla toimii osastopäälliköiden johtamina osastokohtaiset työsuojelutoimikunnat. Tehtaalla toimii noin viisikymmentä työsuojeluasiamiestä.

Osastoilla on nimetyt palo- ja pelastusryhmät. Tehtaalle on nimetty palopäällikkö.

2.3.2 Projekti Tupla

Loppuvuonna 1999 yhtiössä päätettiin Projekti Tuplasta, jonka tavoitteena oli terästuotannon kaksinkertaistaminen Torniossa. Projekti sisälsi muun muassa uuden terässulaton rakentamisen. Projektin rakennustöiden turvallisuusvalvontaa varten työsuojeluorganisaatioon lisättiin yksi päätoiminen työsuojelutarkastaja.

Terässulaton projekti oli jaettu neljään osaprojektiin, rakentaminen, putkistot, sähkö ja prosessin ohjaus. Happijärjestelmän putkisto toteutettiin osana putkistourakkaa. Putkistoprojektin vetäjä oli tehdaspalvelun henkilökuntaan kuuluva ja kaikki muut projektiorganisaatiossa olivat ulkopuolisten alihankkijoiden henkilökuntaa. Suunnittelu hankittiin ulkopuolisesta konsulttiyhtiöstä. Suunnitteluperiaatteina todettiin Suomessa voimassaolevat lait, niiden perusteella annetut asetukset ja määräykset. Lisäksi todettiin, että suunnittelussa on noudatettava EU-säännöksiä tarkoittaen CE-merkintää ja työturvallisuus- ja ympäristöasioita koskevia vaatimuksia. Noudatettavista standardeista viitattiin muun muassa tehdasstandardeihin ja SFS-standardeihin. Putkistojen valmistus, asennus, valmistuksen valvonta ja myös asennusvalvonta oli happiputkiston osalta ulkoistettu.

Tehtaan organisaatiosta oli nimetty henkilöitä seuraamaan oman osa-alueensa projektin etenemistä ja toimimaan yhteyshenkilöinä prosessin ja projektin välillä. Sulaton henkilöstöstä oli muodostettu oma erillinen noin kymmenen henkilön ryhmä, joka teki kokopäivätoimisesti projektin töitä.

Uusi terässulatto, sulatto 2, otettiin käyttöön syyskuussa 2002. Samalla alkoi projektiorganisaation purkaminen. Käyntiinlähdön jälkeen osa henkilöstöstä siirtyi tuotantoorganisaatioon heti ja osa myöhemmin. Projektiin jääneet pitivät muun muassa huolen dokumenttien saattamisesta valmiiksi ja olivat mukana tuotannon lisäämisessä ja siirtyivät myöhemmin uuteen projektiin. Tuotantoorganisaatioon siirtyneet jatkoivat uusien laitteiden käyttöönottoa. Putkistoprojekti päättyi pääosin joulukuussa 2002. Jäljelle jäi joitakin takuutöitä kuten takaiskuventtiilien vaihto seisokissa 2003 syksyllä.

Sulatto 2:n käyttöönoton yhteydessä terässulaton työntekijöiden lukumäärä kasvoi voimakkaasti. Vuonna 1999 sulaton henkilöstö oli 229 ja 2003 henkilöstöä oli 351. Terässulaton alkuperäisistä työntekijöistä siirtyi puolet uudelle sulattolinjalle. Linjalle 1 jääneet jatkoivat entistä työtään osin muuttunein tehtävin. Vain 20 jatkoi tarkalleen entisissä tehtävissään. Uuden henkilökunnan opastuksesta ja koulutuksesta vastasi suurelta osin tehtaan oma henkilöstö, joka myös siirtyi projektin kuluessa uusiin työtehtäviin.

2.3.3 Seisokin aikaisten töiden organisointi

Onnettomuus tapahtui, kun sulatto 2:lla oli ensimmäinen vuosihuoltoseisokki. Takaiskuventtiilien vaihto ja muita seisokin aikaisia töitä oli annettu tehtäväksi Kalse Piping Oy:lle, joka oli myös rakentanut happilinjat. Toimitukseen kuului myös happilinjan painelaitetarkastuksista huolehtiminen. Takaiskuventtiilien vaihtotyön asennusvalvonta oli annettu alihankkijan, Joramco Oy:n tehtäväksi. Sama alihankkija toimi asennusvalvojana myös Tupla-projektin aikana.

Onnettomuudessa kuollut tehtaan työnjohtaja oli osallistunut onnettomuudessa vaurioituneen happilinjan suunnitteluun ja toteutukseen hankkeen alkuvaiheesta asti prosessi-asiantuntijana. Lisäksi hänen tehtävänä oli ollut huolehtia muiden henkilöiden koulutuksesta happilinjojen osalta. Hän oli yksi harvoista, joilla tehtaalla oli oikeus avata ja sulkea happiventtiileitä.

Onnettomuudessa kuollut alihankkijan työnjohtaja oli ollut vastaavana työnjohtajana linjan toteutuksessa. Molemmilla venttiiliä avaamassa olleilla oli vuosien kokemus tekevästä työstä ja heillä oli tietoa hapen vaaratekijöistä.

Onnettomuudessa kuollut ruotsalaisen alihankkijan hitsaaja ei ollut onnettomuuspaikalla avaamassa venttiileitä, kuten kaksi muuta onnettomuudessa menehtynyttä, vaan meni sinne ilmeisesti sattumalta.

2.3.4 Kaasujen toimitusorganisaatio

Teräksen valmistusprosessissa käytettävää happea ja muita ilmakaasuja toimitettiin sulattoon putkijohtoja pitkin kaasuasemalta, joka sijaitsi lähellä rantaa noin 700 metrin etäisyydellä sulatosta. Puhdas happi toimitettiin tehdasalueelle kaasuasemalla olevasta nestemäisen hapen varastointi- ja höyrystysyksiköstä. Nestemäisen hapen toimitti asemalle Oy AGA Ab ja Oy Polargas Ab auto- ja junakuljetuksin.

Kaasuaseman ja happijärjestelmän laitteistot omisti AvestaPolarit Stainless Oy, mutta laitoksen käytöstä ja laitteistosta vastasi Polargas Oy yhtiöiden välisen käyttö- ja hoitosopimuksen mukaisesti. Lupaviranomaiseen eli TUKES:iin nähden Polargas oli itsenäinen toiminnanharjoittaja.

Asemalla työskenteli päivisin yksi Polargas Oy:n palveluksessa ollut henkilö, joka huolehti aseman kunnosta, kaasukuormien tilauksesta ja purkamisesta aseman säiliöihin sekä toimi käytönvalvojana. Muina aikoina aseman toimintaa valvoi tehtaan keskeytämättömässä kolmivuorotyössä työskentelevä, tehdaspalveluun kuuluva kattilalaitoksen henkilöstö. Silloin hälytykset menivät kattilalaitoksen valvomoon. Kattilalaitoksen henkilöstön tehtävänä oli ilmoittaa kaasuaseman hoitajalle kaikista normaalirutiinista poikkeavista tilanteista kuten häiriöistä ja vuodoista.

Polargas Oy huolehti kaasuasemalla muun muassa ennakkohuolloista, paineastiatar- kastuksista ja laitteiden korjauksista. Polargas Oy huolehti myös hapen runkoputkistosta varastoalueella. Varastoalueen rajalta tuotanto-osastojen ulkoseiniin runkoputkistot oli-

vat AvestaPolarit Stainless Oy:n tehdaspalvelun vastuulla. Se vastasi runkoputkiston ja siihen liittyvien laitteiden kunnossapidosta. Terässulaton osalta tehdaspalvelun vastuualueen raja hapen runkoputkistosta päättyi sulattorakennuksen seiniin, joiden sisäpuolella runkoputkistosta vastasi terässulatto. Siten onnettomuuspaikalla venttiilihuoneessa runkoputkistosta vastasi terässulatto.

2.3.5 Tehtaan toimintaa valvovat tarkastuslaitokset ja viranomaiset

Tehtaan kemikaaliputkistojen rakentamisen ja käytön viranomaisvalvonta kuuluu Turvatekniikan keskukselle (TUKES) ja työturvallisuusasioiden valvonta Lapin työsuojelupiirille (1.1.2004 alkaen Pohjois-Suomen työsuojelupiiri).

TUKES on toteuttanut laitoksella vaarallisten kemikaalien teollisesta käsittelystä ja varastoinnista annetun asetuksen eli teollisuuskemikaaliasetuksen (59/1999) tarkoittamaa tarkastusohjelmaa, jossa tarkastuskohteet ja tarkastustiheys kohteissa on määritelty. Tornion tehtaat kuuluvat luokkaan, jossa tarkastukset tehdään vuosittain. Tarkastukset perustuivat asetuksen (59/1999) ja nestekaasuasetuksen (711/1993) vaatimukseen. Tarkastuksissa keskityttiin erityisesti laitoksen turvallisuusjohtamisjärjestelmän ja sen toimivuuden arviointiin.

Lisäksi yrityksellä oli velvoite laatia niin sanottu turvallisuusselvitys yrityksen suuronnettomuusvaaraa aiheuttavista toiminnoista ja niiden torjuntatoimenpiteistä sekä varautumisesta tarvittaviin pelastustoimiin.

TUKES varaa muille viranomaisille (pelastusviranomainen, työsuojeluviranomainen ja ympäristöviranomainen) mahdollisuuden osallistua tarkastukseensa ja toimittaa näille myös tarkastuspöytäkirjan. Pelastusviranomaiset ovat osallistuneet kaikkiin tarkastuksiin, muiden osallistuminen on ollut vähäistä.

Määräaikaistarkastusten lisäksi TUKES käsitteli Projekti Tuplaan liittyvän, 20.3.2002 päivätyn terässulaton kemikaalien käsittelyluvan muutoshakemuksen, johon sisältyi myös sulaton happijärjestelmän laajennus. Lupahakemusta täydennettiin happijärjestelmän poikkeamatarkastelulla, joka oli päivätty 25.4.2002.

Turvatekniikan keskuksen 17.5.2002 AvestaPolarit Stainless Oy:lle myöntämä lupa laajentaa toimintaa terässulattossa sisälsi viisi ehtoa, jotka koskivat:

1. Räjähdysvaarallisten tilojen tilaluokitusta ja sähkölaitteiden tarkastusta niissä.
2. Kaasunilmaisinjärjestelmää ja kannettavia kaasumittareita.
3. Lipeäsäiliön sijoittamista vallitilaan.
4. Häkäkaasun ja hapen käsittelystä ja varastoinnista laadittavia käyttö- ja huolto-ohjeita ja käyttöön liittyvää koulutusta.
5. Työntekijöille annettavaa koulutusta ja opastusta, miten toimia mahdollisissa vaaratilanteissa.

Käyttöönotto tarkastus tehtiin 27.8.2002 ja tarkastuskertomuksessa 19.9.2002 todettiin, että ”terässulaton laajennus on rakennettu siten kuin hakemuksen liitteissä on esitetty”. Tarkastuskertomuksessa käytiin läpi myös tilanne lupapäätöksen viiden edellä luetellun ehdon osalta. Kolme ensimmäistä ehtoa oli toteutettu paitsi, että vielä oli toimitettava Turvatekniikan keskukselle kopio sähkölaitteiden tarkastuspöytäkirjasta. Tämä toimitettiin 9.1.2003. Kahden viimeisen ohjeita ja koulutusta koskevan ehdon toteuttamisen todettiin olevan osittain kesken, mutta niistä ei tarkastuskertomuksessa enää asetettu konkreettisia velvoitteita toiminnanharjoittajalle kuten sähkölaitteiden tarkastuksesta.

TUKES on tehnyt myös keväällä 2002 painelaiteturvallisuuteen liittyvän valvontakäynnin, jossa on käsitelty painelaitesäännösten muutoksen aiheuttamia soveltamiskysymyksiä. Happijärjestelmän painelaitteiden tekninen tarkastus (rakenne- ja käyttöönotto tarkastus) on sisällytetty niiden toimitukseen ja tarkastuslaitoksena on käytetty Laadunvarmistus Oy:tä. Putkiston rakentaja Kalse Piping Oy ja putkiston toimittaja Oy Ja-Ro Ab on todettu päteviksi asianmukaisin sertifikaatein.

Työsuojeluviranomaiset ovat tehneet vuosittain 10–30 tarkastusta tai muuta rekisteröityä käyntiä tehtaalle keskittyen pääasiassa projektin rakennusaikaiseen valvontaan ja sattuneiden tapaturmien tutkintaan. Noin kerran vuodessa on tehty säännönmukainen tarkastus, jossa on käsitelty ajankohtaisia asioita ja esimerkiksi säädösmuutoksia. Työsuojelupiiriin tarkastajat ovat osallistuneet projektin aikana useisiin ennakoivalvontaneuvotteluihin ja antaneet yrityksen henkilöstölle koulutusta. Työsuojeluviranomaisen toiminta ei kohdistunut hapen käsittelyyn.

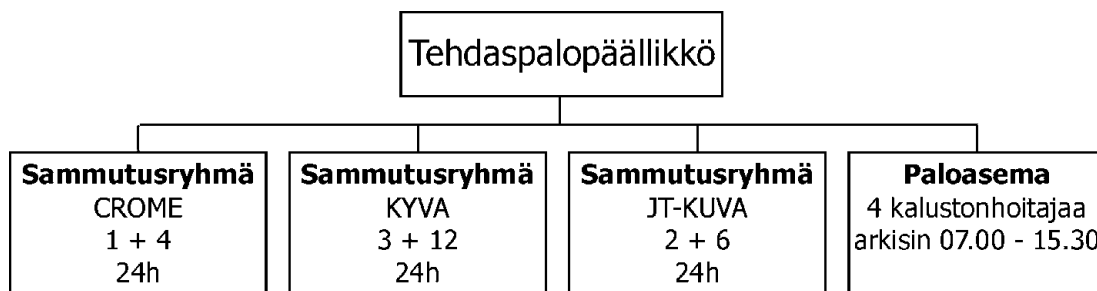
2.4 Pelastustoimen organisaatio ja toimintavalmius

2.4.1 Lapin hätäkeskus

Lapin hätäkeskus on Rovaniemellä ja sen toimialueeseen kuuluvat kaikki 22 Lapin läänin kuntaa, joissa on asukkaita yhteensä noin 190 000. Tehtaalla tapahtuneen onnettomuuden aikana oli hätäkeskuksessa työvuorossa vuoromestari ja kolme hätäkeskuspäivystäjää. Alkuvaiheessa vuoromestari ja yksi hätäkeskuspäivystäjä keskittyivät huolehtimaan onnettomuuden vaatimista hälytystehtävistä ja viestiyhteyksistä. Yksi päivystäjä hoiti tuona aikana muut sisään tulevat puhelut ja niiden vaatimat toimenpiteet.

2.4.2 Tehtaan laitospalokunta ja sammutusryhmät

AvestaPolarit Stainless Oy:n tehtaalla on oma palo- ja pelastusorganisaatio, jossa on laitospalokunta ja tehtaan henkilökunnasta koostuvat sammutusryhmät. Palokoulutuksen saaneita henkilöitä on noin 250. Lisäksi tehtaalla on tehdaspalopäällikkö ja paloasema. Tehtaan paloasemalla työskentelee vakituisessa työsuhteessa palopäällikön lisäksi virka-aikana neljä henkilöä ja muu sammutushenkilöstö on normaalitilanteissa tehtaalla muissa työtehtävissä. Lisäksi tehtaalla on kaksi omaa paloautoa. Tehdas on varustettu palovesilinjastolla ja tehtaalle on hankittu sekä sijoitettu eri kohteisiin paineilmahengityslaitteita.



Kuva 17. Tehtaan palo- ja pelastusorganisaatio.

Bild 17. Fabrikens brand- och räddningsorganisation.

Figure 17. The fire and rescue organisation of the factory.

2.4.3 Tornion kaupungin palolaitoksen operatiivinen organisaatio

Tornion kaupungissa toimii vakinainen palokunta, jonka vuorovahvuus normaalisti on palomestari, yksi palo esimies ja neljä miehistön jäsentä. Tornion kaupungin palolaitoksen ulkoisen pelastussuunnitelman (13.1.2003) mukaan Tornion alueella tapahtuvaan vaarallisten aineiden aiheuttamaan onnettomuustilanteeseen hälytettiin Tornion pelastusjoukkue. Pelastusjoukkue muodostui Tornion, Haaparannan ja Karungin yksiköistä. Sen kokonaisvahvuus oli vähintään 1+3+12 ja näiden lisäksi hälytettiin vähintään yksi sairaankuljetusyksikkö.

Onnettomuspäivänä Tornion vuorovahvuus oli viisi henkilöä. Muu pelastusjoukkue muodostui Tornion, Haaparannan ja Karungin VPK:sta, jotka avustivat kaupungin palolaitosta onnettomuuspaikalla. Pääasiallinen tehtävä oli kattorakenteiden sammutus rakennuksen edustalla ja sisäpuolella.

Sairaankuljetuksen Torniossa hoitaa SPR, josta onnettomuuteen hälytettiin kaksi sairaankuljetusyksikköä.

2.4.4 Kaupungin palolaitoksen toimintavalmius terästehtaalle

Terästehdas sijaitsee sisäasiainministeriön toimintavalmiusohjeen mukaisella 1-riskialueella, jolloin palokunnan toimintavalmiusajan tehtaalle tulisi pääsääntöisesti olla kuusi minuuttia, mutta se on todellisuudessa noin kymmenen minuuttia. Koska tehdas on laajalla alueella ja kuuden minuutin toimintavalmiuden saavuttaminen on käytännössä kunnallisen palokunnan osalta mahdotonta, on riski hallittu perustamalla ensitoimenpiteitä varten laitospalokunta sekä kouluttamalla sammutusryhmät koko tehtaan alueelle.

Tornion kaupungin palolaitoksen henkilöstö oli osallistunut ennen onnettomuutta kohteessa järjestettyihin yhteisharjoituksiin tehtaan omien paloryhmien kanssa. Näin ollen kohde oli osittain tuttu, koska he olivat käyneet kohteessa muun muassa automaattihälytysten vuoksi.

2.5 Tallenteet

2.5.1 Rekisteröintilaitteet

Tutkintalautakunnan käytössä on ollut onnettomuusventtiilin alapuolella olevan putkiston virtaus- ja paineenmittauslaitteiston tallenteet juuri ennen onnettomuutta ja sen jälkeen. Tallenteen tulostuksessa näkyy virtauksen ja paineen nousu pienenä ”piikkinä,” mutta tarkkaa onnettomuushetkeä se ei ole taltioinut. Laitteisto tekee mittauksen kerran minuutissa.

2.5.2 Puhelin- ja radioliikenteen tallenteet

Tutkintalautakunnalla on ollut Lapin hätäkeskuksen tallenteet pelastustoimen osalta ja poliisin radiopuhelinliikenteestä heti onnettomuuden jälkeiseltä ajalta.

2.5.3 Muut tallenteet

Tutkintalautakunnalla on ollut tehtaan pääportilla olevaan aluevalvomoon tallentuneet tiedot tehtaalta automaattisen paloilmoinjärjestelmän kautta tulleista vika- ja palohälytyksistä. Lisäksi lautakunta on saanut videokuvausten nauhat Lassila & Tikanoja Oy:n tekemistä happi- ja raakahappilinjojen sisäpuolisista kuvauksista. Näiden tarkastusten havaintoja on käsitelty kohdassa 2.8.5.

2.6 Asiakirjat

Tutkintalautakunta on tutustunut suureen määrään onnettomuuteen liittyviä laitteita koskeviin asiakirjoihin ja tehtaan toimintaa koskeviin asiakirjoihin. Lisäksi on tutustuttu onnettomuustapahtumia sivuaviin ja taustoittaviin asiakirjoihin. Ajallisesti aineisto voidaan jaotella esimerkiksi seuraavasti:

1. asiakirjat ajalta ennen onnettomuutta, jolloin sulatto 2 rakennettiin ja onnettomuusventtiili asennettiin uuteen happilinjaan,
2. syksyllä 2003 olleen huoltoseisokin, jonka loppuvaiheessa onnettomuus tapahtui, aikaiset suunnitelmat, muistiot ja muut asiakirjat,
3. onnettomuutta ja toimia välittömästi sen jälkeen kuvaavat asiakirjat ja tallenteet ja
4. onnettomuuden jälkeen laaditut asiakirjat, joissa käsitellään onnettomuutta ja toimintaa tehtaalla onnettomuuden jälkeen.

Asiakirjojen sisällön perusteella ne voidaan jakaa esimerkiksi seuraaviin ryhmiin:

1. vaarallisten aineiden, erityisesti hapen käsittelyä ja painelaitteita koskevat lait, kansalliset ja kansainväliset määräykset, ohjeet ja standardit
2. teräksen tuotantoa merkittävästi lisänneen Projektin Tuplan, ja erityisesti uuden happilinjän asiakirjat kuten piirustukset, erittelyt, turvallisuusselvitykset, tarkastus- ja laadunvarmistusasiakirjat ja viranomaisvalvontaa koskevat asiakirjat,

3. onnettomuusventtiiliä koskevat asiakirjat kuten sen erittely, tilaus ja tarkastuspöytäkirja sekä vastaavien venttiilien mittatiedot, piirustukset ja käyttö- ja asennusohjeet,
4. onnettomuuden tutkinta- ja muut selostukset.

Tutkintalautakunta on saanut Kemin poliisilaitoksen teknisen tutkinnan raportin työtapa-turmasta, Pohjois-Suomen työsuojelupiirin tapaturmaselostuksen ja Turvatekniikan keskuksen onnettomuustutkintaraportin. Lisäksi on ollut käytettävissä muun muassa hätäkeskuksen hälytysseleste ja nauhoitteet sekä muistio kattilalaitoksen valvomosta tehdyistä toimista onnettomuuden aiheuttamien vaurioiden rajaamiseksi. Tutkintalautakunta on myös tutustunut Raahessa terästehtaalla happilinjassa 1997 tapahtuneen venttiilipalon tutkintaselostukseen ja onnettomuuden johdosta tehtyihin toimenpiteisiin.

Turvatekniikan keskuksen antamien ohjeiden lisäksi tutkintalautakunta on erityisesti tutustunut European Industrial Gases Associationin (EIGA) ohjeisiin koskien happijärjestelmien suunnittelua turvallisiksi sekä niiden turvallista käyttöä ja huoltoa. EIGA on antanut myös ohjeita muun muassa happijärjestelmien puhdistuksesta ja onnettomuuksien tutkinnasta. Vertailukohtana tutkintalautakunnalla on ollut käytettävissä Shell-yhtymän happijärjestelmien suunnittelua ja turvallista käyttöä koskeva ohje.

Tärkeitä asiakirjoja ovat tutkinnassa myös olleet tehtaan ohjeet happilinjän sulkuventtiilien avaamisesta, erilaiset turvallisuuteen liittyvät selvitykset ja muistio happilinjän tarkastuksesta 8-9.7.1997 liitteineen. Selvityksiä ovat muun muassa happi-argonaseman laajennuksen poikkeamatarkastelu, sulatto 2:n kaasunjakohuoneen poikkeamatarkastelu (HAZOP), romun kuivauksen potentiaalisten ongelmien analysointi ja käsikirjoitus riskikartoitukseksi terässulaton toiminnasta. Käytettävissä on myös ollut koko tehdasta koskeva turvallisuusselvitys, joka on päivätty 19.1.2001.

