

Rakenteellinen räjähdys kevennys siloissa

LAB-ammattikorkeakoulu
Insinööri (AMK), Konetekniikka
2021
Mikko Penttilä

Tiivistelmä

Tekijä(t) Penttilä, Mikko	Julkaisunlaji Opinnäytetyö, AMK	Valmistumisaika 2021
	Sivumäärä 41	
Työn nimi Rakenteellinen räjähdys kevennys siiloissa		
Tutkinto Insinööri (AMK), Konetekniikka		
Toimeksiantajan nimi, titteli ja organisaatio ANDRITZ Oy		
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyö tehtiin toimeksiantona ANDRITZ Oy:lle. Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää rakenteellisten räjähdyspaine kevennyslaitteiden käytön mahdollisuutta polttoaineen varastosiloissa</p> <p>Tavoitteena oli tehdä opinnäytetyöstä siilojen paineenkevennyslaitteiston tuotekehityksen tukeva tietopaketti räjähdyspaine kevennyksestä. Opinnäytetyössä käsiteltiin myös ideoita, mitkä voisivat olla vaihtoehtoiset rakenteelliset paineenpurkujärjestelmät.</p> <p>Teoriaosuudessa tutkittiin lain velvoitteita työntekijöiden suojelemiseksi, tilojen ja laitteiden räjähdysriskiä, standardien mukaisia paineen purkuja sekä tukahdutusjärjestelmiä, räjähdyspaineen vaikutusten laskentaa sekä laitteiden testausta koskevia sääntöjä. Opinnäytetyö on alan selvitystyö, jossa aihetta käsiteltiin perusteellisesti teorian kautta.</p> <p>Lopputulosten perusteella toimeksiantajayritys pystyy tulevaisuudessa kehittämään siilojensa rakenteellista räjähdyspaineen purkua ja näin saada aikaan optimoituja kustannustehokkaita siloja.</p>		
Asiasanat pölyräjähdys, räjähdys kevennys, rakenteellinen		

Abstract

Author(s) Penttila, Mikko	Type of Publication Thesis, UAS	Published 2021
	Number of Pages 41	
Title of Publication Structural explosion relief in silos		
Name of Degree Bachelor of Engineering, Mechanical Engineering		
Name, title and organization of the client ANDRITZ Oy		
Abstract <p>The thesis was commissioned by ANDRITZ Oy. The purpose of the thesis was to gather information on how the existing pressure relief hatches of their fuel silos could be replaced by structural means.</p> <p>The aim was to collect material on standards and laws for the thesis, so that the client company could use information in the development of fuel silos in the future. The thesis dealt with different solutions for blast pressure relief and what are the requirements for blast relief devices.</p> <p>The theoretical part examined the legal obligations to protect workers, the explosion risks of premises and equipment, standard pressure relief and suppression systems, the calculation of the effects of an explosion and the rules for testing equipment. The thesis was carried out as a research work in the field, in which the topic was thoroughly dealt with through theory.</p> <p>The result was a comprehensive information package for the company to use in the product development of silos in the future. Based on the results, it is possible to develop structurally implementable explosion pressure relief devices that reduce the manufacturing costs of silos.</p>		
Keywords Dust explosion, explosion relief, structural		

Sisällys

1	Johdanto.....	1
1.1	Opinnäytetyön tausta