2.7 Määräykset ja ohjeet

2.7.1 Viranomaiset

Hapen käsittelyä ja varastointia teollisuudessa koskevat Suomessa muun muassa laki räjähdysvaarallisista aineista, kemikaalilaki ja niiden perusteella annetut alemmanasteiset säädökset ja määräykset, kuten asetus kemikaalien teollisesta käsittelystä ja varastoinnista. Sosiaali- ja terveysministeriö on julkaissut kirjansen ”Teollisesti käsiteltävät happea sisältävät kemikaalit”, 2000:13, jossa esitellään tarkemmin happea koskevaa lainsäädäntöä ja määräyksiä. Turvatekniikan keskus on antanut ohjeita hapen käsittelystä ja varastoinnista huhtikuussa 2003 julkaistussa oppaassa ”Hapen turvallinen käsittely ja varastointi”, johon oli perehdytty tehtaalla.

Toimintaa tehtaalla koskee työturvallisuuslainsäädäntö eli työturvallisuuslaki (738/2002) ja sen nojalla annetut alempiasteiset säädökset. Työturvallisuuslaki edellyttää, että työnantaja selvittää ja arvioi työhön liittyvät vaarat ja ryhtyy tarpeellisiin toimenpiteisiin havaitsemiensa vaarojen poistamiseksi tai vähentämiseksi tasolle, jossa ne eivät aiheuta vaaraa työntekijöiden turvallisuudelle. Valtioneuvoston päätös työntekijöille aiheutuvan suuronnettomuuden vaaran torjunnasta (922/1999) täsmentää toimintavelvolli-

suuksia kohteissa, jotka kuuluvat teollisuuskemikaaliasetuksen (59/1999) soveltamisalaan (ns. turvallisuusselvityslaitokset ja ns. toimintaperiaatelaitokset). Valtioneuvoston asetuksessa kemiallisista tekijöistä työssä (715/2001) edellytetään muun muassa kemiallisten tekijöiden fysikaalisten ominaisuuksien kuten palo- ja räjähdysvaaran kirjallista riskien arviointia ja tarvittaviin toimenpiteisiin ryhtymistä havaittujen vaarojen poistamiseksi ja/tai vähentämiseksi.

Teollisuuskemikaaliasetuksen (59/1999) perusteella sellaiselle laitokselle, jossa varastoidaan happea 200 ja 2 000 tonnin välillä olevia määriä, on laadittava suuronnettomuuden ehkäisemiseksi tarkoitetut toimintaperiaatteet. Asetuksen voimaan tullessa on Polargas Oy tehnyt niin sanotun toimintailmoituksen kaasuaseman happijärjestelmistä. Laitoksen muutos ja happijärjestelmien laajennus on käsitelty myöhemmin Turvatekniikan keskuksen 2002 myöntämässä luvassa. AvestaPolarit Stainless Oy:n tehdasalueella taas hapen maksimimäärä on suhteellisen pieni. Turvatekniikan keskuksen selvitöksen mukaan tehdasalueella happea varastoidaan lähinnä kaasupulloissa. Pullojen tilavuus on yhteensä noin 4,7 m³. Sen lisäksi jakeluputkissa on happea huomattava määrä.

AvestaPolarit Stainless Oy:n Tornion tehtaalla on teollisuuskemikaaliasetuksen mukainen niin sanottu turvallisuusselvitystason laitos tehdasalueella olevien palo- ja räjähdysvaarallisten sekä terveydelle ja ympäristölle vaarallisten kemikaalien määrien perusteella. Näitä kemikaaleja ovat muun muassa nestekaasu, jota saa olla enintään 1 200 t, fluorivetyhappo, rikkidioksidi ja hähkäkaasu. Vaaran arvioinnissa päähuomio on kiinnitetty nestekaasun pallosäiliövarastointiin ja nestekaasuun yleensä.

Kaikkiin paineellisiin happiputkistoihin on sovellettava painelaitepäättöstä (938/1999), jos suurin sallittu käyttöpaine on yli 0,5 baaria. Tornion tehtailla kaikki happiputkistot oli rakennettu paineestialainsäädännön tarkoittaman A-ryhmän putkistomääräysten mukaisesti. Turvatekniikan keskuksen ohjeen (huhtikuu 2003) mukaan on happisäiliöön liittyvä happiputkisto tarkastettava aina happisäiliön määräaikaistarkastuksen yhteydessä vähintään joka neljäs vuosi, jos happisäiliö on rekisteröitävä painelaite. Tarkastuksessa on katsottava muun muassa, että merkinnät ja varolaitteet ovat kunnossa, putkiston venttiilit, liitoskohdat ym. varusteet ovat tiiviit ja sulkuventtiileille on esteetön pääsy. Happiputki on merkittävä sisältöä ja virtaussuuntaa osoittavin merkinnöin siten, että aina näkyy yhtä aikaa kaksi putkimerkintää. Ohjeen mukaan happiputkisto on pidettävä puhtaana rasvoista ja irtohiukkasista ja puhdistettava huolellisesti ennen asennusta.

Happiputkistossa olevien irtohiukkasten aiheuttaman syttymisvaaran minimoimiseksi Turvatekniikan keskuksen oppaassa neuvotaan, että "putkisto paineistetaan hitaasti, esim. hidastetuilla toimilaitteventtiileillä, jolloin irtohiukkaset eivät lähde liikkeelle aiheuttaen suurta liike-energiaa eikä adiabaattista⁴ puristusta tapahdu." Samasta asiasta annetaan oppaassa myöhemmin vielä seuraava ohje: "Kun venttiili joudutaan avaamaan korkeasta paineesta paineettomaan putkeen, olisi hyvä käyttää niin sanottua ohitusventtiiliä." Lisäksi oppaassa sanotaan: "Näin sulkuventtiili voidaan avata niin sanottuun tasa-

⁴ Adiabaattisessa eli lämpöeristetyssä prosessissa tarkasteltuun järjestelmään ei siirry ympäristöstä lämpöä eikä tarkasteltu järjestelmä luovuta lämpöä ympäristöön. Kaasujen nopeita puristumis- ja laajenemisprosesseja voidaan riittävällä tarkkuudella pitää adiabaattisina.

paineeseen ja vältetään suuri virtausnopeus avaamisen alkuvaiheessa sekä mahdollisten epäpuhtauksien raju nopeus ja törmäys putkiston seinämiin.”

2.7.2 Tehtaalla olleet ohjeet ja toimenpiteet turvallisuuden varmistamiseksi

Turvatekniikan keskukselle toimitetussa Turvallisuusselvityksessä (19.01.2001) teräsulaton mahdollisiksi onnettomuusvaaroiksi on todettu teräsulatan roiskeet ja veden joutuminen sulan joukkoon. Kaasujen osalta keskeisinä vaaroina pidettiin nestekaasun palo- ja räjähdysvaaraa ja häkäkaasun myrkytysvaaraa. Hapen keskeisenä vaarana pidettiin sen vuotoa ja siitä seuraavaa tulipalovaaran lisääntymistä. Turvatoimenpiteenä mainittiin kiinteät ja kannettavat kaasun mittalaitteet ja ohjeet kaasuvuodon ja alkusammutuksen varalle.

Tehtaalla runkoputkiston käyttöä ja muuta sitä koskevaa kirjallista ohjeistusta oli jonkin verran sijoitettuna prosessin ohjausjärjestelmän help-painikkeen taakse. Kaasujen käsiventtiilien avaamisesta ohjausjärjestelmässä oli seuraava 13.6.1995 päivätty ohje: ”AOD:n venttiilihuoneissa olevien kaasulinjojen käsiventtiilien avaus on suoritettava hitaasti, jotta kaasun virtaus olisi mahdollisimman pieni. Kovasta kaasun virtausnopeudesta saattaa kaasun mukana mahdollisesti oleva epäpuhtaus aiheuttaa kipinöintiä vastuskohdissa!”

Lisäksi tehtaalla oli ruutupaperille käsin kirjoitettu 5.9.1995 tai 1997 päivätty ohje sulatto 1:n happilinjan avaamisesta. Ohjeen mukaan linja paineistetaan avaamalla hitaasti ohitusventtiiliä, minkä jälkeen paineen noustua suuremmaksi kuin 15 baaria avautuu myös paineohjattu pääsulkuventtiili. Tässä ohitushaarassa ollut kauko-ohjattu ohitusventtiili oli tehtaalta saadun tiedon mukaan aikoinaan juuttunut kiinni, koska sitä avattiin vain 1–2 kertaa vuodessa. Sen jälkeen venttiili oli korvattu yhtä pitkällä putken pätkällä ja paineistus hoidettiin toisella samassa haarassa olevalla venttiilillä.

Näiden kahden happilinjan venttiilien avaamista koskevien ohjeiden lisäksi sulatto 1:n venttiilihuoneessa oli happiputkeen pääsulkuventtiilin alapuolelle ohitusventtiilin kohdalle kiinnitetty piirros (kuva 18), joka oli otsikoitu ”AOD:n happilinjan aukaisu”. Putkiirroksen oli kirjoitettu avausohje, jonka mukaan ensin oli avattava ”tasausventtiili ja sitten vasta pääsulkuventtiili”. Ohje oli päivätty 26.8.1997.

Turvallisuus avattaessa ja suljettaessa happiventtiileitä pyrittiin kuitenkin ennen kaikkea varmistamaan sillä, että oikeus käsitellä sulatossa olevia happiventtiileitä oli annettu vain muutamalle tehtaan palveluksessa olevalle toimihenkilölle tai heidän välittömässä ohjauksessa oleville henkilöille. Venttiilien käsittelyyn oikeutetut tunsivat tehtaan ilmoituksen mukaan edellä mainitun ohjeen. Tutkintalautakunnan saaman tiedon mukaan happiventtiileitä olivat toisinaan avanneet myös alihankkijoiden palveluksessa olleet henkilöt ainakin huoltotoimenpiteiden yhteydessä.



Kuva 18. Venttiilien avaamisesta kertova ohje happilinjassa sulatto 1:llä.

Bild 18. Anvisningar för öppning av ventilen till syreledningen i linje 1.

Figure 18. Instructions on how to open the valve on the oxygen line in melt shop line 1.

Tehtaalla oli vierailut heinäkuussa 1997 Polargas Oy:n ranskalaisen emoyhtiön Air Liquiden asiantuntijoita ja heidän kanssaan oli käyty läpi tehtaan happijärjestelmät. Air Liquide on suuri kansainvälinen kaasualan yritys. Tarkastuksen ja keskustelujen pohjalta oli kirjoitettu 21.7.1997 päivätty muistio, jonka liitteenä oli Air Liquiden asiantuntijoiden laatima muistio tehtaan happijärjestelmästä ja hapen käsittelyn turvallisuuteen liittyviä huomautuksia. Liitteeksi oli myös kopioitu joitakin sivuja Air Liquiden happijärjestelmiä käsittelevästä ohjekirjasta.

Muistiossa kiinnitettiin erityistä huomiota happilinjoihin oleviin suodattimiin ja venttiilien avaamiseen. Roskaisen suodattimen todettiin olevan ”happilinjassa potentiaalinen sytytyspanos” ja muistutettiin, että tehtaalla oli kerran aikaisemmin (1986) suodatin syttynyt ja kerran oli sattunut läheltä piti -tapaus. Muistion mukaan ”venttiilien tulee olla rakenteeltaan sellaisia, ettei avattaessa ja suljettaessa synny paineiskuja tai virtausnopeuksien aiheuttamaa paikallista lämpötilan nousua”. Halkaisijaltaan yli kahden tuuman palloventtiileihin, joita käytetään yli 20 baarin paineessa, kehoitettiin rakentamaan ”pieni ohituslinja, jotta ne voidaan avata painetta vastaan.” Näistä samoista asioista oli myös maininta Air Liquiden asiantuntijoiden laatimassa muistiossa. Air Liquiden oppaasta kopioituilla sivuilla käsiteltiin muun muassa ohitusventtiilin käyttöä. Tehtaalla ei kuitenkaan ollut Air Liquiden opasta kokonaisuudessaan.

Kaasuaseman laajennuksen yhteydessä työryhmä, jonka vetäjä oli ulkopuolinen asiantuntija ja jäsenet Polargas Oy:n ja AvestaPolarit Stainless Oy:n henkilöstöä, teki kaasuvirtauksia koskevien poikkeamatilanteiden tarkastelun, joka on päivätty 27.2.2002. Tarkastelussa nostettiin esiin muun muassa putkivuodon ja virtauksen seassa olevien epäpuhtauksien aiheuttama paloriski, johon tarkastelussa liitettiin henkilöriski. Epäpuhtauksien aiheuttaman paloriskin torjumiseksi ehdotettiin koulutusta, ohjeistusta ja tarkastuksia.

Sulatto 2:n kaasunjakohuonetta koskevassa poikkeamatarkastelussa, joka oli päivätty 25.4.2002, yhtenä vaarana nähtiin happiputkiston syttyminen sisäpuolelta muutosten tai kunnossapidon yhteydessä putkistoon joutuneiden epäpuhtauksien vaikutuksesta. Toimenpiteiksi ehdotettiin muun muassa sintratusta pronssista valmistetun sihdin käyttöä ja sihdin tyhjentämistä tai poistoa linjan huuhtelun jälkeen. Poikkeamatarkastelun tehneessä työryhmässä oli ulkopuolinen vetäjä ja henkilöstöä AvestaPolarit Stainless Oy:stä.

Tuotantokapasiteetin laajennuksen yhteydessä tehtiin myös turvallisuus selvitys kierrätysteräksen kuivauksesta käyttäen potentiaalisten ongelmien analyysia. Tässä yhteydessä tarkasteltiin muun muassa erilaisia poikkeamia kierrätysteräskorin ja kahmarin toiminnoissa ja eri kaasujen vuototilanteita. Hapen aiheuttamia vaaratilanteita ei tarkastelun yhteenvedossa mainita.

Sulatto 2:n laitetoimittajilta edellytettiin ennen käyttöönottoa kirjallinen todistus, jossa he takasivat, että laitteet ovat käyttövalmiita ja täyttävät turvallisuusvaatimukset. Linja 2:n laitetoimittajien ohjeet, ohjeistukset toimintatavoista ja turvallisista menetelmistä kerättiin. Sapag-venttiileiden käyttö- ja turvallisuusohjeessa kiinnitetään huomiota muun muassa siihen, että putkilinja on puhallettava puhtaaksi ennen venttiilin asennusta, jos linjassa on hiukkasia. Ohjeessa kehoitetaan myös laskemaan paine venttiilistä välittömästi ja kiristämään kiinnitysruuvit, jos venttiilissä havaitaan vuotoa. Ohjeita ei anneta venttiilin juuttumisen varalle.

Kun uusi kaasuasema otettiin käyttöön Tornion tehtaalla 2002, Aga ja Air Liquide antoivat koulutusta tehdaspalvelun työntekijöille 3.6.2002. Ennen tätä vastaava Agan järjestämä koulutustilaisuus, johon osallistui myös sulaton työntekijöitä, oli pidetty useita vuosia aikaisemmin.

Runkoputkiston käyttöönoton yhteydessä siitä ei laadittu erillisiä tarkastuksiin, huoltoihin ja turvalliseen käyttöön liittyviä teknisiä kuvauksia tai ohjeita. Uuden sulatto 2:n venttiilijärjestelmän käyttäjien kouluttaminen oli onnettomuudessa kuolleen, AvestaPolarit Stainlessin palveluksessa olleen työnjohtajan vastuulla.

2.7.3 EIGA:n ohjeet

European Industrial Gases Association (EIGA) on julkaissut ohjekirjan "Oxygen pipeline systems, IGC Doc 13/02/E", joka koskee hapen siirtoa ja jakelua putkijohtoja pitkin. Kirjan tarkoituksena on opastaa, kuinka happijärjestelmät suunnitellaan turvallisiksi ja kuinka niitä pitää käyttää ja huoltaa, jotta onnettomuuksia ei pääse tapahtumaan. Hapen käsittelyyn liittyvää palo- ja räjähdysvaaraa ja sen torjuntaa käsitellään EIGA:n ohjekirjassa

"Fire Hazards of Oxygen and Oxygen Enriched Atmospheres", IGC Doc 04/00/E. Tässä ohjeessa on myös koulutuskäyttöön tarkoitettu kuvasarja. Ohjeet eivät olleet sulatolla käytössä vaan tehdas on käännättänyt ne suomeksi onnettomuuden jälkeen.

Ensiksi mainitun ohjekirjan alussa luetellaan mahdollisia syttymisen syitä ja syttymisketjuja, kuten hiukkasen törmäyksen aiheuttama kuumeneminen, adiabaattinen puristus ja kitkakuumeneminen. Sen jälkeen käydään järjestelmällisesti lävitse, kuinka paloriskiä voidaan pienentää.

Sulkuventtiilien käytöstä annetaan ohjeeksi, että niiden pitää aina olla joko kokonaan auki tai kokonaan suljettu eikä niitä pidä käyttää osittain auki. Ennen sulkuventtiilin avaamista paine-ero on tasattava paineentasausjärjestelmän avulla tai jollain muulla erityisellä menetelmällä. Ohjekirjan mukaan sulkuventtiilit ovat tavallisesti tyyppiltään luis-ti-, pallo-, istukka- tai läppäventtiilejä.

Säätöventtiileiksi soveltuvat ohjekirjan mukaan palloventtiili, muunnettu palloventtiili, epäkeskeinen istukkaventtiili ja läppäventtiili. Säätöventtiilien todetaan toimivan kaikkein vaativimmissa virtausolosuhteissa, sillä ne toimivat suuren paine-eron vallitessa, mistä on seurauksena suuri virtausnopeus ja pyörteinen virtaus. Tämä merkitsee ohjekirjan mukaan sitä, että hiukkaset voivat törmätä paitsi venttiilin runkoon ja säätöelimeen myös putkijohtoon pitkän matkaa venttiilistä alavirtaukseen päin.

Paineentasausventtiileistä kirjoitetaan, että niitä käytetään tasaamaan paine sulkuventtiilin molemmilla puolilla ennen sulkuventtiilin avaamista. "Kun paine on tasattu, voidaan sulkuventtiili avata turvallisesti."

Ohjekirjassa käydään myös lyhyesti lävitse eri venttiilityyppien ominaisuuksia. Läppäventtiileistä todetaan muun muassa, että venttiilin ollessa auki venttiilin runko ei ole hiukkasten mahdollinen törmäyskohta, mutta läppä on.

Keskeisenä asiana ohjekirjassa on huoli happijärjestelmässä olevien hiukkasten ja muiden epäpuhtauksien aiheuttamasta paloriskistä. Tämä on minimoitava paitsi hyvällä suunnittelulla ja oikeiden materiaalien valinnalla myös erittäin huolellisella happijärjestelmän ja sen komponenttien puhdistuksella ennen asennusta ja asennustyön aikana. Puhtaudesta on myös huolehdittava käytön aikana. Happijärjestelmien puhdistuksesta annetaan yksityiskohtaiset ohjeet EIGA:n ohjekirjassa "Cleaning of Equipment for Oxygen Service", IGC Doc 33/97.

Ohjekirjassa "Fire hazards of oxygen and oxygen enriched atmospheres, IGC Doc 04/00/E" todetaan neljä tapausta venttiilien käyttötavoista, joista voi olla seurauksena vaaratilanne.

- a) Paineensäätimen säätöasetuksen palauttamatta jättäminen venttiilin sulkemisen jälkeen, mikä voi aiheuttaa erittäin suuren virtausnopeuden venttiiliä uudelleen avattaessa.
- b) Venttiilin nopea avaaminen, jonka seurauksena nopea virtaus voi aiheuttaa kuumenemista hiukkasten törmätessä tai adiabaattisessa puristuksessa.

- c) Venttiilin nopea avaaminen, kun alavirrassa on suljettu venttiili, voi aiheuttaa edellisessä kohdassa lueteltuja vaaroja.
- d) Happikompressorin käynnistys virheellisesti suoraan hapella.

2.8 Muut tutkimukset ja selvitykset

Lapin työsuojelupiiri sekä Turvatekniikan keskus ovat molemmat tehneet onnettomuudesta ja siihen liittyvistä tapahtumista omat tutkintansa ja raporttinsa.

2.8.1 Kirjallisuustutkimus happiputkistojen syttymissyistä

Muulla tapahtuneet happiputkistojen palot

Laajassa kirjallisuustutkimuksessa, joka on tutkintaselostuksen liitteenä, perehdyttiin happiputkistojen rakennemateriaalien valintaan ja suunnitteluperiaatteisiin, syttymismekanismeihin ja niitä koskeviin kokeisiin sekä putkistopalojen tutkintatuloksiin. Kirjallisuustutkimus osoitti, että happiputkistojen paloille on tunnistettu ainakin kymmenen erilaista syttymissyitä. Useinkaan ei ole varmasti pystytty osoittamaan tiettyä syytä, vaan esimerkiksi kaksi vaihtoehtoista syytä.

Kirjallisuusaineistossa oli 15 kuvausta happipulloihin liitetyn pieniläpimittaisen putkiston palosta. Tämä on ymmärrettävää, koska happipulloja käytetään erittäin paljon teollisuudessa ja sairaanhoidossa. Huomioon otettava seikka oli, että putkistopalo syttyi lähes aina pullo- tai sulkuventtiilin avaamisen jälkeen.

Aineistossa oli kuvaukset kahdesta teollisuuslaitoksen happilinjan sulkuventtiilin palosta. Toinen venttiileistä oli 152 mm:n palloventtiili, joka oli ollut käytössä viiden vuoden ajan, mutta jota tänä aikana ei ollut suljettu kuin ehkä kerran. Venttiilille tehtiin tiiveystarkastus noin 3 baarin paine-erolla. Kun venttiili tämän jälkeen avattiin käsipyörästä kääntämällä, sen sisällä syttyi palo, joka poltti suurimman osan venttiilin sisäisistä osista ja rungosta. Onnettomuuden syyksi pääteltiin venttiilin istukkatiivisteiden takana olleen voiteluöljyn syttyminen. Jousien paikallaan pitämien tiivisteiden liike venttiiliä avattaessa muodostuvien paine-erojen vaikutuksesta synnytti riittävästi kitkalämpöä sytyttämään voiteluöljyn. Ne venttiilin osat, joihin happivirtauksen nopeudella yli 50 m/s kuljettamat hiukkaset olisivat törmänneet, eivät olleet palaneet. Tällä perusteella hiukkastörmäystä ei pidetty mahdollisena syttymissyynä.

Toinen venttiileistä oli happijärjestelmän ilmanpoistoyksikön 305 mm:n läppäventtiili. Kun ilmanpoistoyksikköä otettiin käyttöön, yksikön kompressorit kävivät useiden tuntien ajan. Tänä aikana hapen lämpötila nousi 132 °C:een. Kun läppäventtiili avattiin ohjaamosta käsin, se syttyi välittömästi palamaan. Yksi venttiilin kitkaholkin materiaaleista oli fenolipolymeeri, jonka itsesyttymislämpötila oli noin 155 °C. Vähäinen kitkalämpö venttiiliä avattaessa riitti sytyttämään fenolipolymeerin, joka sitten todennäköisesti sytytti polyklooritrifluorieteenistä valmistetun istukkatiivisteiden ja Vitonista valmistetun tukirenkaan. Läpän suurimmat vauriot olivat sen ylävirtaan päin avautuneessa osassa. Kun läppä oli

avautunut 10–20°, se oli yhä kosketuksessa istukkatiivisteiden kanssa, joten tällä alueella hapen virtausnopeudet olivat pieniä. Palo ei siten voinut syttyä hiukkasten törmäyksistä.

Suomessa Rautaruukin Raahan terästehtaalla sattui vuonna 1997 tulipalo happilinjan palloventtiilissä. Raahan tehdas tutki onnettomuuden huolellisesti. Tutkimusmenetelmänä oli kirjallisuudessa esitettyjen syttymissyiden läpikäynti ja epätodennäköisten syiden karsiminen.

Onnettomuuden tapahtuessa Raahan tehtaalla hapen määrän säätöön käytetty palloventtiili oli noin 75 prosenttia auki. Virtauksen nopeudeksi venttiilin pallon kohdalla arvioitiin 100–150 m/s, kun runkoputkessa virtausnopeus oli 10–15 m/s. Virtausnopeus kasvoi venttiilissä huomattavasti, koska venttiilin halkaisija oli 80 mm ja runkoputken halkaisija 200 mm. Kyseessä oleva venttiili oli joitakin vuosia aikaisemmin vaihdettu alkupe räisen halkaisijaltaan suuremman venttiilin tilalle huoltokustannusten vähentämiseksi.

Raahan tehtaan onnettomuustutkinnan tuloksena oli, että ”palo olisi voinut syttyä, kun hiiliteräksestä valmistetusta siirtoputkistosta irronnut rautahiukkanen törmäsi venttiilin palloon ja kuumeni punahehkuseksi”. Venttiili oli valmistettu ruostumattomasta teräksestä. Vastaavanlaisten venttiilipalojen estämiseksi venttiilin tilalle asennettiin halkaisijaltaan 150 mm:n virtausjohtimin varustettu palloventtiili.

Syttymisen edellytykset

Syttymisvaaraa havainnollistetaan usein ns. palokolmiolla, jonka sivut ovat happi, palava aine ja syttymislähde. Kun kaikki kolme tekijää ovat läsnä, kolmio on valmis ja syttyminen voi tapahtua. Vain harvat rakennemateriaalit (keraamiset oksidit ja jalometallit) eivät pala hapessa. Käytännössä palokolmion kaksi sivua ovat happiputkistossa aina läsnä ja syttymiseen tarvitaan vain syttymislähde.

Rakennemateriaalit syttyvät itsestään, kun niiden lämpötila on tarpeeksi korkea. Tätä lämpötilaa kutsutaan itsesyttymislämpötilaksi. Syttymislähde luovuttaa materiaalille niin paljon energiaa, että materiaalin lämpötila saavuttaa paikallisesti syttymislämpötilan. Kun happeen kosketuksessa oleva materiaali syttyy tästä kohdastaan, palo tuottaa käytännössä aina niin korkean lämpötilan, että se leviää materiaalissa ja voi myös sytyttää viereiset materiaalit palamaan.

Tornion läppäventtiili ja putkisto oli valmistettu ruostumattomasta teräksestä. Ruostumatonta terästä suojaa syttymiseltä sen pinnalle jo ilmassa muodostunut oksidikalvo. Niinpä kokeissa on havaittu, että ruostumattoman teräksen itsesyttymislämpötila on käytännöllisesti katsoen sama kuin sulamispiste, seosaineista riippuen 1 300–1 400 °C. Jos oksidikalvo on paksu, itsesyttymislämpötila on suunnilleen sama kuin oksidin sulamispiste, joka on noin 1 460 °C. Syttymisen edellytyksenä on siis, että sula teräs pääsee kosketukseen hapen kanssa.

Teräs voi syttyä huomattavasti alemmassa lämpötilassa, jos oksidikerros on vahingoittunut esimerkiksi säröilyn, hankauksen tai kulumisen seurauksena. Jos jokin energianlähde kuumentaa tällöin paljastunutta tuoretta metallipintaa, teräs voi syttyä. Tuoreen metallipinnan syttymistä hapessa on tutkittu erilaisin kokein. Tulokseksi saadut sytty-

mislämpötilat riippuvat huomattavasti koejärjestelyistä. Esimerkiksi, kun ruostumattomasta teräksestä valmistettua teräspuikkoa kuumennettiin hapessa (paine 34,5 baaria) johtamalla sen lävitse sähkövirta ja puikko katkaistiin, muodostuneessa aukossa iskenyt sähkökipinä sytytti puikon palamaan hapen lämpötilassa 400 °C. Oleellista syttymisen kannalta oli katkaisukohtaan muodostunut erittäin kuuma valokaari, joka toimi syttymislähteenä. Jos puikkoa ei katkaistu, se ei syttynyt edes (kokeen korkeimmassa) 815 °C:n lämpötilassa.

Happiputkiston palossa voi myös ensin syttyä jokin putkiston orgaanisesta materiaalista valmistettu komponentti, yleensä tiiviste, tai putkistoon jäänyt orgaaninen epäpuhtaus. Tiivistemateriaaleista korkein itsesyttymislämpötila on polytetrafluorieteenillä (PTFE, teflon): eri lähteissä ilmoitetut lämpötilat vaihtelivat 420 °C:sta 530 °C:een. Tornion läp-päventtiilin tiiviste oli valmistettu grafiitilla lujitetusta PTFE:stä. Tämän materiaalin itsesyttymislämpötilasta ei kirjallisuustutkimuksessa löytynyt mittaustuloksia, mutta ilmeisesti se ei olennaisesti poikkea puhtaan PTFE:n syttymislämpötilasta. PTFE voi syttyä ilmassa, mutta palo ei kuitenkaan jatku. Jotta palo jatkuisi, happipitoisuuden on oltava ilman happipitoisuutta korkeampi.

PTFE-kappale palaa muotonsa säilyttäen hehkupalona ilman liekkiä. Hapessa palavan kappaleen pintalämpötilaksi on PTFE:n palamislämmön ja palokaasujen koostumuksen perusteella laskettu noin 1 500 °C. Tuloksen tarkkuutta ei ole arvioitu. Jos tulos pitää paikkansa, hapessa palavan PTFE-kappaleen pintalämpötila on riittävän korkea sytyttämään kappaleeseen kosketuksessa olevan ruostumattomasta teräksestä valmistetun rakenneosan. Hapella rikastetussa ilmassa pintalämpötila on alempi eikä siis todennäköisesti riitä sytyttämään ruostumatonta terästä.

Polymeerien palamisominaisuuksien tutkimiseen kehitetyllä testillä on todettu, että palo etenee alapäästään sytytetyssä pystysuorassa PTFE-puikossa vain, jos ilman happipitoisuus on vähintään 43–49 %. Paloa levittää lämmön johtuminen puikossa ja lämmön siirtyminen palokaasuista puikon syttymättömään osaan. Tulosta ei kuitenkaan voi yleistää toisen muotoisille, toisenlaisessa ympäristössä oleville tai eri tavalla sytytetyille PTFE-kappaleille, joilla lämmön johtuminen tai siirtyminen on erilaista.

Testillä, joissa puikko sytytettiin yläpäästään, on todettu, että happipitoisuuden tulee olla vähintään 95–99 %, jotta palo etenee puikossa. Tällöin palokaasut eivät ole kosketuksessa puikon syttymättömään osaan ja lämpö siirtyy tähän osaan pääasiassa vain johtumalla. Hapen pitoisuuden kasvu tehostaa palon etenemistä ennen kaikkea siksi, että PTFE:n palamislämpötila nousee. Jotta palo etenisi puikossa, liekin lämpötilan täytyy olla korkeampi, mikä saavutetaan kasvattamalla hapen pitoisuus kaksinkertaiseksi.

Kun putkiston rakennemateriaali, ruostumaton teräs, syttyy jonkin alemmassa lämpötilassa syttyvän materiaalin palon seurauksena, puhutaan syttymisketjusta (kindling chain).

Syttymissyvvaihtoehdot

Kirjallisuustutkimuksessa on alkuperäislähteistä koottu kymmenen syttymismekanismien luettelo:

1. *Hankauskitka*. Putkiston komponentit hankaavat toisiaan vasten. Kuumien kohtien saavuttaa kyseistä hapen painetta ja pitoisuutta vastaavan syttymislämpötilan. Esimerkiksi pyörivät tai edestakaisin liikkuvat komponentit sekä edestakaisin liikkuvat varoventtiilin sulkuelin.
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 happi-putkiston 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 sulkuosaan.
5. *Jännitys tai värinä*. Huonosti lämpöä johtavat materiaalit (esimerkiksi muovit) voivat kuumeta syttymislämpötilaansa jännityksen tai värinän vaikutuksesta. Esimerkiksi putkiston sisään tunkeutuvat kannakoimattomat liitokset.
6. *Staattinen sähkö*. Staattisen sähköpurkaus voi toisinaan kuumentaa materiaalin syttymislämpötilaansa. Esimerkiksi kuivan hapen virtauskitka voi kerätä staattista varausta epämetalliin.
7. *Valokaari*. Valokaaren energia voi sytyttää hapessa olevan materiaalin. Esimerkiksi oikosulku eristetyssä sähkölämmittimessä purkautuu vaipan lävitse happeen.
8. *Ulkopuolinen lämmönlähde*. Happi-putkiston ulkopuolinen lämmönlähde voi tuottaa riittävästi lämpöä sytyttääkseen hapessa olevan materiaalin. Esimerkiksi kemiallisen prosessin tuottama lämpö tai happivuodon ylläpitämä putkiston ulkopuolinen palo.
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. *Virtauksen aiheuttama mekaanisen komponentin värähtely*. Hapen virtaus saa polymeerimateriaalin värähtelemään, jolloin sen lämpötila nousee paikallisesti syttymislämpötilaan. Esimerkiksi esiin pistävä, väärän kokoinen laippatiiviste.

Eräät näistä syistä ovat todennäköisiä epämetallien ja toiset metallien syttymissyitä. Kokemukseen perustuva luokittelu on seuraavanlainen:

- *epämetallit*: mekaaninen isku, adiabaattinen puristus, itsesytyminen, akustinen resonanssi ja valokaari
- *metalli*: hankauskitka, hiukkasten törmäys ja valokaari.

Tutkinnassa ilmenneiden seikkojen ja venttiilin teknisten tutkimusten perusteella edellä olevasta luettelosta voitiin Tornion onnettomuudessa epätodennäköisinä tai mahdottomina jättää pois seuraavat syyt:

3. *Mekaaninen isku*. Mekaaninen isku on seurausta riittävän suuren massan tai liikemäärän omaavan kappaleen törmäyksestä. Tornion palo seurasi läppäventtiilin avaamista eikä siihen liittynyt mekaanisia iskuja.
5. *Jännitys tai värinä*. Kun huonosti lämpöä johtavat materiaalit ovat alttiina jännitykselle tai värinälle, ne voivat materiaalin sisäisen kitkan vaikutuksesta kuumeta sytymislämpötilaansa. Tällaisissa olosuhteissa olevia polymeerikomponentteja ei Tornion sulkuventtiilin läheisyydessä ollut.
6. *Staattinen sähkö*. Periaatteessa staattista varausta voi muodostua, kun happivirtauksen mukanaan kuljettamat hiukkaset törmäävät putkistosta sähköisesti eristettyyn komponenttiin. Tornion putkistossa tällaista komponenttia ei ollut.
7. *Valokaari*. Tornion läppäventtiili oli käsikäyttöinen eikä sen yhteydessä ollut sähkölaitteita.
9. *Akustinen resonanssi*. Tässä yhteydessä akustinen resonanssi tarkoittaa suljetussa putkijaksossa olevan hapen kuumenemista tilaan syntyvän seisovan aaltoliikkeen vaikutuksesta. Seisovan aaltoliikkeen syntyminen edellyttää putkijakson resonansitaajuudella toimivaa herätettä, joka voi olla turbulenttinen virtaus tai värähtelevä tai jaksottaisesti liikkuva kappale. Torniossa putkiston osa onnettomuusventtiilin jälkeen oli noin 22 m pitkä, joten siinä seisovan aaltoliikkeen taajuus oli huomattavasti alhaisempi kuin venttiilin osien värähtelytaajuus. Siten venttiiliin ei voinut syntyä akustista resonanssia vastaavaa värähtelyä.

Jäljelle jääviä sytymissyitä analysoidaan tarkemmin selostuksen analyysiosassa.

2.8.2 Happiputkiston tekninen termodynamiikka

Seuraavassa on esitetty yhteenveto liitteenä olevasta raportista, jossa käydään läpi onnettomuuden selvittämisen ja turvallisuustekijöiden kannalta tärkeitä teknisen termodynamiikan perusasioita ja ilmiöitä. Raportissa on myös selvitetty laskennallisesti eri tapahtumavaihtoehtojen mahdollisuuksia käyttäen soveltuvin osin hyväksi onnettomuustutkinnassa tehtyjä havaintoja ja Tornion venttiilien teknisen tutkinnan tuloksia.

Kaasun virtaus säiliöön

Kaasun virtauksessa säiliöön, eli esimerkiksi toisesta päästään suljettuun pitkähkään putkeen tai putkihaaraan, voidaan erottaa kaksi perustapausta:

1. Kaasu sekoittuu välittömästi säiliössä olevaan kaasuun.

2. Osa säiliössä olevasta kaasusta jää sekoittumatta tulevaan kaasuun ja puristuu kokoon.

Ideaalikaasulle⁵ johdetun kaavan perusteella ensimmäisessä tapauksessa korkein saavutettava lämpötila ei nouse kovin paljoa ympäristön lämpötilaa korkeammaksi.

Toisessa tapauksessa säiliössä olevan kaasun puristuessa kokoon lämpötilan nousu voi olla huomattava. Jos kaasun paine tulopuolella on 35 baaria ja suljetussa putkessa 1 baari, niin sekoittumattoman ja kokoon puristuneen kaasun lämpötila nousee lämpöeristetyssä tapauksessa 555 °C:seen, kun säiliöön virtaavan kaasun alkulämpötila on 27 °C (300 K). Sekoittumattomalle kaasulle tilanne on siis sama kuin jos putkessa oleva mäntä puristaisi kaasua kasaan.

Korkeat lämpötilat syntyvät suljettuna olevan venttiilin läheisyyteen. Onnettomuustapauksessa siis korkea lämpötila olisi teoriassa voinut syntyä onnettomuusventtiilistä noin 22 metrin etäisyydellä olleen venttiilin läheisyyteen sekä mahdollisesti pienten sivulinjojen päihin olettaen, että onnettomuusventtiili olisi avattu nopeasti tasaamatta ensin painetta. Tämä vaihtoehto eli adiabaattinen puristus syttymissyynä voidaan kuitenkin sulkea pois, sillä palo mitä ilmeisimmin alkoi avatusta venttiilistä eikä sitä seuraavasta suljetusta venttiilistä.

Kriittinen virtaus

Putkivirtauksessa ideaalikaasun lämpötila laskee, kun virtausnopeus kasvaa ja samalla paine pienenee. Tulos on riippumaton siitä, muuttuuko tila juoheasti tai äkillisesti esimerkiksi paineiskussa. Kohtuullisilla nopeuksilla lämpötilan lasku on muutamia asteita, mutta esimerkiksi nopeudella 300 m/s 45 °C.

Jos kaasusäiliössä on aukko ympäristöön tai toiseen säiliöön kuten esimerkiksi suljetuun putkihaaraan, jossa painetta alennetaan, alkaa kaasu luonnollisesti virrata aukosta ulos. Kun ulkoista painetta alennetaan, virtaus kasvaa, mutta vain niin sanottuun kriittiseen painesuhteeseen saakka. Vaikka painetta alennettaisiin edelleen, nopeus ja massavirta aukosta eivät enää muutu. Kriittistä virtaustilaa kutsutaan Laval-tilaksi ja siinä kohdassa virtausnopeus on Laval-tilan äänennopeuden suuruinen. Se on lepotilan äänen nopeutta pienempi lämpötilan laskun vuoksi.

Jos ylävirran puolella putkistossa kaasun lämpötila on 27 °C ja paine 35 baaria, alavirran paine 1 baari ja kaasu virtaa raollaan olevan läppäventtiilin raon läpi, on virtauksen nopeus virtausraon kriittisessä kohdassa 300 m/s, paine 22,2 baaria ja lämpötila –23 °C, joka merkitsee 50 °C:n lämpötilan pudotusta.

Syttymiseen tarvittavaa lämmönnousua ei siis nopeassakaan virtauksessa synny.

⁵ Ideaalikaasulla tarkoitetaan termodynamiikassa kaasua, jonka rakenneosat eivät vuorovaikuta toisiinsa. Kaasu voi koostua yhden tai useamman lajin atomeista tai molekyyleistä. Oikeat kaasut voidaan tietyissä olosuhteissa varsin hyvin olettaa ideaalikaasuiksi.

Suljettuna olleen putkistonosan täyttymisaika

Onnettomuudessa pahoin vaurioituneen läppäventtiilin jälkeen putkisto jatkui pääosin sisähalkaisijaltaan 311 mm:n suuruisena putkena 22 m:n matkan ennen seuraavaa suljettuna ollutta venttiiliä. Putken osan tilavuus oli 1,7 m³. Tämän osan täyttymiseen kuluva aika laskettiin numeerisesti olettaen läppäventtiilin kokonaisvuotoraolle eri suuruisia tehollisen pinta-alan arvoja. Suurimpana raon arvona käytettiin 600 mm²:ä, mikä suutin-kertoimella 1,0 vastaa likimain onnettomuuden jälkeen arvioitua onnettomuusventtiilin vuotorakojen yhteistä pinta-alaa, kun läpän avautumiskulma on noin 9 astetta. Happi oletettiin ideaalikaasuksi. Ylävirran paineeksi oletettiin taas 35 baaria, alavirran säiliön eli suljetun putkenosan alkupaineeksi 1 baari ja lämpötilaksi 27 °C (300 K).

Seuraavassa taulukossa on annettu säiliön täyttymisaikoja eli paineen tasaantumiseen kuluva aika joillakin virtausraon tehollisen pinta-alan arvoilla. Säiliön täyttymisaika on lämpöeristetyille systeemille äärellinen, toisin sanoen paine ei lähene asymptoottisesti tulopuolen painetta, vaan saavuttaa sen tietynä ajankohtana.

Taulukko 1. Täyttymisaika eri raon tehollisen pinta-alan arvoilla.

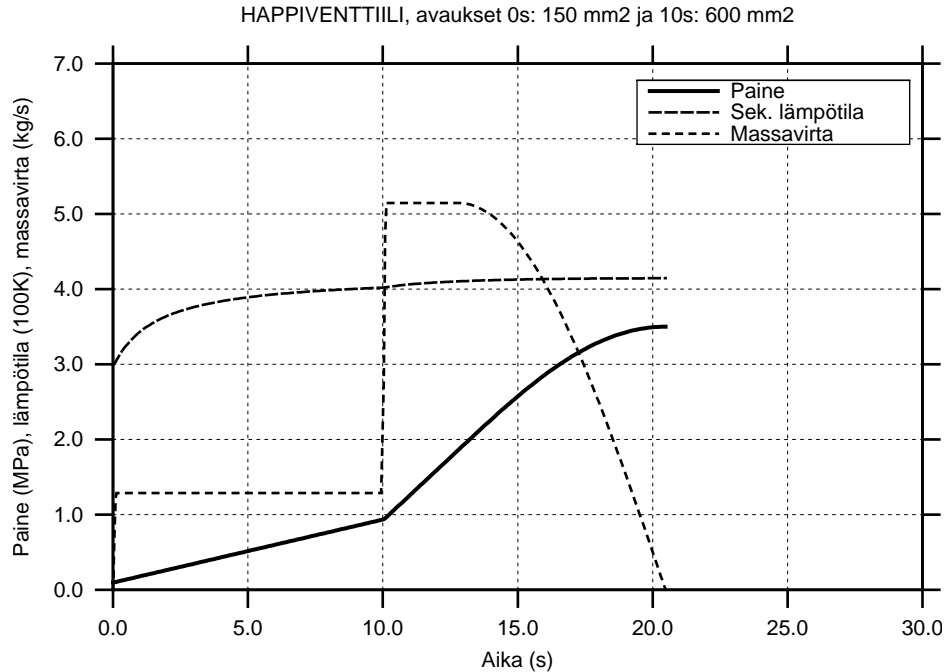
Raon tehollinen pinta-ala (mm ²)	Täyttymisaika (s)
25	308
40	194
100	77
250	32
315	25
600	13

Taulukon perusteella voi arvioida myös paineen tasaantumisaajan, kun paine tasataan ohitusventtiiliin kautta eli läppäventtiiliin ohittavan NS25-linjan palloventtiili avataan. Ohitusventtiiliin ekvivalentiksi teholliseksi pinta-alaksi voidaan arvioida noin 200 mm². Taulukosta saadaan silloin täyttymisajaksi noin 40 s.

Havainnot onnettomuuden jälkeen viittaavat selvästi siihen, että venttiilin läppä oli avattu noin 9 asteen kulmaan käyttäen apuna putkipihdejä. Läpän avaaminen tähän asentoon olisi vaatinut noin yhden täyden kierroksen käsipyörältä sulkuasennosta laskettuna. Ironneen käsipyörän akselia voidaan putkipihdeillä kiertää kertakiskaisuna kerrallaan enintään ehkä 90 astetta, joten venttiilin aukaisu on vaatinut useampia kiskaisuja. Tämän vuoksi täyttymisaika laskettiin myös useampiportaisessa avauksessa, jossa virtausrako on muodostunut kahden, kolmen tai neljän kiskaisun aikana. Kiskaisuväleiksi valittiin joko 5 tai 10 s sekä kerran 30 s. Kaikissa tapauksissa paitsi yhdessä oletettiin, että aukko alkaa avautua heti ensimmäisen kiskaisun alussa. Tämä tarkoittaa sitä, että läppä on oletettu käännettyksi tässä vaiheessa jo noin 4 astetta, jonka jälkeen rakoa alkaa syntyä.

Kuvassa 19 on esimerkkinä esitetty tulokset kaksiportaisesta avauksesta, jossa porraskävi on ollut 10 s. Ensimmäisessä avauksessa raon tehollinen pinta-ala oli 150 mm² ja toisessa täysi arvo 600 mm². Kuvasta nähdään, että aukosta virtaava massavirta pysyy aluksi kullakin aukolla vakiona niin kauan, kun raossa vallitsee kriittinen virtaus, eli noin

13 s:iin saakka. Sen jälkeen virtaus pienenee nopeasti nollaan ja tasaantumishetki on noin 20 s:n kohdalla.



Kuva 19. Paine, lämpötila ja massavirta avattaessa venttiili kaksiportaisesti.

Bild 19. Tryck, temperatur och massflöde vid öppning av ventilen i två steg.

Figure 19. Pressure, temperature, and mass flow rate when opening the valve in two steps.

Vaihtoehtona moniportaiselle avaamiselle on, että venttiilin kara-akseli on voinut kiertyä kimmoisesti käsipyörän akselista käännettäessä jopa 6 astetta ilman, että juuttuminen olisi irronnut. Kara-akselin kiertyminen on mahdollista, koska vaihde on rakenteeltaan itsepäädättävä. Käsipyörän akselia voidaan siis kiertää esimerkiksi putkipihdeillä useita kertoja ilman, että se kiertyisi välillä takaisin. Avaaja voi silloin saada vaikutelman, että lautanen liikkuu ja venttiili on avautumassa. Tutkintalautakunta varmisti tämän ominaisuuden tekemällä kokeita onnettomuusventtiilin kanssa samanlaisella venttiilillä.

Jos kara-akseli on kiertynyt, on mahdollista, että läpän vapaa akseli ja läppä voivat kiertyä useita asteita yhdellä kertaa juuttumisen irrotessa. Riippuen siitä, kuinka paljon läppä avautui juuttumisen irrotessa, oli käsipyörän akselia mahdollisesti käännettävä vielä ainakin kerran, että läppä olisi 9 astetta auki. Tässä tapauksessa paineen tasaantumiseen voidaan arvioida kuluvan aikaa alle puoli minuuttia.

Yhteenvetona laskelmien tuloksista voidaan todeta, että suljettuna olleen putkistonosan täyttymisaika vaihtelee 13 ja 45 sekunnin välillä. Tässä ei ole otettu huomioon sitä aikaa, mikä kuluu venttiilin avaamiseen noin 4 astetta eli asentoon, jossa venttiili on vielä juuri ja juuri kiinni.

Kaasun mukana kulkeutuvat hiukkaset

Kokeellisesti on havaittu, että eräät puhtaan hapen virtauksen mukana kulkeutuvat hiukkaset syttyvät itse tai sytyttävät muita kohteita törmätessään niihin. Eräänä raja-arvona tarvittavalle virtausnopeudelle on kirjallisuudessa mainittu noin 50 m/s.

Laskenta osoitti, että ekvivalentilta halkaisijaltaan 0,1 mm:n teräshiukkanen ehtii kiihtyä venttiilin läpän ja tiivisteiden välisessä raossa jo alle 5 mm:n matkalla nopeuteen 55 m/s, kun virtauksen keskinopeudeksi oletettiin 200 m/s eli noin kaksi kolmasosaa kriittisestä nopeudesta raossa. Nopeus hiukkasen kuljettua 11 mm oli 75 m/s ja 100 m/s ylitettiin noin 28 mm:n kohdalla. Suuremmalle 0,2 mm:n hiukkaselle 50 m/s ylittyi noin 8,2 mm:n kiihtymisen jälkeen.

Venttiilin läpän ja tiivisteiden välisen koko rakokehän alueella on useita erilaisia virtausmahdollisuuksia. Läpän ylävirtaan kääntyneellä puolella jopa sellainen, että hiukkaset voisivat mahdollisesti törmätä kohtuullisella nopeudella myös metallitiivisteeseen. Aina-kin osassa rakoa suihku ja sen myötä mahdolliset hiukkaset voivat suuntautua kohtuullisen jyrkässä kulmassa tiivisteosan jälkeisiin pintoihin.

Metallin palaminen ja syttyminen kitkakuumenemisessä

Useimmat metallit yhtyvät sinänsä varsin herkästi happeen. Käytännössä niitä kuitenkin suojaa jatkuvalta palamiselta pintaan muodostuva oksidikerros. Metallin voimakkaan, jatkuvan palamisen ehtona ilmeisestikin on, että sen lämpötila ylittää tietyn rajan ja että happi pääsee kosketuksiin puhtaan metallin kanssa. Suuri hapen virtausnopeus edistää palamista siten, että virtausnopeus kuljettaa sulan oksidin tai kiinteänkin oksidin sulan pinnalta pois paljastaen tuoreen metallipinnan. Oleellista metallin syttymiselle on aina suojaavan oksidikerroksen peittäminen tavalla tai toisella, esimerkiksi murtumalla tai hankautumalla.

Jos venttiili olisi syttynyt juuttuneen läpän avausyrityksessä kerralla, se olisi edellyttänyt, että jossain kohtaa läpän tai sen akselin ja muun metallisen osan välillä on takertuva kohta, jonka rajapinnassa on suuri pintapaine tai johon on muuten syntynyt tartunta. Kun pinnat äkisti liikkuvat toistensa suhteen, niiden välissä kehittyy tehoa, joka kuumentaa ne korkeaan lämpötilaan, paikoitellen jopa sulamislämpötilaan. Niiden edelleen liukuesssa paljastuu puhdasta, kuumentunutta metallista pintaa hapen vaikutukselle ja pinta alkaa palaa. Edellytyksenä palon jatkumiselle on, että palamisesta syntyvä pintateho ylittää johtumisen, konvektion ja säteilyn jäähdytyksen.

Avausyrityksessä syntyvä työ voidaan arvioida esimerkiksi siten, että oletetaan 500 N:n nettovoiman vaikuttavan pihtien päässä kohdassa, joka liikkuu yhdellä kertaa 0,5 m. Työksi muodostuu tällöin 250 J ja keskimääräiseksi tehoksi 2 500 W, kun liikkeeseen kuluneeksi ajaksi oletetaan esimerkiksi 0,1 s. Jos toisiaan koskettavat pinnat ovat samaa ainetta, niin teho jakaantuu puoliksi kummankin pinnan kesken. Kokonaistehon jakautuessa tasan esimerkiksi 1 cm²:n alalle muodostuu pintatehoksi eli tasolähteeksi kumpaankin pintaan 1 250 W/cm².

Seuraavassa taulukossa on muutamia numeerisesti laskettuja pintalämpötilan nousuja ruostumattomalle teräkselle eri pintatehoilla, kun vaikutusaika on 0,1 tai 0,15 s. Laskelmissa on otettu huomioon lämmön johtuminen teräkseen. Esimerkiksi 0,15 sekunnissa lämpö ehtii tunkeutua ruostumattomaan teräkseen 2 mm:n syvyyteen.

Taulukko 2. Pintalämpötilan nousuja ruostumattomalle teräkselle.

Ruostumaton teräs		
Vaikutusaika (s)	Kokonaispintateho (W/cm ²)	Lämpötilan nousu (°C)
0,10	5000	1163
0,10	2500	581
0,10	1250	291
0,15	5000	1424
0,15	2500	712
0,15	1250	356

Taulukosta havaitaan, että suurehkot lämpötilan nousut ovat mahdollisia, jos juuttuminen on keskittynyt tarpeeksi yhteen kohtaan. Suuremmat pintatehot edellyttävät kuitenkin selvästi 1 cm²:ä pienempää kosketuspinta-alaa ja samalla melko suurta kitka- tai kohtuullista leikkausvoimaa pintojen välissä. Edellä esitetyn mukaan laskien 5 000 W/cm² edellyttäisi siten vain 0,50 cm²:n alaa.

Jos kara-akseli on kiertynyt kimmoisesti, voi läpän vapaa akseli ja läppä kiertyä hyvin nopeasti useita asteita yhdellä kertaa tartunnan irrotessa. Silloin kimmoisesti varautunut energia, noin 170 J kiertymän ollessa 6 astetta, vapautuu juuttumiskohdassa hyvin nopeasti eli syntyvä hetkellinen teho ja vastaavasti lämpötilan nousu ovat suuret.

Käytännössä korkeita lämpötiloja aina sulamispisteeseen saakka saavutetaan melko herkästi kosketuspintojen epätasaisuuksien ja aiemmin muodostuneiden "siltojen" kohdalla. Ilmeisesti onkin niin, että pelkät keskimääräiset pintatehot eivät riitä selittämään pintojen lämpötilakäyttäytymistä. Erityisesti materiaalien välinen kitka ja tarttumisominaisuudet ovat tärkeitä. Varsinkin metalleilla voi pinnasta irronnut hiukkanen tai pintojen väliin joutunut hiukkanen kovettua muokkauslujittumisen kautta ja kyntää sitten toista tai molempia lähtöaineita siten, että kitkateho keskittyy varsin pieneen tilavuuteen kerrallaan ja saattaa siten synnyttää mahdollisesti hyvinkin korkealämpötilaisia hiukkasia.

Jos juuttumisen lauetessa vapautuvan energian 170 J oletetaan kumentavan pallomaisen kappaleen esimerkiksi 1 000 °C:n lämpötilaan, kappaleen halkaisijaksi saadaan 4,5 mm. Jos sama ainemäärä jaetaan hiukkasiin, joiden halkaisija on 0,5 mm, niitä syntyy yhteensä 365. Todellisuudessa koko työ ei kohdistu irronneisiin hiukkasiin, mutta joka tapauksessa kuumien hiukkasten muodostuminen näyttäisi tämän valossa mahdolliselta.

Hankauksessa irronneiden hiukkasten lämpötiloja on määritetty niiden lähettämän lämpösäteilyn perusteella. Esimerkiksi, kun teräsesineellä iskettiin ruosteista teräspintaa,

hiukkasten lämpötila oli 1 500–2 400 °C. Kun teräskappaletta painettiin pyörivää hiomalaikkaa vasten, hiukkasten lämpötila oli 1 850 °C ilmassa ja 1 400 °C työssä. Lämpötilaero johtui siitä, että hiukkaset paloivat ilmassa mutta eivät työssä.

Syttymisolosuhteet ja palon kehittyminen

Useimmiten metallin jatkuvaan palamiseen hapessa vaaditaan voimakas virtaus. Ohuet rakenneosat, jotka ehtivät kuumentua joko alkupalamisen tai avustavan teholähteen takia, voivat mahdollisesti jatkaa palamistaan myös seisovassa hapessa. Tällainen rakenneosa saattaisi olla läppäventtiilin metallitiiviste. Toinen kysymys on, miten palo voisi jatkua massiivisempiin rakenneosiin, jos paine tasaantuu ja virtaus lakkaa esimerkiksi noin 30 sekunnissa. Aikaväli on kuitenkin riittävä putken seinämän läpipalamiseen, jolloin putki puhkeaa ja virtaus pääsee jatkumaan. Palavasta kohdasta virtauksen mukana suihkuava sula sytyttää helposti muita pintoja. Pelkkä 6 mm paksun seinämän lämpiäminen kokonaan läpi kestää ruostumattomalla teräksellä noin 10 s.

2.8.3 Venttiilin toimivuuden tutkimus

Käsipyörän sokan katkeamisen syyn selvittämiseksi mitattiin, millä käsipyörän akselin momentilla venttiilin läppä saadaan avattua 35 baarin paine-eron vallitessa. Koetta varten tehtaalta saatiin kolme käytöstä poistettua, päältäpäin arvioiden hyväkuntoista ja tyypiltään onnettomuusventtiiliä vastaavaa venttiiliä. Kuormituskokeet tehtiin VTT:llä.

Kuormituskokeessa venttiilin läppää kuormitettiin 35 baarin painetta vastaavalla kuormalla 250 kN käyttäen läpän kiertymisen sallivaa paininta (kuva 20). Samalla venttiilin vaihteen käsipyörää kierrettiin ja mitattiin kiertämiseen tarvittava momentti läpän avautuessa. Ensimmäisessä laboratoriokokeessa tammikuussa 2004 mitattu avaamiseen tarvittava momentti oli noin 100 Nm, kun venttiilin tiivisteet olivat normaalisti kiristettyinä paikalleen. Ilman tiivisteitä avaamismomentiksi mitattiin 70–80 Nm. Momentti 100 Nm saadaan aikaan, kun kahdella kädellä kummallakin väännetään käsipyörästä 30 kg vastaavalla voimalla.

Läpän kuormitustapa ei synnyttänyt kuormitusta tiivisteeltä läpälle, joten paineen alaisessa putkilinjassa läpän tiivisteiden vastus olisi mahdollisesti lisännyt venttiilin avaamiseen tarvittavaa momenttia.



Kuva 20. Koejärjestely paine-eron alaisen venttiilin avaamismomentin mittaamiseksi vaa'alla.

Bild 20. Testarrangemang för mätning med en fjädervåg av öppningsmomentet hos en ventil under differentialtryck.

Figure 20. Testing arrangement to measure the opening torque of a valve under pressure difference with a spring balance.

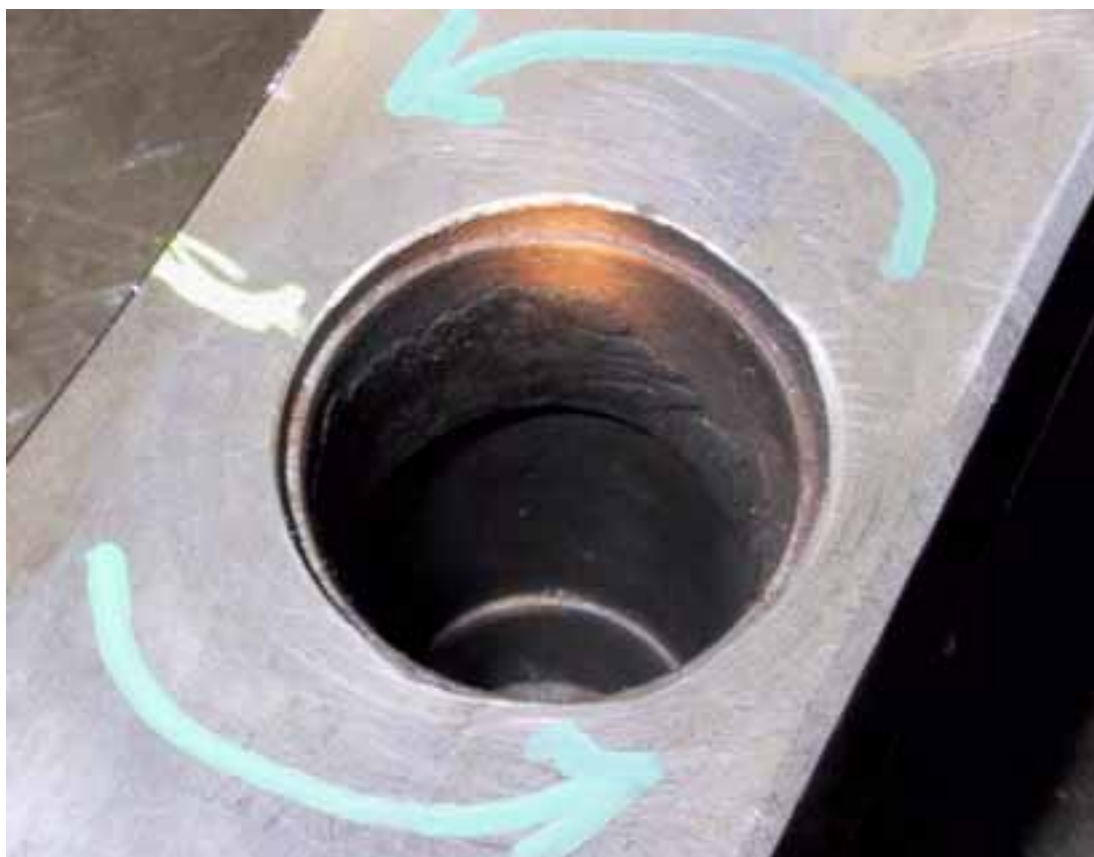
Kuormituskoe toistettiin myös todellisissa olosuhteissa käyttäen seuraavassa kohdassa 2.8.4 selostettua virtauskoetta varten Tornion tehtaalle rakennettua koelaitteistoa. Tässä halkaisijaltaan noin 300 mm:n putkessa oli samanlainen venttiili kuin onnettomuusventtiili. Putki suljettuun venttiiliin saakka paineistettiin ilmalla 35 baarin paineeseen ja venttiilin avaamiseen tarvittava momentti mitattiin käsipyörältä. Koe toistettiin useita kertoja. Tässä tapauksessa avaamiseen tarvittava momentti oli vain alle kymmenesosa edellä selostetussa laboratoriokokeessa mitatusta tuloksesta.

Tornion kokeen jälkeen laboratoriossa mitattiin vielä kahden tehtaalta saadun onnettomuusventtiilin kanssa samanlaisen venttiilin avaamiseen tarvittava momentti. Tulos oli sama kuin Torniossa tehdyssä kenttäkokeessa eli venttiilit avautuivat helposti 35 baarin painetta vastaavan kuormituksen alaisina ja avaamismomentti oli myös alle kymmenesosa ensimmäisessä laboratoriokokeessa tammikuussa mitatusta momentista.

Tammikuussa laboratoriokokeessa mitattua venttiiliä käytettiin virtauskokeissa koeventtiilinä, mutta tässä yhteydessä ei enää mitattu sen avaamismomenttia. Virtauskokeiden jälkeen venttiili sahattiin kolmeen osaan niin, että sen laakerit voitiin tarkastaa. Tarkastuksessa voitiin todeta, että vaihteen puoleinen laakeri oli ilmeisesti kunnossa, mutta toi-

sesta laakerista oli osa PTFE-pinnoitteesta kadonnut ja laakeriholkki oli likaantunut. Myös akseliin oli tarttunut tummaa likaa.

PTFE-pinta oli kadonnut usean millimetrin leveydeltä laakeriholkin koko virtauskuilun puoleisesta päästä. Alue, jolta PTFE-pinta oli kadonnut kasvoi siirryttäessä laakeriholkin kehää pitkin pois suurimman pintapaineen alueelta kuten kuva 21 osoittaa.



Kuva 21. Koeventtiilissä havaittu rikkoutunut PTFE-laakeripinta. Venttiilin avaussuunta on merkitty nuolilla ja keltaisella viivalla suunta, johon akseli painuu paineen vaikuttaessa venttiilin läppään.

Bild 21. Det skadade området i PTFE-lagret som upptäcktes i testventilen. Ventilens öppningsriktning är markerad med pilar. Riktningen i vilken axeln trycks när klaffen påverkas av tryck är markerad med en gul linje.

Figure 21. The broken PTFE bearing area discovered in the testing valve. The valve opening direction is marked with arrows. The direction which the stem bends to when pressure is affecting the disc is marked with a yellow line.

Virtauskokeiden aikana havaittiin, että virtaavan paineilman mukana paineilmasäiliöstä tuli jonkin verran pölyä. Osa tästä liasta näkyi myös tutkittavan venttiilin läpän alavirran puoleisella pinnalla. Tämä lika voi selittää kokeiden jälkeen laakerissa havaitun lian, mutta lian kertymistä linjalla käytön aikana ei voida sulkea pois. Lika, suuri pintapaine laakerissa ja laakerin suojaamaton rakenne mahdollistavat lian kertymisen laakeriin ja laakerin vaurioitumisen. Ei voida myöskään sulkea pois sitä, että venttiilin laakerin PTFE-pinta olisi ollut vaurioitunut tai likaantuneena vaurioherkistynyt jo kun venttiili tuo-

tiin avaamismomenttikokeisiin tammikuussa 2004. Vaurioitunut PTFE-pinta voisi selittää mitatun suuren avaamismomentin.

Toisaalta mitään avaamismomentin mittaauksissa käytetyistä läppäventtiileistä ei ole ilmeisesti avattu ja suljettu montaa kertaa niiden käytön aikana linjalla. Kaikki venttiilit asennettiin 2002 koeponnistuksen jälkeen. Sen jälkeen ne olivat seisokkiin 2003 saakka ilmeisesti joko kokonaan auki tai täysin suljettuina. Venttiiliä avattiin ja suljettiin virtauskokeessa ilmeisesti huomattavasti useampia kertoja kuin venttiilin koko aikaisemman käyttöhistorian aikana.

2.8.4 Virtauskoe

Virtauskokeiden tarkoituksena oli selvittää, syntykö onnettomuustilannetta vastaavissa olosuhteissa ja käyttötilanteissa kyseessä olevassa läppäventtiilissä värähtelyilmiöitä, jotka aiheuttaisivat esimerkiksi hankauskitkan vaikutuksesta venttiilin tiivisteosan lämpenemisen ja sitä kautta venttiilin syttymisen itsestään. Kokeita varten rakennettiin Tornion tehtaalle koelaitteisto, joka on esitetty kuvassa 22. Virtauskokeet tehtiin toukokuussa 2004. Kokeiden tutkintaselostus on kokonaisuudessaan liitteenä.



Kuva 22. Virtauskoelaitteisto.

Bild 22. Strömningstestutrustning.

Figure 22. Flow test equipment

Kokeessa tutkittavan venttiilin läpi johdettiin ilmaa erillisestä paineilmasäiliöstä. Tutkittavaa venttiiliä ohjattiin siihen kiinnitetyllä pneumaattisella toimilaitteella, johon oli kiinnitetty kulma-anturi mittaamaan läpän kulma-asentoa. Putkilinjassa oli ennen tutkittavaa venttiiliä paineensäätöventtiili ja putkilinjan ulosvirtauspäässä sulkuventtiili. Linjasto oli tuettu kolmen tukipalkin avulla tehtaan seinään ja lisäksi yhden tukipalkin avulla maahan juuri ennen säätöventtiiliä.

Venttiilistä mitattiin kiihtyvyyksiä seitsemällä kiihtyvyyssanturilla läpystä, runkorakenteesta ja toimilaitteesta. Koeputkiston painetta mitattiin sekä ennen tutkittavaa venttiiliä että sen jälkeen. Koetilanteessa syntyvää ääntä mitattiin koelaitteiston ulkopuolelta mikrofonilla. Tärkein mittausta oli venttiilin tiivisteiden lämpötilan mittausta tiivisteasennuksen sisältä metallitiivisteiden ja PTFE-tiivisteiden välistä termoelementeillä, jotka oli sijoitettu mahdollisimman lähelle tiivisteiden sisäreunaa. Termoelementtejä oli yhteensä 26 kappaletta, mutta niistä 14 vaurioitui venttiilin asennuksen yhteydessä. Ehjiä termoelementtejä oli kuitenkin riittävän kattavasti tiivisteiden lämpötilojen määrittämiseksi eri puolilta tiivisteitä.

Kokeiden aikana suoritettiin yhteensä 11 erillistä virtauskoetta, joiden aikana painetta, tutkittavan venttiilin asentoa ja myös päätyventtiilin asentoa muutettiin. Kokeissa oli tarkoitus löytää sellaiset asetukset, joilla mahdollinen venttiilin värähtelyilmiö ja venttiilin lämpeneminen saataisiin heräämään. Joissakin kokeissa tutkittavan venttiilin avaamisnopeus pyrittiin valitsemaan lähelle arvioitua onnettomuusventtiilin avaamisnopeutta.

Osassa kokeita tutkittavan venttiilin läppä oli koko kokeen ajan samassa asennossa noin 7 astetta avattuna ja paine nostettiin nollasta 36 baariin ja taas laskettiin nolnaan. Joissakin kokeissa paine pyrittiin säilyttämään mahdollisimman tarkasti vakiona ja venttiilin läppää avattiin askeleittain siten, että läpän asetuskulma muuttui nollasta 9 asteeseen ja takaisin nolnaan asteeseen eli kiinni.

Kokeissa todettiin, että venttiili alkoi päästää ilmaa lävitseen noin 4,5 asteen avautumiskulmalla.

Venttiilin tiivisteestä mitatut lämpötilat eivät missään kokeessa nousseet kovinkaan korkealle. Korkein mitattu lämpötila oli vain noin 30 °C.

Kokeiden aikana testattava venttiili saatiin värähtelemään siten, että äänenpaineen signaalissa ja myös kiihtyvyyssignaalin havaittiin selviä resonansseja. Näiden taajuuudet olivat kuitenkin melko korkealla (1 660–4 250 Hz) ja siirtymät olivat näillä taajuuksilla erittäin pieniä. Lämpötilojen signaaleissa ei havaittu mitään lämpötilojen nousua resonanssien aikana.

Venttiililautasen hieman matalammalla taajuudella olevan resonanssin todettiin myös heräävän kokeiden aikana. Äänen paineen signaalissa ei kuitenkaan ollut mitään suurempia tasojia tällä taajuudella. Lämpötilat eivät myöskään muuttuneet tässä tilanteessa havaittavasti.

2.8.5 Happilinjan sisäpuolinen kuvaus

Onnettomuuden jälkeen AvestaPolarit Stainless Oy teetti happilinjan sisäpuolisen kuvauksen, jonka tarkoituksena oli selvittää putken puhtaus ja kunto sulaton sisältä kaasuasemalle. Kuvaus tallennettiin kahdelle videonauhalle. Putkesta löydettyistä epäpuhtauksista otettiin näytteitä, joita analysoi AvestaPolarit Stainless Oy ja VTT. Yhteenveto VTT:n analysoimista näytteistä on tutkintaselostuksen liitteenä.

Sulatossa sisällä happiputkessa havaittiin olevan muun muassa pölyä ja erilaisia palasia (hiukkasia), sularoiskeita, hitsauslangan pätkä ja isohko irtopala. Onnettomuuskohtan ympäristössä havaittiin istutusroiskeita, hiontapölyä putken katkaisusta ja kosteusjälkiä. Sulaton ulkopuolella putkessa oli ruostetta, kosteusjälkiä ja putken sisäpintaan kiinni jäänyttä hiontapölyä. Tästä pääteltiin AvestaPolarit Stainless Oy:n yhteenvedossa, että valmistusvaiheessa hitsauksen ja puhtaaksi puhalluksen välinen aika oli ollut pitkä ja kostunut hiontapöly oli kovettunut kiinni putken pintaan. Lisäksi raakahappilinjasta löydettiin pieni hiomakivi ja tiivisteiden palanen.

VTT:n analysoimien näytteiden joukossa oli terästehtaan pölyä, metallisulapalloja, silikaattiyhdisteitä ja mahdollisesti PTFE-tiivisteiden ja silikonitiivisteiden jäämiä.

2.8.6 Venttiilien kunnossapitotoiminnassa tehtyjä havaintoja

Tehtaalla on käytössä paljon venttiileitä, jotka voivat kunnossapidosta huolimatta joskus vikaantua. Tutkintalautakunta on selvittänyt tietoonsa saamiaan vauriotapauksia. Venttiilivaurioita on tapahtunut useiden eri valmistajien venttiileissä, mutta ei onnettomuusventtiiliin lisäksi muissa Sapag-venttiileissä. Vaikka venttiilit ja niiden käyttö ovat saattaneet poiketa merkittävästi onnettomuusventtiilistä ja sen käytöstä, muut vauriot antavat lisätietoa siitä, millaisia vaurioita venttiileihin voi tulla. Vaurioita oli havaittu muun muassa halkaisijaltaan 125 mm:n typpi- ja argonlinjan venttiileissä. Näissä venttiileissä on metalliosista koostuva liukulaakerointi eikä PTFE-liukupintaa kuten onnettomuusventtiilissä.

Ennen onnettomuutta, heinäkuussa 2003, vikaantui sulatto 2:n kaasunjakohuoneessa typpilinjan venttiili. Kyseessä oli käsikäyttöisen venttiilin sijaan toimilaitteella käytettävä venttiili. Venttiili jouduttiin vaihtamaan, koska se oli juuttunut laakerien ”hirttäessä kiinni”.

Heinäkuussa 2003 sulatto 2:ssa vaihdettiin myös raaka-argonin venttiili. Seuraavana päivänä ilmeisesti kyseinen venttiili ei kuitenkaan toiminut, vaan vian vuoksi prosessissa alettiin käyttää raaka-argonin sijaan puhdasta argonia. Sen jälkeen, kaksi päivää myöhemmin, vikaantuneen venttiilin tilalle vaihdettiin venttiili raakahappilinjasta.

Onnettomuuden jälkeen toukokuussa 2004 sulatto 2:n kaasunjakohuoneen toimilaitteella varustettu argonventtiili juuttui ”laakerien hirttäessä kiinni”. Venttiilin tilalle vaihdettiin toinen venttiili puhtaan argonin putkistosta.

Kesäkuussa 2004 nimellishalkaisijaltaan 100 mm:n käsikäyttöisessä happilinjan palloventtiilissä oli ongelmia, sillä venttiiliä oli raskas käyttää. Vika korjattiin.

Lisäksi syksyllä 2004 irrotettiin sulatto 2:n kaasunjakohuoneessa noin 20 eri prosessi-kaasujen läppäventtiiliä. Venttiileitä purettaessa todettiin, että lähes kaikkien venttiilien laakeripinnat olivat vaurioituneita. Samalla todettiin, että kromikonvertterin kaasunjakohuoneessa kolme läppäventtiiliä vuoti, koska pitkulaiset kappaleet olivat aiheuttaneet hiertymiä tiivistepintoihin. Venttiileitä ei saatu tiiviiksi ja ne vaihdettiin uusiin.



- Kuva 23.** Vaurioita argonputkiston venttiileiden akseleissa. Kuvan akselien laakeroinnissa ei ollut PTFE-liukupintaa vaan laakerointi oli metallia. Lisäksi venttiilien käyttö oli ollut erilaista eli niitä avattiin ja suljettiin hyvin usein.
- Bild 23.** Skador på ventillaxlar i argonledningarna. Axellagren på bilden hade inte glidytor i PTFE; lagrens glidytor bestod av metall. Dessutom användes ventilerna på ett annat sätt. De öppnades och stängdes mycket ofta.
- Figure 23.** Damage in the valve stems of the argon piping. The stem bearings in the photo did not have a PTFE sliding surface; the bearings were made of metal. In addition to that, the use of the valves had been different. They were opened and closed very frequently.



Kuva 24. Vaurioitumisjälkiä kolmessa tehtaan argonputkiston venttiilissä. Kuvissa näkyy läpän ja venttiilin rungon metallitiivistepintojen toisiaan vastaavat vauriot.

Bild 24. Spår av skador på tre ventiler i fabriken's argonledning. Bilderna visar motsvarande skador i de metalliska tätningytorna hos klaffen och ventilhuset.

Figure 24. Signs of damage in three valves of the factory's argon piping. The photos show matching damages in metal packings of the disc and the valve body.

Argonventtiilien vaurioita on esitetty kuvissa 23 ja 24. Vauriot viittaavat likaan putkistossa ja osoittavat, että epäpuhtaudet voivat aiheuttaa venttiileissä merkittäviä vaurioita. Epäpuhtauksista putkistoissa on tehtaalla saatu useita viitteitä. Vuoden 2002 lopussa happiaseman vanha happisäiliö muutettiin argonsäiliöksi. Siinä yhteydessä happikäytössä olleen säiliön tarkastuksessa havaittiin ”säiliön sisäpuolella ruskehtavaa pölyä ja vaipassa vierasruostetta paikoitellen”. Happiputkistoista löytyi likaa onnettomuuden jälkeessä tehdyssä tarkastuksessa ja myöhemmin terässulaton linjan 1 sisäisestä putkistosta on löytynyt ainakin 16 mm:n ruuville tarkoitettu aluslevy ja kromikonvertterin lanssille johtavasta kaasulinjasta noin 20 mm:n pituisia terästappeja. Myös venttiilivauriot osoittavat putkistoissa liikkuvan eri kokoisia epäpuhtauksia, joiden alkuperä lienee vaihteleva.

2.8.7 Turvallisuustoiminnan tason arviointi

Turvallisuustoiminnan tason arvioinnissa selvitettiin tekijöitä, jotka olisivat voineet taustalla vaikuttaa onnettomuuden syntyyn ja joilla voisi olla merkitystä vastaavanlaisten onnettomuuksien ehkäisyssä. Selvityksessä keskityttiin arvioimaan terässulaton, tehdaspalvelun, tehtaan turvallisuusorganisaation ja joidenkin alihankkijoiden toiminta- ja työkäytäntöjä ennen onnettomuutta. Selvityksen perusteella laadittu raportti on kokonaisuudessaan tutkintaselostuksen liitteenä.

Turvallisuustoiminnan taso arvioitiin henkilöiden haastattelujen pohjalta. AvestaPolarit Stainless Oy:stä haastateltiin 19:ää henkilöä linjaorganisaatiosta ja turvallisuus- ja työsuojeluorganisaatiosta. Lisäksi haastateltiin kolmea ulkopuolisten urakoitsijoiden edustajaa.

Haastateltaville esitettiin samat kysymykset, joita on käytetty aikaisemmin useissa vastaavanlaisissa turvallisuusselvityksissä muunneltuna kyseiseen toimintaympäristöön sopiviksi. Haastatteluissa saatujen vastausten perusteella arvioitiin turvallisuustoiminnan tasoa niin sanotulla turvallisuusprofiililla, jossa turvallisuustoiminnan osatekijöille oli annettu pisteitä asteikolla nolasta sataan. Pisteluku yli 50 vastasi tavanomaista toiminnan tasoa, jossa ei ole vakavia puutteita ja yli 75 pistettä tasoa, jossa ei ole puutteita ja toiminnan rutiinit ja kehittäminen ovat kunnossa.

Turvallisuustoiminnan tasoa kuvaavan pisteluvun arvioitiin olevan selvästi alle 50 turvallisuusprofiilin kohdissa ”työympäristön tarkkailu ja riskien arviointi”, ”seuranta ja tarkkailu” ja ”turvallisuusasenteet ja kulttuuri”. Parhaat pisteet, selvästi yli 50 saivat ”työsuojelu-toiminnan suunnitelmallisuus ja tavoitteellisuus”, ”pelastusvalmius” ja ”viranomaisyhteistyö”.

Haastattelujen perusteella työpaikan vaarojen tunnistaminen ja niiden sisältämien riskien arviointi oli puutteellista. Riskien arviointia ei aikaisemmin ole tehty järjestelmällisesti ja kattavasti eri työtehtävissä. Työsuoritukseen liittyvien vaarojen ja oikeiden työtapojen dokumentaatio on ollut puutteellista. Esimerkiksi happilinjän työohjeet olivat varsin suppeat ja osittain ristiriitaiset. Työohjeet ovat perustuneet enemmän koneiden ja laitteiden mukana tulleisiin laitetoimittajien ohjeisiin kuin itse työsuorituksesta lähtevään ohjeistukseen.



Seurannalla ymmärrettiin arvioinnissa toiminnan ja tavoitteiden pitemmän aikavälin arviointia ja tarkkailulla jokapäiväistä toimintaa lähellä olevaa toiminnan ja työympäristön arviointia. Seuranta on tehtaalla ollut enemmän reaktiivista taaksepäin katsomista muun muassa tunnuslukujen avulla. Johdon tarkastuskäynnit ovat käynnistymässä, mutta ennen onnettomuutta tällaista toimintaa ei ollut ainakaan systemaattisena. Alun hankaluuksista huolimatta työsuojelutarjoaminen on kehittynyt.

Terässulatossa työnteon asenteita leimasi voimakas tekemisen meininki: "terästä pitää tulla". Turvallisuusasenteet vaikuttivat tuotannolle alistaisilta. Toiminta on hyvin tuotanto-orientoitunutta. Työturvallisuus tai työterveys eivät tule esille eivätkä saa sellaista ennalta ehkäisevää asemaa kuin mitä niiden hyvässä turvallisuustoiminnassa tulisi saada.

Tehtaalla voitiin tunnistaa riskinotokulttuuri, jossa tietty tehtävä tai työvaihe oli tehty tietoisella riskinotolla tuotannon turvaamiseksi. Työnjohtaja oli voinut itse toimia esimerkkinä. Prosessien sujussa kaikki menee hyvin, mutta häiriötilanteissa energia menee ongelmien ratkaisuun ja se vahvistaa tuotantopaineissa riskinottoa.

Turvallisuustoiminnan tavoitteet toimivat paperilla. Tavoitteita ei pystytty jalkauttamaan käytännön toimiksi eikä työsuojelutoiminta tullut osaksi arkipäivän toimintoja. Onnettomuuden jälkeen tässä on näkyvissä selkeä muutos.

3 ANALYYSI

Syttymissyiden analysoinnin perusteena ovat seuraavat tutkinnassa selvinneet seikat:

- Käsipyörän sokkana ollut ruuvi oli poikki. Käsipyörä oli ollut kiinnitettynä ruuvilla putkisokan asemesta.
- Käsipyörä luisti. Putkipihdit pyydettiin ja tuotiin paikalle. Venttiin karassa oli putkipihdin leukojen jälkiä.
- Onnettomuusventtiin ohituslinjan palloventtiili oli toimintakuntoinen ja kiinni onnettomuuden jälkeen. Kahva ei ollut aivan ääriasennossa.
- Viereisen raakahappilinjan sulkuventtiili ja ohitusventtiili olivat auki.
- Onnettomuusventtiili oli avattuna noin 9 asteen verran.
- Onnettomuustilasta löytyi hitsauspoltin.
- Venttiin oman liikerajoittimen lukkoruuvi puuttui, minkä seurauksena liikerajoitin oli irrallaan vaihteen kiinnityslaipan sisällä ja väärässä asennossa.

Tutkinnassa on päätelty, että venttiili oli juuttunut. Perusteena on, että käsipyörän sokkana ollut ruuvi oli poikki, paikalle oli tuotu käsipyörän luistamisen vuoksi putkipihdit ja että venttiin karassa oli putkipihdin leukojen jälkiä.

On mahdollista, että juuttumisen olisi voinut aiheuttaa jokin venttiin tekninen vika tai läpän ja rungon väliin kiilautunut vieras kappale. Tutkintalautakunta ei kuitenkaan ole saanut onnettomuusventtiin käyttäjiltä mitään tietoa siitä, että venttiilissä olisi ollut vikaa ennen avausyritystä. Venttiin liikerajoittimen lukkoruuvien puuttuminen voisi olla osoitus aikaisemmin havaitun juuttumisen korjausyrityksestä tai huolimattomuudesta venttiin kokoamisessa. Tehtyjen avaamiskokeiden mukaan kunnossa oleva venttiili avautuu helposti, vaikka läppään vaikuttaa 35 baarin paine-ero.

Onnettomuusventtiili oli ollut valmistajalla koeponnistettavana vuonna 2002 muiden samassa erässä tehtaalle toimitettujen venttiilien kanssa, koska joissakin erän venttiileissä oli havaittu vuotoa. Koeponnistuksessa käytettiin 44 baarin painetta. Kokeissa ei pidetty pöytäkirjaa, mutta on ilmeistä, että tehtaalle ei olisi toimitettu takaisin juuttunutta venttiiliä, jos vika olisi huomattu. Toisaalta tehdas tuskin olisi ottanut vastaan juuttunutta venttiiliä, jos vika olisi huomattu. Onnettomuusventtiili toimi siis ilmeisesti moitteettomasti kesällä 2002. Tosin tiiveyskokeissa ei todennäköisesti olisi havaittu sellaista vikaa, joka haittaa venttiin avaamista paine-eron alaisena.

3.1 Todennäköiset syttymissyyt

Kohdassa 2.8.1 on kirjallisuusselvityksen perusteella luettelo kymmenestä mahdollisesta happiputkiston syttymismekanismista. Näistä kymmenestä on yksinkertaisen päättelyn avulla heti voitu epätodennäköisinä tai mahdottomina sulkea pois mekaaninen isku, jännitys tai värinä, staattinen sähkö, valokaari ja akustinen resonanssi. Adiabaattista puris-

tusta syttymissyynä on käsitelty luvussa 2.8.2 ja myös se voidaan sulkea pois, sillä siinä tapauksessa palon olisi pitänyt alkaa onnettomuusventtiiliä seuraavasta, kiinni olleesta sulkuventtiilistä. Luvussa 2.8.4 käsitellyn virtauskokeen perusteella voitiin sulkea pois syttymisen virtauskitkan aiheuttaman metallitiivisteiden tai läpän värähtelyn vuoksi, sillä kokeiden aikana ei havaittu venttiilin rungon tai läpän lämpenemistä. Kymmenestä tarkastellusta syttymismekanismista on enää jäljellä ulkopuolinen lämmönlähde, hiukkas-ten törmäys ja hankauskitka.

3.1.1 Ulkopuolinen lämmönlähde

Onnettomuudessa kuolleen alihankkijan työnjohtajan ruumiin läheltä löytyi hitsauspoltin. Hänelle oli myös myönnetty tulityölupa paineilmalinjan korjaamiseen putkisillalla sulaton ulkopuolella. Lupa oli voimassa onnettomuuspäivänä kello 10–13. Työtä ei ehditty aloittaa ennen onnettomuutta.

Tutkintalautakunta kuitenkin selvitti, olisiko onnettomuuspaikalla mahdollisesti käytetty hitsauspoltinta esimerkiksi juuttuneen venttiilin lämmittämiseen. Työnjohtajat eivät yleensä kuljeta mukanaan hitsauspoltinta. Venttiilihuoneessa ei tutkintalautakunnan käsitelyn mukaan ollut mitään sellaista, mihin hitsauspoltinta olisi voitu tarvita.

Putkipihdit venttiilihuoneeseen juuri ennen räjähdystä vieneeltä asentajalta kysyttiin onnettomuuden jälkeen, näkikö hän ylhäällä polttoleikkauksvälineitä tai jotain vastaavaa. Asentajan muistikuvan mukaan työnjohtajilla ei ollut mitään työkaluja tai koneita tasolla, jolla he työskentelivät. Jos työnjohtajilla olisi ollut kaasupulloja, asentaja olisi ne todennäköisesti nähnyt ja muistanut.

Tutkintalautakunnan pyynnöstä tehtaalla tehtiin laaja selvitys siitä, kenellä tehtaan ja alihankkijoiden työntekijöillä oli kaasupulloja onnettomuuspaikan ympäristössä. Selvityksen perusteella kaikki kaasupullot olivat tallella. Onnettomuuspaikalta ei löydetty merkkejä kaasupulloista. Hitsauspolttimessa ei ollut merkkejä siitä, että kaasuletkut olisivat olleet siinä kiinni.

Selvityksen perusteella onnettomuuspaikalla ei ollut käytetty hitsauspoltinta eikä sen käytölle siellä ole tiedossa mitään erityistä syytä. Hitsauspoltin saattoi olla mukana josain toisessa kohteessa tehtävää työtä varten.

Toinen ulkopuolinen lämmönlähde olisi voinut olla hapen vuoto ulos putkilinjasta ja sitä seurannut ulkopuolinen palo. Onnettomuusventtiiliin tarkastuksen perusteella se oli asianmukaisesti kiristetty paikalleen eikä siinä todennäköisesti ollut vuotoa ulospäin.

Onnettomuuspaikalle tullut hitsaaja oli sanonut työparilleen menevänsä tupakalle. Hän saattoi tupakoida venttiilihuoneessa, mikä ei kuitenkaan ole kovin todennäköistä. Tutkintalautakunta ei myöskään pidä mahdollisena, että tupakointi olisi voinut aiheuttaa palon. Palojäljet viittaavat venttiilistä alkaneeseen paloon ja toisaalta palo ei voi siirtyä happivuototilanteessa tupakasta venttiilin runkoon.

3.1.2 Hiukkasten törmäys

Happivirtauksen mukanaan kuljettamien hiukkasten törmäminen metallikomponentteihin on yleinen julkisesti raportoitujen putkistopalojen syy. Esimerkiksi 90 % hapen siirto-putkien (pituus 1–500 km) paloista on päätelty aiheutuneen hiukkasten törmäyksistä. Myös Rautaruukki Oy:n terästehtaalla Raahessa 1997 sattuneen venttiilipalon pääteltiin saaneen alkunsa törmäyksessä ”punahehkuiseksi kumentuneista hiukkasista”. Oletettavasti tukivat Rautaruukin tutkintaselostuksen mukaan havainnot venttiilin vaurioista. Samoin Outokumpu Oy:n Tornion tehtaalla sattui 1986 happiputkistossa suodattimen palo, jonka oletettiin aiheutuneen liitosta tehtäessä putkeen joutuneesta leikkauspölystä, teräshiukkasista ja laikan sidonta-aineista.

Tornion terästehtaan happiputkisto oli valmistettu ruostumattomasta teräksestä, josta ei muodostu metallipölyä niin kuin hiiliteräksestä. Onnettomuuden jälkeen putkea kuvattaessa ja puhdistettaessa todettiin kuitenkin, että putkeen oli asennuksen yhteydessä päässyt erilaisia epäpuhtauksia kuten hiomakiven jäännöksiä, työstölastuja, tehdaspölyä ja metallisulupalloja, jotka ovat todennäköisesti hitsausroiskeita. Koska kiinni olleen sulkuventtiilin läppä oli vaakasuorassa, on mahdollista, että sen pinnalle oli kertynyt epäpuhtauksia.

Happivirtauksen kuljettamat metallihiukkaset voivat syttyä, jos niissä on mukana hapettumatonta metallia ja niiden nopeus on tarpeeksi suuri, kokeiden mukaan yli 50 m/s. Hiukkaset voivat syttyä törmäyksessä palamaan ja voivat välittömästi sytyttää teräksisen rakenneosan. Välillisessä syttymisessä törmäyksessä kumentunut hiukkanen sytyttää ensin tiivisteiden tai ohuen metalliosan, joka puolestaan sytyttää paksun metalliosan (syttymisketju). Kriittisiä törmäyskohtia ovat venttiilit. Erityisesti läppäventtiili muodostaa virtaussesteen myös auki ollessaan.

Laskelmien perusteella myös läpän pinnalle joutunut hiukkanen olisi saavuttanut yli 100 m/s:n nopeuden venttiilin läpän ja rungon välisessä raossa. Edellytykset teräksen syttymiselle hiukkastörmäyksen seurauksena olivat siis olemassa.

Ylävirtaan kääntyneellä läpän puolella hiukkaset olisivat voineet mahdollisesti törmätä kohtuullisella nopeudella myös metallitiivisteeseen. Tältä alueelta läheltä läpän akselia, joka oli vastakkaisella puolella kuin vaihde, venttiili ja putki olivat palaneet erityisen pahasti. Palovauriot kasvoivat selvästi liikuttaessa venttiilin rungon kehää pitkin kohti tätä aluetta. Jos palo olisi alkanut tältä alueelta, ensin olisi kumentunut metallitiiviste ja se olisi voinut sytyttää PTFE-tiivisteiden. Silloin vaihteen puolella läpässä oleva läpi palanut kohta olisi syttynyt vasta hiukan myöhäisemmässä vaiheessa kuumen metallisuihkun osuessa siihen.

Alavirtaan kääntyneellä läpän puolella hiukkaset olisivat voineet törmätä loivassa kulmassa venttiilin runkoon. Siltä osalta venttiilin runko on palanut vähemmän kuin vastakkaiselta puolelta, mutta palon syttymistä tältä alueelta ei voida sulkea pois.

Syttyminen hiukkasen törmäyksen vaikutuksesta edellyttää suurta virtausnopeutta ja siis sitä, että sulkuventtiili olisi avattu roolleen ennen kuin paine oli tasaantunut. Suljetun

22 m pitkän putkenosan täyttyminen ohitusventtiilin kautta olisi kestänyt laskelmien mukaan noin 40 sekuntia. Jos ohitusventtiili olisi avattu ennen avaamisyritystä, paine olisi ehtinyt tasaantua viimeistään avaamisen aikana. Paine olisi tasaantunut jo aikaisemmin, jos ohitusventtiili olisi avattu ennen kuin asentajaa pyydettiin tuomaan putkipihdit, sillä pihdien tuonti kesti vähintään muutaman minuutin.

Laskelmien perusteella virtauksen nopeus sulkuventtiilin läpän raossa olisi ollut riittävä hiukkasen syttymisrajanopeuden saavuttamiseen suurimman osan seuraavan putkijakson täyttymisajasta. Täyttymiseen olisi kulunut aikaa 13–45 sekuntia riippuen siitä, kuinka monessa vaiheessa läppä oli avautunut 9 asteen kulmaan.

Syttyminen hiukkasen törmäyksen vaikutuksesta edellyttää siis sitä, että sulkuventtiiliä avattiin viimeistään noin puolen minuutin kuluttua ohitusventtiilin avaamisesta tai ohitusventtiiliä ei avattu lainkaan.

Happiputkistopaloja tutkittaessa on usein päädytty siihen, että syynä on ollut hiukkastörmäys. Hiukkastörmäystä syttymisen syynä ei voida nytkään sulkea pois. Tässä tapauksessa on todettu, että venttiili oli juuttunut. Jos venttiili olisi syttynyt hiukkastörmäyksen vaikutuksesta, olisi se ollut mahdollista juuttumisesta riippumatta. Tutkintalautakunnan mielestä on todennäköistä, että syttyminen liittyi venttiilin juuttumiseen.

3.1.3 Hankauskitka

Hankauskitkaa voi syntyä liikkuvissa osissa, joita onnettomuusventtiilissä olivat läppä ja sen akselit. Venttiiliä avattaessa läppä liikkui PTFE- ja metallitiivisteeseen nähden. Läpän akselit sen sijaan liikkuivat akselien laakeriholkkien suhteen. Hankauskitkaa voi lisäksi syntyä tilanteessa, jossa vieras kappale on syystä tai toisesta kiilautunut toistensa suhteen liikkuvien osien väliin.

Läpän hankautuminen venttiilin runkoa tai metallitiivistettä vasten

Läppä oli kosketuksessa PTFE-tiivisteeseen, mutta metallitiivisteeseen ja läpän välissä on normaalitilanteessa pieni rako. Rako todettiin virtauskokeessa käytettyä ja muita onnettomuusventtiiliä vastaavia venttiileitä tutkittaessa. Läpän ja PTFE-tiivisteeseen välisessä hankauksessa tapahtuva syttyminen ei ole todennäköistä, sillä kuumentuminen edellyttää kahden kappaleen välistä suurta kitkaa tai tartuntaa. Sen sijaan läpän ja metallitiivisteeseen välillä hankaus voisi aiheuttaa merkittävää kuumentumista, mutta niiden kosketus edellyttäisi läpän siirtymistä tai muuta venttiilin merkittävää mekaanista vaurioitumista. Venttiilin rakenteen ja muiden vastaavien venttiilien tutkinnan perusteella se ei ole todennäköistä.

Vieraan kappaleen kiilautuminen

Sen sijaan tutkintalautakunnan mielestä on mahdollista, että läpän ja venttiilin rungon tai metallitiivisteeseen väliin on voinut kiilautua jokin vieras kappale. Se selittäisi venttiilin juuttumisen ja lisäksi syttymisen siten, että venttiiliä avattaessa kappaleen ja jonkin venttiilin osan välille syntyisi hankauksessa kuumentuva kosketus. Kuumentuminen olisi hyvin

paikallista, mutta riittäisi sytyttämään hapessa esimerkiksi PTFE-tiivisteiden tai jopa suoraan teräksen sen oksidipinnan rikkouduttua. Vieraan kappaleen kiilautumisesta ei ole näyttöä, mutta jos näin on tapahtunut, todennäköinen paikka on läpän kehän siinä sektorissa, josta venttiilin runko oli palanut pahiten eli hiukan läpän vapaasta akselistä läpän ylävirtaan kääntyneen puoliskon suuntaan.

Vieraan esineen joutuminen venttiiliin on mahdollista, koska putkistosta löydettiin onnettomuuden jälkeen epäpuhtauksia ja vieraita esineitä, joista suurin oli halkaisijaltaan yli 2 cm:n hiomakiven pala. Esineen jääminen läpän ja rungon väliin on mahdollista, koska niin on tehtaalla käynyt ainakin argonputkiston läppäventtiileissä. Kuvasta 24 käy ilmi, kuinka vieraat esineet ovat hanganneet uria sekä rungon että läpän metallisiin tiivistepintoihin.

Syttyminen vieraan kappaleen kiilautumisen ja sitä seuranneen hankauskitkan vuoksi on mahdollista riippumatta siitä, käytettiinkö venttiilin avaamisen yhteydessä ohituslinjaa paineen tasaamiseen vai ei.

On myös mahdollista, että läpän ja venttiilin rungon väliin jääneestä vieraasta kappaleesta olisi avaamisyrityksessä irronnut hiukkasia. Kyseiset hiukkaset olisivat voineet tällöin kiihtyä nopeassa virtauksessa suureen nopeuteen, törmätä venttiilin osiin ja syttyä. Tämä teoria edellyttää, että venttiilin avaaminen olisi tehty ohituslinjaa käyttämättä.

Hankauskitka laakeriholkissa

Läpän akselit liikkuvat laakeriholkeissa, jossa akseli oli kosketuksessa metalliholkin sisäpuolella olevaan PTFE-laakeripintaan. Kitkakuumenemistä on voinut tapahtua akselien ja laakeripesien välillä siinä tapauksessa, että laakeriholkin PTFE-laakeripinta olisi vaurioitunut. Näin on palojälkien perusteella voinut tapahtua läpän vapaan akselin läpän puoleisessa laakeroinnissa. PTFE-pinnan vaurioituminen on mahdollista, sillä tutkintalautakunnan kuormitus- ja virtauskokeissa käyttämässä venttiilissä havaittiin PTFE-laakeripinnan vaurio. Vaikka vaurio oli pääosin muualla kuin suurimman pintapaineen alueella, lienee mahdollista, että PTFE-pinta voisi vaurioitua laajalta alueelta myös siitä kohdasta. Siinä tapauksessa voimakas tartunta ja kitkakuumeneminen olisi mahdollista.

Onnettomuusventtiilin laakeroinnin vaurioitumisen arviointiin vaikuttaa se, että sitä oli suljettu ja avattu ilmeisesti vain alle kymmenen kertaa kun taas koeventtiiliä oli käytetty ennen laakerivaurion havaitsemista huomattavasti useammin. Koeventtiilin laakeripinnan vaurioitumisajankohta ei tosin ole tiedossa, joten se on voinut olla vaurioitunut jo tammikuussa 2004 ennen toukokuussa 2004 tehtyjä virtauskokeita. Siihen viittaa tammikuussa mitattu suurehko avaamismomentti. Koeventtiilin PTFE-pinnan rikkoutumista ja likaantumista on joka tapauksessa voinut lisätä venttiilin varsin kova käyttö virtauskokeissa ja virtaavan ilman mukana säiliöstä tullut lika.

Laakeripinta oli vaurioitunut ja laakeroinnissa oli likaa vain läpän vapaan akselin laakeriholkissa. Vapaa akseli on kiinnitetty läppään yhdellä sokkatapilla, kun läpän kiinnitys kara-akseliin on kahdella sokkatapilla. Lisäksi vapaa akseli on lyhyempi kuin kara-akseli. Siten vapaan akselin kiinnitys on joustavampi kuin kara-akselin, mistä seuraa, että ak-

selin taipuma suuren paine-eron vaikuttaessa läppään on suurempi ja pintapaine keskittyy erityisesti laakerin reuna-alueelle. Lisäksi kuormituksen aiheuttamat muodonmuutokset sallivat lian pääsyn helpommin vapaan akselin laakerointiin. Näin ollen laakerin vaurioitumisherkkyys riippuu siitä, kuinka suuri paine-ero vaikuttaa läppään.

Syttymisen mahdollistava kitkakuumeneminen läpän vapaalla akselilla on voinut tapahtua, jos akselin ja laakeriholkin välille olisi syntynyt kahden teräksen välinen kosketus ja luja tartunta. Onnettomuusventtiiliä vastaavan venttiilin toimintakokeessa käsipyörältä mitattu vääntömomentti 35 baarin paineen vaikuttaessa läppään vastaa akselin ja laakeriholkin välistä kitkakerrointa 0,8. Näin suuren kitkan vaikuttaessa vähäinenkin liike voi irrottaa pinnoista kuumia hiukkasia ja synnyttää kuumia pisteitä, jossa metalli voi paikallisesti jopa sulaa. Lienee mahdollista, että laakeriin olisi voinut lian mukana joutua myös muita syttymiskelpoisia hiukkasia.

Laakeroinnin vaurioituminen ja tartunta laakerissa selittäisi onnettomuusventtiilin avaamisyrityksessä ilmenneen juuttumisen. Juuttuminen edellyttää esimerkiksi metallipintojen epätasaisuuksien painumista toistensa lomaan niin, että pinnat liukuvat toistensa suhteen kynönomaisesti. Silloin vähintään toisen pinnan myötölujuus ylittyy. Juuttumisen voimakkuus riippuu kosketuspinnan laajuudesta, joka voidaan arvioida materiaalien myötölujuuden perusteella. Tässä tapauksessa juuttuminen olisi edellyttänyt tartuntaa muutaman neliösenttimetrin alueella.

Venttiilin palovauriot viittaavat siihen, että läpän vapaan akselin läpän puoleinen laakeriholkki on mahdollinen syttymiskohta. Koko venttiilin pahimmat palovauriot tosin olivat jonkin verran sivussa vapaasta akselistä, mutta palon etenemissuunnat ovat vaikeasti jäljitettävissä. Tarkemmin määriteltynä syttyminen on tässä vaihtoehdossa todennäköisintä laakeriholkin virtauskanavan puoleisessa reunassa, jossa akseli puristuu läppään vaikuttavan paineen vuoksi eniten laakeriholkkia vasten.

Jotta kitkakuumenemiseen johtava voimallinen liukuminen olisi mahdollinen akselin ja laakeriholkin välissä, laakeriholkin on pysyttävä paikoillaan siten, ettei se pyörisi venttiilin rungon laakeripesässä. Laakeriholkki irtosi tutkitusta venttiilistä noin 4 kN:n akselin suuntaisella voimalla, joka on vain alle kymmenesosa 35 baarin paine-eron holkkiin kohdistamasta voimasta. Lisäksi juuttuminen, riittävä kitkavoima ja siten kitkakuumeneminen on mahdollista vain siinä tilanteessa, että venttiiliä avataan paine-eron vaikuttaessa läppään eli niin, että ohitusventtiiliä ei olisi käytetty paineen tasaamiseen ennen venttiilin avaamista.

Läpän ollessa suljettuna laakeripesien lähellä ei ollut happea, vaan ilmaa. Kitkakuumeneminen riittää kuumentamaan PTFE-materiaalin yli sen syttymislämpötilan, mutta palo ei leviä ilman happipitoisuudessa. Happipitoisuuden nousu nostaa PTFE:n palamislämpötilan ruostumattoman teräksen syttymislämpötilaa korkeammaksi ja tekee myös teräksen palamisen mahdolliseksi.

Happipitoisuus laakeripesien läheisyydessä nousi, kun happilinjan seuraava putkijakso paineistui. Tällöin putkijakson happipitoisuuden nousu ilman 21 prosentista 98 prosenttiin kesti vähintään 13 sekuntia. Happea purkautui kahdesta kuunsirpin muotoisesta au-

kosta, jotka sijaitsivat 90 astetta sivussa akseleista. Siksi akselit eivät olleet kosketuksessa happisuihkujen kanssa.

Jotta PTFE-pinnoite tai jokin laakeripesässä ollut epäpuhtaus saattoi sytyttää teräksen, sen täytyi palaa kauemmin kuin putkijakson täyttyminen kesti. Palamisen lämmöntuoton piti ylittää lämpöhäviöt ympäröivään teräkseen.

Kara-akselin joustava vääntyminen venttiilin käsipyörän akselia käännettäessä

Hankauskitkan syntyminen vieraan kappaleen tapauksessa tai läpän vapaan akselin laakeroinnissa edellyttää melko suurta kyseiseen pienehköön hankauskohtaan vaikuttavaa tehoa. Onnettomuustilanteessa energia oli peräisin venttiilin käsipyörän akselia käännettäessä tehdystä työstä. Käsipyörän akselia käännettiin sokan katkettua putkipihdeillä, jolloin käsipyörän akselia saatiin käännettyä kerrallaan arviolta 90 astetta. Venttiilissä oli välityssuhteeltaan 40:1 vaihde, jolloin 90 asteen kääntö käsipyörän akselistä vastasi läpän kääntymistä hiukan yli 2 astetta eli 0,6 mm:n liikettä akselin pinnalla.

Läpän kara-akseliin kohdistuva momentti on vaihteen välityssuhteen vuoksi varsin suuri. Käsipyörän akselin momentti siirtyy läpän akselille 40-kertaisena, jos vaihteen häviöitä ei oteta huomioon. Kara-akseli on melko pitkä, mikä mahdollistaa sen jousimaisen vääntymisen käsipyörän akselia juuttumistilanteessa käännettäessä, jos joko läppä tai vapaa akseli on juuttunut. Laskelmien mukaan kara-akseli voi vääntyä vääntöjousen tavoin jopa kuusi astetta kunnes juuttuminen hellittää vääntövoiman kasvettua. Kuuden asteen kiertymä ei ole yhdellä putkipihdeillä tehtävällä käännöllä mahdollinen, mutta koska vaihde on rakenteeltaan itsepidättävä, kara-akselin kiertymä ei palaudu vaihteen kautta takaisin käsipyörän akselille. Käsipyörän akselia siis voidaan kiertää useita kertoja niin, että kara-akseli kiertyy joka käännöllä hiukan lisää. Samalla käsipyörän akselia kääntävälle henkilölle syntyy vaikutelma, että venttiili alkaa pikkuhiljaa avautua.

Tutkintalautakunnan mielestä on mahdollista, että kara-akseli vääntyi, kun juuttuneen venttiilin käsipyörän akselia käännettiin aluksi käsipyörällä ja sitten putkipihdeillä useita kertoja. Sen jälkeen on voinut käydä niin, että vieraan kappaleen kiilautuminen tai laakeroinnissa syntynyt tartunta yhtäkkiä laukesi ja joustoenergia muuttui juuttuneessa kohdassa lämmöksi hyvin nopeasti. Syttyminen ei heti näkynyt putken ulkopuolelle. Palo on voinut voimistua vasta joitakin sekunteja myöhemmin, kun venttiiliä mahdollisesti avattiin lisää ja viimeistään kun putki paloi puhki.

3.2 Tapahtumien kulun analysointi

Tehtaalla oli päättymässä 19.9.2003 uuden sulatto 2:n ensimmäinen vuosihuoltoseisokki, kun tehtaan työnjohtaja ja alihankkijan palveluksessa ollut työnjohtaja lähtivät avaamaan happilinjan venttiileitä aloittaakseen putkiston testauksen. Edellisenä päivänä pidetyssä seisokkipalaverissa oli todettu töiden sujuneen hyvin ja näytti siltä, että sulaton toiminta voitaisiin käynnistää aikataulun mukaisesti. Tavanomaisesta poikkeavia aikataulupaineita ei ainakaan tutkintalautakunnan saamien tietojen mukaan ollut. Kaikesta päätellen työnjohtajat olivat yhdessä päättäneet avaamisesta ja valmistelivat sitä jonkin

aikaa sulaton valvomossa, josta he lähtivät kohti venttiilihuonetta klo 10.35–10.40. Etukäteen ei ollut päätetty tarkkaa ajankohtaa, milloin venttiili avataan.

Työnjohtajat kävelivät valvomosta luultavasti suoraan venttiilihuoneeseen ja mahdollisesti vilkaisivat matkalla alemmalla tasolla olevien sulkuventtiilien asennon. Tehtaalla ei ollut kirjallista ohjetta, missä järjestyksessä venttiilit avataan, mutta tarkoituksena näyttää olleen avata ensin kolmannen kerroksen venttiilihuoneessa olleet venttiilit ja sen jälkeen, mahdollisesti iltapäivällä, alemmalla tasolla olleet venttiilit. Matka venttiilihuoneeseen vei aikaa korkeintaan noin viisi minuuttia, joten työnjohtajat olivat venttiilihuoneessa noin kymmenen minuuttia ennen onnettomuutta, joka tapahtui klo 10.52. Tehtaan työnjohtaja sai työoveriltaan puhelun noin klo 10.45. Työoveri pyysi työnjohtajaa pitkään jatkuneen tavan mukaisesti kanssaan lounaalle. Työnjohtaja vastasi avaavansa venttiilit ja tulevansa sitten syömään. Vastaus viittaa siihen, että hän uskoi avaamisen sujuvan ilman pahempia viivytyksiä.

Venttiilihuoneessa työnjohtajat nousivat tikkaita muutaman askelman työskentelytasolle, josta pystyi avaamaan sekä raakahappilinjan että happilinjan sulkuventtiilin ja ohitusventtiilin. Raakahappilinja avattiin ensin ja luultavasti paine tasattiin ohitusventtiilin kautta ennen kuin sulkuventtiili avattiin, sillä onnettomuuden jälkeen ohitusventtiili oli auki. Paineen taseus ohitusventtiilin kautta kesti alle minuutin. Raakahappilinjan avattuaan työnjohtajat siirtyivät avaamaan happilinjaa.

Onnettomuuden jälkeen kiinni ollut ohitusventtiili viittaa siihen, että happilinjaa lähdettiin avaamaan suoraan sulkuventtiilistä. On kuitenkin myös mahdollista, että ohitusventtiili avattiin ensin ja suljettiin juuri ennen räjähdystä, kun jotain onnettomuuteen liittyvää alkoi tapahtua, esimerkiksi putki alkoi palaa puhki. Alhaalla sulaton lattian tasolla työmiehen kuulema varo-huuto saattoi liittyä tähän tapahtumaan.

Ohitusventtiilin tietoiseen avaamatta jättämiseen ei olisi pitänyt olla mitään syytä. Avaamalla suoraan sulkuventtiili ei olisi säästännyt aikaa eikä vaivaa, sillä vaivattominta olisi ollut avata ensin ohitusventtiili ja sen jälkeen sulkuventtiili kokonaan. Ohitusventtiili oli hyvin miesten ulottuvilla. Työnjohtajat myös tiesivät, että hapen käsittelyyn liittyy riskejä, joista parhaiten tiedostettiin ilmeisesti happivuoto, hapen adiabaattinen puristuminen ja nopeassa virtauksessa liikkuvien hiukkasten mahdollinen kipinöinti. Suuriläpimittaisilla putkilla paineen tasaaminen ohitusventtiilin kautta ennen varsinaisen sulkuventtiilin avaamista on yleinen suositus.

Edellä luetellut seikat puoltavat sitä, että myös happilinja olisi paineistettu ohitusventtiilin kautta kuten ilmeisesti hetkeä aikaisemmin raakahappilinja. Tätä ei kuitenkaan käytettävissä olevien tietojen perusteella pystytä osoittamaan varmasti. Toisaalta tehtaalla ei ollut ehdotonta ohjeistusta paineen tasaamisesta ohituslinjojen kautta. Tutkimuskeskuksen saaman käsityksen mukaan sulkuventtiileitä saatettiin toisinaan avata sulatossa painetta ensin tasaamatta. Siihen viittaa muun muassa prosessin ohjausjärjestelmässä ollut ohje käsiventtiilien avaamisesta, että ”avaus on suoritettava hitaasti”. Ohitusventtiiliä ei ohjeessa mainittu.

Happilinjan sulkuventtiilin käsipyörää käännettäessä se alkoi todennäköisesti luistaa. Käsipyörän sokkana ollut, mahdollisesti jo aiemmin vaurioitunut ruuvi meni ilmeisesti kokonaan poikki tässä vaiheessa, sillä tutkintalautakunnan saamien tietojen mukaan venttiiliä suljettaessa ei havaittu ongelmia. Tutkinnassa ei kuitenkaan ole selvinnyt, milloin venttiilistä oli irrotettu liikerajoittimen ruuvi. Se oli mahdollista irrottaa vain venttiilin ollessa auki-asennossa, joten sitä ei voitu irrottaa tässä yhteydessä. Liikerajoittimen ruuvien puuttumisella ei kuitenkaan ollut vaikutusta venttiilin syyntymiseen.

Kun sulaton lattian tasolla työskennellyt asentaja soitti alihankkijan työnjohtajalle jotakin neuvoa kysyäkseen, työnjohtaja vastasi kysymykseen ja pyysi samalla asentajaa tuomaan putkipihdit. Työnjohtajat olivat ilmeisesti pohtineet, kuinka venttiili saataisiin avattua, mutta eivät vielä olleet ryhtyneet toimenpiteisiin, esimerkiksi soittamaan ja pyytämään tarvittavia työkaluja. Tehtaalla ei ollut (kirjallisia) ohjeita, kuinka tällaisessa poikkeamatilanteessa olisi pitänyt menetellä.

Asentaja lähti viemään putkipihtejä korkeintaan noin viisi minuuttia ennen onnettomuutta. Tässä vaiheessa työnjohtajat olivat olleet venttiilihuoneessa noin viisi minuuttia. Asentajan tullessa ylös venttiilihuoneeseen muutaman minuutin kestäneen matkan jälkeen työnjohtajat olivat ylhäällä työskentelytasolla valmiina avaamaan venttiilin. Heillä ei ilmeisesti ollut esillä mitään työkaluja. Mikään ei viitannut siihen, että tilanne olisi ollut jollain tavalla poikkeuksellinen.

Asentaja poistui ja työnjohtajat alkoivat sovittaa putkipihtien leukoja sulkuventtiilin käsipyörän akselille poistettuaan ensin käsipyörän. Tässä vaiheessa hitsaaja tuli paikalle. Kun putkipihdit olivat kohdallaan, niillä käännettiin akselia. Ennen onnettomuutta putkipihdeillä ehdittiin putkipihtien jäljistä ja venttiilin asennosta päätellen kiertää akselia 4–5 kertaa eli noin yhden kierroksen. Mahdollisesti toinen työnjohtajista havaitsi esimerkiksi putken tai tiivisteiden olevan palamassa puhki ja huusi ”varo”. Tapahtumien kulusta syntyy selkeästi vaikutelma, että onnettomuus liittyi putkipihdeillä kiertämiseen.

Raakahappilinjan avattu ohitusventtiili ja työnjohtajien tiedot ja kokemus työturvallisuuden liittyvistä asioista puoltavat sitä, että myös happilinjassa avattiin ensin ohitusventtiili. Jos onnettomuusventtiili avattiin painetta tasaamatta, ohitusventtiilin avaamisen on täytynyt jostain syystä unohtua. Se on mahdollisesti voinut unohtua, jos työnjohtajien huomio oli voimakkaasti kiinnittynyt johonkin muuhun asiaan silloin, kun oli tarkoitus avata happilinjan ohitusventtiili. Työnjohtaja sanoi puhelimesta käsipyörän luistavan, mikä viittaa siihen, että sulkuventtiilin käsipyörää oli yritetty kääntää. Oikein toimittaessa ennen tätä olisi ohitusventtiili pitänyt jo avata. Jos ohitusventtiilin avaaminen unohtui alkuvaiheessa, eikä sitä avattu ennen sulkuventtiilin avaamista, työnjohtajat eivät muistaneet asiaa silloinkaan, kun he odottivat putkipihtejä.

Jos ohitusventtiili avattiin ensin tai sulkuventtiiliä oli saatu raotettua ennen käsipyörän sokan katkeamista, paine oli tasaantunut siinä vaiheessa, kun työnjohtajille tuotiin putkipihdit juuttuneen venttiilin avaamista varten.

Happilinjan sulkuventtiilin käsipyörä sijaitsi sillä tavalla putkilinjan takana, että siihen ei aivan helposti päässyt käsiksi. Tämän johdosta on esitetty, että putkipihdeillä akselia

käännettäessä olisi otettu jalalla tukea onnettomuusventtiilin alapuolella olleesta tyhjennysyhteestä, joka olisi vaurioitunut ja aiheuttanut vuodon. Palo on kuitenkin selkeästi alkanut sulkuventtiilistä, joka on pahasti palanut. Jos palo olisi alkanut putkilinjasta irti repeytyneestä tyhjennysyhteestä, palo olisi tuskin päässyt leviämään ylävirran suunnassa olleeseen sulkuventtiiliin ja vauriot tyhjennysyhteestä alavirtaan päin olisivat olleet pahemmat.

Käytettävissä olevien tietojen perusteella ei saatu täyttä varmuutta siitä, tasattiinko paine ennen sulkuventtiilin avaamista vai ei. Ohitusventtiilin avaaminen saattoi unohtua tai paineen tasaaminen ohitusventtiiliin kautta jätettiin tarkoituksella tekemättä ja linja avattiin suoraan sulkuventtiilistä.

3.3 Määräysten, ohjeiden ja viranomaistoiminnan analysointi

Hapen siirtoa ja jakelua koskevaan EIGA:n (European Industrial Gases Association) ohjekirjaan "Oxygen pipeline systems, IGC Doc 13/02/E" on kerätty Länsi-Euroopassa ja Pohjois-Amerikassa yli 40 vuoden aikana kertynyt kokemus hapen turvallisesta käsittelystä ja happijärjestelmien suunnittelusta. Ohjeen tarkoituksena on hapen käsittelyyn liittyvän paloriskin torjunta. Ohjekirjan johdannossa todetaan, että siinä ei anneta pakollisia määräyksiä, vaikka osa ohjeista on kirjoitettu ehdottomaan muotoon asian tärkeyden korostamiseksi. Osa ohjeista taas on kirjoitettu konditionaalissa, koska teollisuudessa voi olla käytössä muitakin turvallisia käytäntöjä kuin kirjassa esitetyt. Ohjekirjasta saa varsin selkeän kuvan happijärjestelmän epäpuhtauksiin ja suuriin virtausnopeuksiin liittyvistä riskeistä. Kirjan tarkoituksena ei ole antaa yksikäsitteisiä suoraan sovellettavia toimintaohjeita teollisuutta varten, vaan niiden laatiminen jää teollisuuslaitoksille itselleen. Tutkintalautakunnan saamien tietojen mukaan sulatolla ei tunnettu EIGA:n ohjeita.

Turvatekniikan keskuksen 2003 julkaisema ohje "Hapen turvallinen käsittely ja varastointi", joka tunnettiin tehtaalla, on hyvä yhteenveto esimerkiksi EIGA:n ohjekirjasta. Turvatekniikan keskuksenkaan ohje ei anna ehdottomia määräyksiä, vaan tuo esiin hyviä käytäntöjä kuten esimerkiksi venttiilin avaamisesta korkeasta paineesta paineettomaan putkeen ohitusventtiiliä käyttäen.

Teollisuudessa laadittavat ohjeet poikkeavat luonteeltaan EIGA:n ja Turvatekniikan keskuksen ohjeista siten, että teollisuuden ohjeet ovat yleensä täsmällisempiä ja ehdottomampia. Esimerkiksi Shell-yhtiön ohjeessa vuodelta 2001 "Gaseous oxygen systems - design and engineering practice", jota tehtaalla ei tunnettu, annetaan ohjeeksi sulku-tyyppisiä venttiileitä avattaessa, että "ne saa avata vain jos venttiilin kummallakin puolella vallitsee sama paine".

Onnettomuusventtiili oli teollisuudessa käytettävä läppämallinen yleisventtiili, jota toimitettiin myös happikäyttöön puhdistettuna. Venttiilin valmistaja ei anna yksityiskohtaisia ohjeita venttiilin eri käyttötarkoituksia varten. Venttiilin turvallisen ja ongelmattoman käytön kannalta ohjeista olisi hyötyä. Ohjeissa voitaisiin ottaa kantaa muun muassa siihen, miten putkistossa liikkuva lika vaikuttaa venttiilin toimintaan ja miten venttiiliä tulisi käyttää. Virtauskokeissa käytetyn venttiilin rikkoutunut laakeripinta viittaa siihen, että

laakerin PTFE-pinnoite ei välttämättä kestä venttiilin käyttöä paine-eron vaikuttaessa läppään.

Tehtaalla kirjalliset ohjeet hapen turvallisesta käsittelystä ja happilinjan käytöstä olivat suppeat. Niistä kävi ilmi sama tärkeä asia kuin Turvatekniikan keskuksenkin ohjeesta eli happilinjan epäpuhtauksien aiheuttama paloriski, kun virtausnopeus on suuri. Ruutuperille kirjoitetut ja piirretyt ohjeet, joiden mukaan happilinja oli ennen pääsulkuventtiilin avaamista paineistettava ohitusventtiilin kautta, olivat pikemminkin muistiinpanoja kuin varsinaisia virallisia ohjeita. Ohjeet oli laadittu vanhan sulatto 1:n happilinjan käyttöä varten. Uutta sulatto 2:ta varten ei tehty erillisiä ohjeita.

Sulatossa hapen turvallinen käsittely perustui kirjallisten ohjeiden sijaan pääasiassa joidenkin henkilöiden asiantuntemukseen ja osaamiseen ja vain heillä olleisiin oikeuksiin esimerkiksi avata happilinjan sulkuventtiileitä. Tehtaan kemikaaleja käsittelevässä turvallisuusoppaassa keskeisimpänä happeen liittyvänä vaaratekijänä pidettiin happijärjestelmän vuotoa.

Tehtaalle puhdasta happea toimitettiin sen omistaman, mutta Polargas Oy:n hoitaman nesteytetyn hapen kaasutusaseman kautta. Asemaa hoiti päivisin Polargas Oy ja tehtaan oma tehdaspalvelu öisin ja viikonloppuisin. Tehdaspalvelun henkilöstölle oli annettu paitsi happiaseman hoitoon liittyvää koulutusta myös hapen käsittelyyn liittyvää turvallisuuskoulutusta. Happiputkiston rakentaminen ja sen huolto- ja korjaustoimenpiteet olivat lähes kokonaan alihankkijoiden vastuulla.

Sulatolle happi oli vain yksi käyttöhyödyke muiden joukossa. Happijärjestelmän sulkuventtiileitä käsiteltiin harvoin ja vain tarvittaessa seisokkien aikana ja mahdollisissa häiriötilanteissa. Niiden käsittely ja ohjeistus oli keskitetty vain muutamalle henkilölle.

Vaarojen selvittämisessä ja arvioimisessa oli tehtaalla käytetty poikkeamatarkastelua. Tässä menetelmässä tarkastellaan ensi sijassa prosessin erilaisten häiriötekijöiden esiintymistä ja ilmenemismuotoja sekä arvioidaan niiden vaikutuksia. Tarkastelun tuloksena todettiin epäpuhtauksien aiheuttama vaara muutosten ja kunnossapidon jälkeen. Seurauksena todettiin putkiston syttyminen sisäpuolelta. Venttiilin rakenteeseen liittyvää vikaantumismahdollisuutta ei ollut tunnistettu riskiksi.

Venttiilin käyttöön liittyviä virhemahdollisuuksia ei poikkeamatarkastelun avulla havaita. Kun halutaan tarkastella esimerkiksi ihmisen virheellisen toiminnan vaikutuksia, on käytettävä muita menetelmiä, kuten esimerkiksi toimintovirheanalyysiä. Siinä tarkastellaan systemaattisesti työn tekemistä ja arvioidaan siinä tehtävien virheiden esiintymistä sekä niiden seurausvaikutuksia. Menetelmän tuloksia käytetään usein työohjeiden laatimiseksi vaativissa työtehtävissä. Toimintovirheanalyysiä ei sulatossa ollut tehty.

Ryhmätyönä tehtävän turvallisuusanalyysin kattavuutta rajoittaa se, että kaikkia riskejä ei pystytä ennakkolta tunnistamaan. Siten analyysissä pystytään käsittelemään vain niitä riskejä, jotka työryhmä tunnistaa.

Tutkintalautakunnalle on syntynyt tehtaan ohjeistuksen ja kuulemisten perusteella käsitys, että paineentasauskäytäntö happilinjojen sulkuventtiileitä avattaessa oli horjuva.

Toisinaan paineistus tehtiin ensin ohituslinjan kautta ja toisinaan avattiin varovasti suoraan pääsulkuventtiili. Prosessin ohjausjärjestelmässä olleen ohjeen mukaan käsiventtiilien avaus oli suoritettava hitaasti. Tässä yhteydessä ei mainita, tarkoitetaanko ohitusventtiiliä vai pääsulkuventtiiliä, mutta varoitetaan kaasun kovasta virtausnopeudesta, jolloin ”kaasun mukana mahdollisesti oleva epäpuhtaus aiheuttaa kipinäointiä”. Sulatto 1:n happiputkeen kiinnitetyn, käsin kirjoitetun ohjeen mukaan ensin oli avattava tasausventtiili ja sitten vasta pääsulkuventtiili. Tässä ohjeessa ei ollut perustelua.

Tutkintalautakunnan tekemät kokeet osoittivat, että onnettomuusventtiilin tyyppinen läp-päventtiili oli mahdollista avata vaikeuksitta 35 baarin painetta vastaan eikä mitään erityistä havaittu. Tällaiset kokemukset olisivat voineet myötävaikuttaa siihen, että linjan paineistaminen aina ensin ohitusventtiilin kautta ei ollut aivan ehdotonta.

Kun onnettomuusventtiiliä avattaessa sitä ei saatu auki käsipyörästä kääntämällä, syntyi erikoistilanne. Toimintaohjeita erikoistilanteiden kuten esimerkiksi venttiilien juuttumisen tai muiden toimintahäiriöiden varalle ei ollut eikä edellä mainituissa EIGA:n ja TUKESin ohjeissa asiaa käsitellä. Sinänsä tilanne ei ilmeisesti ollut uusi, vaan aikaisemminkin venttiilien avaamisessa oli ollut ongelmia. Tilannetta ei ymmärretty vaaralliseksi eikä sellaiseksi, että se olisi edellyttänyt riskien arviointia ja toimenpiteitä turvallisuuden varmistamiseksi.

Toiminnassa onnettomuustilanteessa on havaittavissa piirteitä tiedostamattomasta riskinotokulttuurista, jonka syntyyn on voinut myötävaikuttaa puutteellinen ohjeistus. Tehtaalla tehdyssä turvallisuustoiminnan tason arvioinnissa voitiin tunnistaa samankaltaista riskinotokulttuuria tuotannon turvaamiseksi. Onnettomuusventtiiliä avattaessa aikataulupaineita ei ilmeisesti ollut, sillä seisokkityöt olivat pysyneet aikataulussa. Onnettomuuden jälkeen tehtaalla on merkittävästi parannettu ohjeistusta.

Turvatekniikan keskuksen päätöksessä 17.5.2002 annetaan AvestaPolarit Stainless Oy:lle lupa laajentaa toimintaansa Torniossa terässulatossa. Päätöksen ehdossa muun muassa edellytetään, että häkäkaasun ja hapen käsittelystä ja varastoinnista laaditaan käyttö- ja huolto-ohje. Lisäksi ehtona oli, että työntekijöille annetaan koulutusta ja opastusta, miten toimia mahdollisissa vaaratilanteissa. Käyttönottotarkastuksesta 19.9.2002 laaditussa pöytäkirjassa käytiin lävitse päätöksen ehtojen toteutuminen.

Päätöksen kolme ensimmäistä ehtoa, jotka koskivat konkreettisia toimenpiteitä, oli toteutettu. Neljännessä ja viidennessä kohdassa vaadittujen opastuksen ja koulutuksen todettiin olevan vielä kesken. Tässä yhteydessä todettiin myös uuden terässulaton olevan samanlainen kuin vanha ja että ”terässulaton henkilökunta on saanut yleiskoulutusta ja aikoinaan vanhan systeemin täsmäkoulutusta”. Tarkastuskertomuksessa jää auki, mitä opastuksen ja koulutuksen osalta on vielä tehtävä. Tehtaan ilmoituksen mukaan sulatto oli vielä koekäytössä ja yksityiskohtaisen koulutusohjelman laatiminen olisi ollut vaikeaa.

3.4 Pelastustoiminnan analysointi

Happipalo sammui itsestään, mutta se sytytti kaapeleita ja kattorakenteita, joiden sammutustyö onnistui hyvin ja kesti noin tunnin. Tulipalo ei levinnyt laajemmalle, koska toiminta käynnistyi nopeasti ja palo-osastoinnit olivat toimivat. Muun muassa palaneen happilinjän vieressä olleet raakahappilinja ja nestekaasulinja säilyivät ehjinä. Sammutustyötä edesauttoi lähistöllä harjoitelleen tehtaan sammutusryhmän nopea tulo paikalle ja heidän aloittamansa kattoon suunnattu vesitykkisammutus hallin lattialta.

Pelastustoiminta käynnistettiin oletetun kaapelipalon sammuttamiseksi. Palon aikana palokunnalla ei ollut tietoa siitä, että kysymyksessä on happipalo. Myöskään onnettomuuspaikalla ei ollut nähtävissä, minkä aineen vuodosta ja palosta oli kyse. Kaasuasemalla happivuoto havaittiin pian onnettomuuden jälkeen, mutta tieto ei välittynyt palokunnalle. Myöhemmin käytyjen keskustelujen pohjalta kaupungin palopäällikkö ei olisi lähettänyt palomiehiä savusukellustehtäviin onnettomuuskohteeseen eikä sen välittömään läheisyyteen, jos hän olisi tiennyt tulipalon happipaloksi.

Palokunnan radiopuhelinyhteydet eivät toimineet tehdasalueella olevien katvealueiden takia kunnolla. Palopäällikkö joutui antamaan toimintaohjeita operatiiviselle henkilöstölle siten, että joku miehistön jäsenistä kävi suullisesti viemässä viestiä kohdehenkilöille ja takaisin. Siitä johtuen palopäälliköllä ei aina ollut selkeätä kuvaa siitä, missä miehistö kulloinkin oli ja mikä oli tulipalon tilanne. VIRVE⁶-verkonkaan käyttöönotto ei kokonaan poista yhteysongelmia, mutta sen avulla pelastusviranomaiset ja poliisi voivat operoida yhteisessä radiopuhelinverkossa keskenään. Pelastustoimen viestiyhteyksiä voidaan parantaa sijoittamalla VIRVE-verkon tukiasemia tehtaan alueelle.

Lapin hätäkeskukseen tuli useita puhelinsoittoja eri tiedotusvälineiden edustajilta koskien onnettomuutta. Hätäkeskuksen tehtävänä oli järjestää onnettomuuskohteeseen alkuvaiheessa saatujen tietojen perusteella useita sairaankuljetusyksiköitä eri kuntien alueilta ja se johti useisiin puhelinkeskusteluihin sairaankuljetushenkilöstöjen kanssa. Tehtävää hidasti osittain juuri se, että samaan aikaan hätäkeskukseen soitettiin useita tiedustelupuheluita.

Valtion hätäkeskuksiin on kehitteillä sähköiseen tiedonsiirtoon perustuva järjestelmä, jolla suurta mielenkiintoa herättävien onnettomuuksien ja tapahtumien tiedotus julkisuuteen pystytään järjestämään häiritsemättä hälytyspäivystäjien ensisijaista työskentelyä.

⁶ VIRVE = Viranomaisradioverkko, jossa useat eri viranomaiset voivat keskustella samassa radiopuhelinverkossa keskenään.

4 JOHTOPÄÄTÖKSET

4.1 Toteamukset

1. Torniossa ruostumatonta terästä valmistavan terästehtaan sulatto 2:ssa sattui 19.9.2003 räjähdysmäinen tulipalo, jossa kuoli kolme tehtaalla työskennellyttä henkilöä. Lisäksi aineelliset vahingot tuotannon menetyksineen olivat suuret.
2. Sulatto 2 oli otettu käyttöön vuonna 2002 ja tehtaalla oli edelleen käynnissä mittava vaiheittain etenevä tuotannon laajentamisprojekti. Onnettomuuden aikaan oli meillä sulatto 2:n ensimmäinen vuosihuoltoseisokki. Seisokki oli päättymässä ja happijärjestelmää alettiin ottaa jälleen käyttöön.
3. Tehtaan ja tehtaan alihankkijan työnjohtaja päättivät mennä avaamaan raakahappilinjan ja happilinjan käsikäyttöisiä pääsulkuventtiileitä sulatto 2:n kolmannen kerroksen venttiilihuoneeseen. Raakahappilinjan venttiilin avaus sujui ongelmitta, mutta happilinjan pääsulkuventtiiliä avattaessa se syttyi räjähdysmäisesti palamaan ja korkeasta paineesta purkautuva happi piti suurta, voimakasta metallipaloa yllä noin 10 minuutin ajan.
4. Lähistöllä harjoitelleet tehtaan sammutusryhmät tulivat paikalle nopeasti. Kaupungin palolaitoksen yksiköitä tuli paikalle noin 15 minuutin kuluttua onnettomuudesta. Pelastushenkilöstö alkoi rajoittaa tulipaloa vesitykeillä ja sai kaapeleihin ja katolle levinneen tulipalon hallintaan noin tunnissa.
5. Jo sammutustoiminnan aloittamisen aikaan tehtaan henkilöstöön kuuluvat sulkiivat happilinjan venttiileitä siten, että hapen vuoto onnettomuusventtiilistä lakkasi.
6. Onnettomuusventtiili oli halkaisijaltaan 300 mm:n putkessa, jossa oli 35 baarin paineeseen puristettua happea. Happi aiheuttaa syttymisvaaraa ja palo on kiivas ja vaikeasti sammutettavissa. Hapessa palavat myös ilmassa vaikeasti syttyvät ja palamattomat materiaalit kuten esimerkiksi teräs sekä tiiviste- ja laakerimateriaalina käytetty PTFE.
7. Palojälkien perusteella palo alkoi happilinjan pääsulkuventtiilistä, joka oli tyypiltään läppäventtiili. Venttiilin suljinosa oli akselin ympäri kääntyvä läppä, jota käytettiin vaihteen kautta käsipyörällä. Venttiilin nimellishalkaisija oli 300 mm.
8. Venttiilin avaamisessa oli ollut ongelmia, koska työnjohtajat olivat pyytäneet paikalle putkipihdit käsipyörän luistamisen vuoksi. Venttiilin käsipyörään kuuluvan putkisokan tilalla oli ruuvi, jonka onnettomuuden jälkeen havaittiin olevan poikki. Onnettomuuden jälkeen ei etsinnöistä huolimatta löydetty käsipyörää. Se ilmeisesti paloi tulipalossa.
9. Onnettomuusventtiili oli varustettu läpän liikerajoittimella. Liikerajoittimen kiinnitysruuvi puuttui, mutta selitystä tälle ei ole tiedossa. Tämä mahdollisesti viittaa aikai-

sempiin ongelmiin kyseisessä venttiilissä. Puute ei vaikuttanut läpän liikkeen ääri-asentoihin, koska vaihteessa oli säädettävät liikerajoittimet. Edellisenä vuonna uutena asennettua venttiiliä ei ollut sulaton käyttöönoton jälkeen todennäköisesti suljettu kertaakaan aiemmin.

10. Onnettomuusventtiilin kohdalla oli ohituslinja, jonka avulla oli tarkoitus ennen pääsulkuventtiilin avaamista tasata paine samaksi venttiilin molemmilla puolilla. Onnettomuuden jälkeen todettiin, että hetkeä ennen onnettomuutta avatun raakahappilinjän ohituslinjan venttiili oli auki, mutta onnettomuusventtiilin ohituslinjan venttiili oli kiinni, vaikkakaan ei aivan ääriasennossaan. Onnettomuusventtiilin vaihteen osoittimesta nähtiin, että läppä oli ollut raollaan.
11. Onnettomuusventtiilin juuttuminen todennäköisesti liittyy epäpuhtauksien tai vieraiden esineiden joutumiseen venttiiliin. Juuttuminen on voinut tapahtua jonkin vieraan esineen jouduttua venttiilin läpän ja rungon tiivistepinnan väliin. Toinen vaihtoehto on läpän vapaan akselin liukulaakeroinnin vaurioituminen ja sitä seurannut metalliosien kiinnileikkautuminen.
12. Ohituslinjan käyttöä ennen pääventtiilin avaamista suositellaan useissa yleisissä ohjeissa, jotta putkistopalon syttyminen nopeasti puristuvan hapen kuumenemisen tai hiukkasten törmäyksen seurauksena olisi epätodennäköistä. Tutkinnassa ei saatu varmuutta siitä, avasivatko työnjohtajat ohituslinjan venttiilin ennen onnettomuusventtiiliä.
13. Työnjohtajat todennäköisesti tiesivät ohitusventtiilin avaamisen merkityksen. Ohitusventtiili oli hyvin käsillä ja sen kautta paine olisi tasaantunut alle minuutissa. Pääsulkuventtiilin tarkoituksellinen avaaminen painetta ensin tasaamatta on epätodennäköistä, mutta epähuomiossa mahdollista.
14. Tutkintalautakunnan teettämän kirjallisuustutkimuksen perusteella on tarkasteltu kymmentä syttymissyötä, joista tutkinnan perusteella mahdollisia tässä tapauksessa näyttäisivät olevan vain hankauskitka ja hiukkasten törmäys.
15. Hankauskitka voi paikallisesti kuumentaa toistensa suhteen liikkuvien teräskappaleiden pinnat jopa sulamislämpötilaan. Kuumenemisen edellytyksenä on pintojen voimakas hankautuminen toisiaan vasten eli suuri kitkavoima. Hankauskitkaa voi aiheuttaa vieraan kappaleen kiilautuminen läpän ja venttiilin rungon väliin tai hankaus läpän akselin liukulaakereissa PTFE-liukupinnan vaurioituttua.
16. Hiukkastörmäyksessä yli 50 m/s:n nopeudella kulkevat metallihiukkaset voivat syttyä törmätessään esimerkiksi venttiilin osiin tai putkiston seinämiin ja sytyttää edelleen tiivistemateriaalin tai teräksen palamaan hapessa. Osittain avatun venttiilin raossa syntyy riittävän nopea virtaus, jos painetta ei ensin tasata ohituslinjan kautta.
17. Syttymissyynä hiukkastörmäys edellyttää, että venttiili oli avattu tasaamatta ensin painetta ohituslinjan kautta. Myös syttymiseen riittävä hankaus läpän laakeroinnissa edellyttää venttiilin avaamista painetta vasten. Sen sijaan jonkin vieraan kappaleen

kiillautuminen venttiiliin voisi aiheuttaa syttymisen hankauskitkan vuoksi myös paineen tasaamisen jälkeen.

18. Venttiilin juuttumiseen liittyvä syttyminen voi tapahtua toisiinsa juuttuneiden metalliosien tai kiillautuneiden vieraiden kappaleiden irrotessa äkillisesti. Näin voi tapahtua, jos kiillautuneen kappaleen irrotessa lähtee liikkeelle hiukkasia. Ne voivat kuuminä sytyttää PTFE-tiivisteen tai kuumentua törmätessään teräsosiin.
19. Juuttuneen venttiilin äkillinen avautuminen oli mahdollista, koska venttiilin vaihde oli rakenteeltaan itsepidättävä. Käsipyörän akselia voitiin kiertää ilman, että se kiertyi välillä takaisin. Avaajalle saattoi silloin syntyä vaikutelma, että venttiili avautui vaikka läppä oli vielä kiinni.
20. Onnettomuuteen ovat mahdollisesti myötävaikuttaneet tutkinnassa havaittu riskinotto-kulttuuri tehtaalla, puutteelliset ohjeistukset ja etenkin määrittelemättömät toimintatavat kaasujen käsittelyyn liittyvissä poikkeamatilanteissa, esimerkiksi silloin, kun venttiili ei aukea käsipyörästä kääntämällä. Onnettomuuden jälkeen turvallisuustoimintaa ja ohjeistusta on parannettu.

4.2 Onnettomuuden syyt

Tutinnan perusteella syttyminen voidaan selittää kolmella eri tavalla, joista yksi perustuu hiukkastörmäykseen ja kaksi kitkakuumenemiseen.

Ensimmäinen vaihtoehto on hiukkastörmäys, jossa happivirtauksen mukana suurella nopeudella kulkeneet hiukkaset törmäsivät venttiilin runkoon, läppään tai metallitiivisteseen, kuumentuvat ja joko sytyttivät teräksen välittömästi tai välillisesti siten että ensin syttyi PTFE-tiiviste. Tutkinnassa havaittiin, että putkistossa oli puhdistustoimenpiteistä huolimatta epäpuhtauksia, jotka voivat syttyä törmäyksessä. Hiukkastörmäys edellyttää, että sulkuventtiili avattiin painetta vasten eli niin, että sen ohitusventtiiliä ei avattu ensin. Muussa tapauksessa venttiiliin ei synny syttymiseen tarvittavaa virtausnopeutta.

Toinen vaihtoehto on kitkakuumeneminen, palojälkien perusteella, venttiilin läpän vapaan akselin laakeroinnissa siten, että PTFE-liukulaakerointi olisi vaurioitunut ja kyseiseen kohtaan olisi syntynyt kahden teräksen välinen kova kosketus tai tartunta. Teräsosat olisivat paikallisesti kuumentuneet jopa sulamislämpötilaansa, saaneet PTFE-jäänteet tai mahdollisesti laakerointiin joutuneet syttymiskelpoiset epäpuhtaudet kytymään ja edelleen teräsosat syttymään hapessa. PTFE-pinnan rikkoutumisen osoittaa mahdolliseksi tutkinnan yhteydessä havaittu vastaavan venttiilin vapaan akselin laakerivaurio. Lisäksi tehtaalla useiden muiden venttiilien laakeroinneissa on havaittu merkittäviä vaurioita. Onnettomuusputkisto oli tosin rakennettu vasta vuotta aikaisemmin ja venttiiliä oli käytetty varsin vähän. Jotta kitkakuumenemiseen tarvittava kitkavoima voisi olla riittävä, venttiili olisi pitänyt avata painetta vasten. Laakerin likaantuminen ja vaurioituminen selittäisivät myös venttiilin juuttumisen. Laakeroinnin rikkoutumista, tartuntaa ja kitkakuumenemista olisi edistänyt se, että laakerointiin kohdistui hyvin suuri pintapaine venttiilin mitoituksen vuoksi.

Kolmas mahdollinen syttymismekanismi on vieraan kappaleen kiilautuminen, suurimman palovaurion sijainnin perusteella, venttiilin vapaan akselin lähelle ja siitä venttiiliä avattaessa seurannut kitkakuumeneminen. Vierias kappale selittäisi myös venttiilin juuttumisen. Vierias kappale tai sen hankauspari olisi voinut kuumentua paikallisesti jopa teräksen sulamislämpötilaan ja sytyttää tiivistemateriaalin ja teräksen palamaan hapessa. Tämä syttymismekanismi on mahdollinen vaikka paine olisikin tasattu ohitusventtiilin kautta. On myös mahdollista, että kiilautuneesta kappaleesta olisi venttiiliä avattaessa irronnut hiukkasia, jotka olisivat sytyttäneet tiivistemateriaalin tai törmätessään jopa suoraan teräksen.

Kaikki edellä esitetyt välittömät syttymisvaihtoehdot ovat mahdollisia. Seuraavassa on arvioitu eri vaihtoehtojen todennäköisyyttä.

- Tutkintalautakunnan arvion mukaan on oletettavaa, että syttyminen ja siten onnettomuus olisi liittynyt venttiilin juuttumiseen.
- Hiukkastörmäys ei liity venttiilin juuttumiseen, joten se ei ole tässä tapauksessa kovin todennäköinen syttymisen syy. Se on kuitenkin yleisin kirjallisuudessa esitetty happiputkistojen syttymissy.
- Vaurio läpän laakeroinnissa on tutkintalautakunnan havaintojen mukaan selvästi mahdollista laakerin likaantumisen, rakenteen ja suuren pintapaineen vuoksi. Palon syttyminen vaurion seurauksena edellyttää kuitenkin melko monta yhteensattumaa, jotka pienentävät kyseisen syttymissyyn todennäköisyyttä. Laakeripesien läheisyydessä oli alkutilanteessa ilmaa. Happipitoisuuden nousu korkeaksi laakerin vieressä kesti venttiilin raottumisen jälkeenkin joitakin sekunteja. Pienten välysten vuoksi myös ilmaa oli laakeripesissä hyvin vähän. Jonkin epäpuhtauden tai PTFE-materiaalin, joka palaa huonosti ilmassa, pitäisi kuitenkin kyetä syttymään kitkakuumenemisessa ja edelleen kytemään ilmassa jonkin aikaa. Lisäksi laakeriholkin tulisi juuttumistilanteessa olla kiinni venttiilin rungossa niin lujasti, ettei se alkaisi pyöriä.
- Vieraan kappaleen kiilautuminen pystysuorassa putkenosassa olevaan venttiiliin ei ole tutkintalautakunnan käsityksen mukaan kovin todennäköistä, mutta muissa tehtaassa venttiileissä havaitut vauriot selvästi osoittavat sen mahdolliseksi. Lisäksi on tiedossa, että putkistossa liikkui epäpuhtauksia. Jos jokin kappale kiilautuu läpän ja venttiilin rungon väliin, syttymisen edellytykset ovat olemassa. Hankauskitka riittää aiheuttamaan kuumenemisen ja paloa edistävää virtaavaa happea on kyseisessä kohdassa välittömästi. Lisäksi on mahdollista, että kiilautunutta läppää avattaessa juuttuneesta kohdasta irtoaa kuumia hiukkasia, jotka myös voivat aiheuttaa syttymisen.

Kitkakuumenemista olisi edesauttanut se, että venttiilin vaihde oli itsepidättävä. Juuttuneen venttiilin kara-akseliin saattoi siten varastoitua jousienergiaa, kun käsipyörän akselia käännettiin. Energia vapautui yhdellä kertaa juuttumisen irrotessa, jolloin liike hankauskohdassa oli pidempi ja nopeampi kuin normaalissa avaamisessa.



Taustatekijänä onnettomuudessa olivat mahdollisesti puutteet tehtaan toimintatavoissa. Toimintatapoja ei ollut vakioitu ja ohjeistettu riittävästi eikä varsinkaan poikkeustilanteisiin kuten esimerkiksi venttiilin juuttumiseen ollut ohjeistuksissa varauduttu.

5 SUOSITUKSET

Turvallisuudesta huolehtiminen kuuluu yritykselle itselleen. Viranomaisten tehtävänä on lähinnä pyrkiä varmistumaan siitä, että yrityksissä ymmärretään omat velvollisuudet ja turvallisuusasioista huolehditaan asianmukaisella tavalla. Lainsäädännön tarkoituksena on asettaa minimivaatimustasoja, joita noudattamalla toiminnan voidaan katsoa olevan turvallisuusvaatimukset täyttävää. Yritysten pitää itse määrittää keinot, joilla asetettu vaatimustaso saavutetaan, tunnistaa toimintaan liittyvät riskit ja estää aktiivisesti ja järjestelmällisesti niitä toteutumasta.

Oheiset turvallisuussuositukset kohdistuvat osin viranomaisille, koska onnettomuustutkintaselostuksella ei ole mahdollisuutta edes kertaluontoisesti tavoittaa kaikkia tietoja tarvitsevia. Viranomaisilla on parhaat mahdollisuudet edistää yritysten turvallisia toimintatapoja ohjeistuksellaan, opastuksellaan ja välittämällä tietoa sekä muilla kullekin toimialalle sopivilla tavoilla.

Vaarallisten työtehtävien toimintaohjeet

Työsuojeluviranomaisten ja Turvatekniikan keskuksen tulisi valvoa, että yritykset tunnustavat vaaralliset työtehtävät ja laativat yksityiskohtaiset ja ehdottomat ohjeet, kuinka niissä menetellään. [B5/03Y/S1]

Onnettomuuden jälkeen tehtaalla on tehty tällaisia ohjeita esimerkiksi happilinjan venttiilien avaamista varten.

Toimintaohjeet häiriö-, vika- ja poikkeamatilanteissa

Onnettomuustilanteessa pääsulkuventtiilin juuttuminen ja sokan katkeaminen estivät avaamasta venttiiliä normaalisti käsipyörästä kääntämällä. Koska käsipyörä luisti, työnohjohtajat pyysivät tuomaan putkipihdit. Saatuaan pihdit he alkoivat avata venttiiliä käsipyörän akselista kääntämällä.

Outokumpu Stainless Oy:n tulisi määritellä erilaiset, mahdollisesti vaaralliset häiriö-, vika- ja poikkeamatilanteet ja laatia yksityiskohtaiset toimintaohjeet, kuinka näissä tilanteissa menetellään. Kun tällaisia tilanteita esiintyy, ne tulisi kirjata. [B5/03Y/S2]

Korkeapaineisen happilinjan pääsulkuventtiilin juuttuminen on vikatilanne, joka olisi ratkaistava ennalta suunnitellun menettelyn mukaisesti. Esimerkiksi käsipyörän sokan katkeaminen on vikatilanne, joka tulisi kirjata.

Vastaavanlaista menettelyä edellyttäviä vikatilanteita on varmasti muitakin ja niitä on myös muussa teollisuudessa.

Turvatekniikan keskuksen tulisi vaatia, että sen valvomat laitokset määrittelevät erilaiset mahdollisesti vaaralliset häiriö-, vika- ja poikkeamatilanteet ja laativat yksityiskohtaiset toimintaohjeet, kuinka näissä tilanteissa menetellään. [B5/03Y/S3]

Outokumpu Stainless Oy:n pitäisi ottaa käyttöön kirjanpito, johon merkitään turvallisuuden kannalta kriittiset toimenpiteet ja tapahtumat kuten vaarallisten kaasujen pääsulkuventtiilien avaaminen, sulkeminen ja toiminta.

Ohjeet venttiilien valitsemiseksi

Eri materiaalien soveltuvuudesta happikäyttöön on olemassa yleistä tietoa, mutta venttiilit on suunniteltu yleensä kaasuille sopiviksi. Happikäyttöön meneville venttiileille tehdään erityinen puhdistus, niin sanottu happipesu ja ne toimitetaan käyttäjälle ilmatiiviisti pakattuina.

Kauppa- ja teollisuusministeriön tulisi huolehtia, että EU:n painelaitesäädöksissä vaadittaisiin venttiilivalmistajia laatimaan ohjeet venttiilien soveltuvuudesta eri kaasuille. Ohjeissa tulee ottaa huomioon muun muassa olosuhteet ja käyttötarkoitus. [B5/03Y/S4]

Ohjeiden avulla venttiilin käyttäjä voisi todeta, mikä venttiili parhaiten sopii suunniteltuun käyttötarkoitukseen ja mitä seikkoja putkistoa suunniteltaessa ja venttiiliä käytettäessä tulee ottaa huomioon.

Vastaava tarkastelu ja ohjeistus kuin uutta venttiiliä suunniteltaessa olisi myös tehtävä, kun venttiilin käyttöparametreja kuten esimerkiksi nimellispainetta muutetaan.

Happilinjan puhdistussuunnitelma

Venttiilien asennus tulee tehdä valmistajan ohjeiden mukaisesti ja putkilinjan riittävästä puhtaudesta pitää varmistua huolellisesti. Venttiilien ja putkiston suunnittelussa tulee kuitenkin huomioida, että putkisto ei käytännössä voi olla absoluuttisen puhdas. Tässäkin tapauksessa putkistossa havaittiin puhdistustoimenpiteistä huolimatta likaa.

Turvatekniikan keskuksen tulisi huolehtia, että happilinjoja rakennettaessa ja muutostöitä tehtäessä yritykset laativat puhdistussuunnitelman ja ohjeet puhtauden tarkastamista varten. [B5/03Y/S5]

Jos muilla tavoin ei pystytä varmistumaan pääsulkuventtiilien turvallisesta avaamisesta ja sulkemisesta, niiden tulisi olla kaukokäyttöisiä tai käsin avattavissa turvallisesta paikasta.

Venttiilien huoltosuunnitelma

Onnettomuusventtiili oli uusi ja sitä oli avattu ja suljettu vain muutamia kertoja, joten venttiilin onnettomuutta edeltäneellä kunnossapidolla ei ollut vaikutusta onnettomuuteen. Tehtaalla on kuitenkin havaittu useita muita venttiilien vauriotapauksia, joita ennakoivuudella olisi voitu välttää.

Turvatekniikan keskuksen tulisi huolehtia, että yritykset sisällyttäisivät vaarallisiin toimintoihin liittyvät venttiilit ennakkohuoltojärjestelmiinsä. [B5/03Y/S6]



Ennakkohuoltojärjestelmään kuuluville venttiileille laadittaisiin vaihto- ja huoltosuunnitelma, jonka perusteella kyseisten osien kunto sekä huolto- ja vaihtotarve olisi tiedossa jo ennen komponenttien vikaantumista.



6 TOTEUTETUT TOIMENPITEET

Onnettomuuden jälkeen Outokumpu Stainless Oy:ssä on aloitettu ja osittain jo toteutettu merkittäviä toimenpiteitä turvallisuuden parantamiseksi. Koko Outokumpu-konsernin tasolla asetettiin 1999 strategiseksi tavoitteeksi yleisen turvallisuuden parantaminen ja aloitettiin asiaa koskeva kampanja. Tavoitteeksi asetettiin puolittaa tapaturmataajuus viidessä vuodessa. Lisäksi yhtiö toteutti laajan työturvallisuuskampanjan vuonna 2000. Tornion tehtaalla tapaturmataajuuden pieneneminen pysähtyi 2002, jolloin tehtiin uusi toimenpideohjelma yhdessä henkilöstön kanssa. Suunnitelmaa täydennettiin seuraavana vuonna ja toimenpideohjelma uusittiin jälleen onnettomuuden jälkeen. Vuoden 2005 alussa turvallisuusjohtamisjärjestelmä sisälsi yli 1 000 dokumenttia.

Onnettomuuden jälkeen tehtiin koko Outokumpu Stainless Oy:n työturvallisuutta koskeva tilanekartoitus kemikaalialan yrityksen Dupont Ltd:n asiantuntijoiden johdolla. Tilanekartoituksen perusteella asetettiin tavoitteeksi, että tapaturmataajuus on pienempi kuin 4 tapaturmaa miljoonaa työtuntia kohden vuoteen 2009 mennessä. Vuonna 2004 tehtaan tapaturmataajuus oli 27. Työturvallisuuden parantaminen nimettiin strategiseksi kärkihankkeeksi.

Läheltä piti -tilanteiden raportointiin ja analysointiin on kiinnitetty erityistä huomiota tavoitteena asenteiden ja turvallisuuskulttuurin muuttaminen. Raportoituja läheltä piti -tapauksia on jo nyt paljon enemmän kuin aikaisemmin. Tapaukset käydään lävitse kaikkien asianosaisten kesken johtajasta työntekijään. Asianomainen johtaja esittelee tapauksen tehtaan johtoryhmässä.

Tehtaan tuotantotiloissa on aloitettu työturvallisuutta koskevat havainnointikierrokset, joita johdon-, tuotannon- ja kunnossapidon toimihenkilöt tekevät vuonna 2005 vähintään kuusi. Yhdellä kierroksella käydään lävitse pienehkö alue ja havainnoista laaditaan pöytäkirja. Tehtaässä muutoksia esimerkiksi prosessin hallintaan, asiasta täytetään tarkoitusta varten laadittu kaavake. Yksityiskohtaisia kirjallisia toimintaohjeita on laadittu lisää, esimerkiksi happilinjan käyttöön otosta seisokin jälkeen. Toisaalta runsasta ohjeistusta on yksinkertaistettu ja yhdenmukaistettu. Harvoin tehtäviä toimenpiteitä ennen on päätetty pitää suunnittelupalaveri.

Onnettomuuden jälkeen molempien sulattolinjojen happiputkistoja on muutettu huomattavasti turvallisuuden parantamiseksi. Samalla on järjestelmästä jätetty raakahappi kokonaan pois. Hapen runkolinjan paine on pudotettu 28 baariin ja linjaa on supistettu linjasulun ja painelukitun venttiilin osalta siten, että niiden halkaisija on nyt 150 mm. Paineistuslinjoihin on asennettu kauko-ohjatut magneettiventtiilit, joiden avulla paineen taso voidaan tehdä ohjaamosta käsin. Toimilaitteventtiilin ympärillä on jatkovarrella varustetut käsiventtiilit, jotka avataan suojaseinän takaa. Linjan paineistus tapahtuu ensin tyypeä käyttäen. Vasta sen jälkeen avataan ohitusventtiili ja lopuksi sulkuventtiili. Viimeiseksi vielä venttiilin avaus kuitataan tehdyksi. Avaamisesta on laadittu venttiilikohtaiset ohjeet.

Kun onnettomuuden jälkeen uusittu happilinja oli valmis, se puhallettiin tyellä puhtaaksi. Yhteensä tehtiin 12 puhallusta, joista kahdella viimeisellä kerralla ei putkesta enää tullut ulos epäpuhtauksia. Putkien puhdistusta varten on laadittu puhdistus- ja huuhteluopas. Kaikista pesuista vaaditaan valmistajalta dokumentti ja valvotaan, että puhdistus tehdään.

Aina seisokin jälkeen linjan käyttöönottovaiheessa käydään lävitse toimintaohjeet ja sovitaan vastuuhenkilöt. Vaiheittain tapahtuvan käyttöönoton aikana edellinen vaihe kuittataan allekirjoituksella tehdyksi ennen seuraavan vaiheen aloitusta. Runkoputkiston osalta on laadittu toimintaohje, joka perustuu VTT:n kanssa tehtyyn riskinarviointiin toimintavirheanalyysia käyttäen. Toimintaohjeen liitteenä on tarkistuslista. Toimintaohjetta testattiin seisokissa syksyllä 2004.

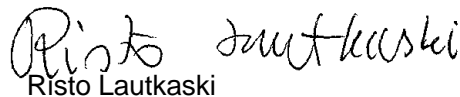
Lisäksi putkilinjojen merkintöjä on parannettu. Venttiilien viereen on kiinnitetty ohjeistustauluja. Neljä venttiilihuonetta on lukittu ja niiden ulkopuolelle on asennettu merkkivalot, jotka osoittavat normaalin tai normaalista poikkeavan happipitoisuuden.

Helsingissä 6.6.2005


Tuomo Karppinen


Hannu Alén


Jari Hämäläinen


Risto Lautkaski


Anssi Parviainen

LÄHDELUETTELO

Seuraavat lähteet on taltioituina Onnettomuustutkintakeskuksessa:

1. Päätös tutkinnan aloittamisesta 22.9.2003, B 5/2003 Y.
2. European Industrial Gases Association (EIGA):
 - Clening of Equipment for Oxygen Service, Guideline Doc 33/97/E
 - Oxygen Pipeline Systems, IGC Doc 13/02/E
 - Fire Hazards of Oxygen and Oxygen Enriched Atmospheres, IGC Doc 04/00/E
 - Incident/Accident Investigation and Analysis, IGC Doc 90/03/E.
3. Turvatekniikan keskus, Tukes-oppaat
 - Hapen turvallinen käsittely ja varastointi, huhtikuu 2003
 - Painelaitteet.
4. Painelaitedirektiivi 97/23/EY ja Painelaitelaki 27.8.1999/869.
5. Sosiaali- ja terveysministeriö, Työsuojeluosasto, Työsuojeluoppaita ja -ohjeita 20, Vaaralliset kemikaalit, Tampere 2003.
6. Työterveyslaitos, Onnettomuuden vaaraa aiheuttavat aineet (OVA-ohjeet), Happi.
7. Onnettomuusventtiilin teknisiä tietoja.
8. Massavirtamittarin teknisiä tietoja.
9. AvestaPolarit Stainless Oy, sulaton laajennuksessa käytetyt kaasujohtojen rasvanpoistopesuaineet, 7.10.2003.
10. Turvatekniikan keskus, Onnettomuustutkintaraportti Dnro 4434/06/2003, AvestaPolarit Stainless Oy:n Tornion terästehtaan sulatolla 19.9.2003 sattunut kolmen työntekijän hengen vaatinut happilinjan tulipalo.
11. Pohjois-Suomen työsuojelupiiri, tapaturmaselostus liittyen pöytäkirjaan nro 393/2003, 2.1.2004
12. Lapin Pelastuslaitoksen kooste, Outokumpu Polarit Oy / Project Double H rakennuslupakäsittelyn vaiheet.
13. Turvatekniikan keskuksen asiakirjat:
 - tiedonvälitys valvontakäynnistä, 23.4.2002
 - lupa terässulaton toisen sulatuslinjan rakentamiseen, 17.5.2002
 - käyttöönottotarkastuskertomus, 19.9.2002
 - kirje tarkastuksessa todettujen puutteiden korjaamiseksi, 19.9.2002 ja AvestaPolarit Stainless Oy:n vastaus, 9.1.2003.
14. AvestaPolarit Stainless Oy, tulosteet tehtaan prosessiautomaatiojärjestelmästä onnettomuuden jälkeen.
15. AvestaPolarit Stainless Oy, onnettomuuspaikan läheisyyteen 19.9.2003 myönnetty tulityöluupa.

16. AvestaPolarit Stainless Oy, muistio kattilalaitoksen valvomosta tehdystä toimenpiteistä onnettomuuden rajaamiseksi, 20.9.2003.
17. AvestaPolarit Stainless Oy, muistio hapen runkolinjojen käyttöönotosta onnettomuuden jälkeen, 20.9.2003.
18. AvestaPolarit Stainless Oy, tuloste sulaton automaatiojärjestelmän ohjeesta venttiilihuoneen käsiventtiilien avauksesta 13.6.1995 sekä ohje raakahappilinjan sulkemisesta ja nestehappilinjan avaamisesta.
19. AvestaPolarit Stainless Oy, muistio työsuojelutoimenpiteistä sopimisesta Terässulatolla, 10.10.2003.
20. Happiputkistoihin liittyviä tarkastuspöytäkirjoja 1.11.2001, 13.11.2001, 4.6.2002 ja 19.5.2003.
21. Muistiot sulattolinjan 2 seisokkipalaverista 18.9.2003 ja happilinjan ferrokromihaaran palloventtiilin vaihdosta 24.0.2003 sekä raportti seisokin aikaisista takaiskuventtiilien vaihtotyöstä 11.12.2003.
22. Muistio happilinjojen tarkastuksesta, 21.7.1997.
23. AvestaPolarit Stainless Oy, sähköpostiviesti onnettomuusventtiilien jälkeisten venttiilien asennoista, 10.6.2004.
24. AvestaPolarit Stainless Oy, selvitys kaasupulloista, tammikuu 2004.
25. AvestaPolarit Stainless Oy, luettelo viranomaisille toimitetusta laadunvarmistusaineistosta, 30.10.2003.
26. Ilmatieteen laitos Ilmastopalvelu, säätiedot 19.9.2003.
27. AvestaPolarit Stainless Oy, muistio happiputken videotarkastuksesta, 31.10.2003.
28. Air Liquiden, muistio VSA-happilaitoksessa tehdystä huollosta 1-8/2003, 31.10.2003.
29. AvestaPolarit Stainless Oy, tuloste happilinjojen käytöstä 15.9.-21.9.2003.
30. Barry Newton ja Elliot T.Forsyth, Artikkel: Cause And Origin Analyses Of Two Large Industrial Oxygen Valve Fires, 2003.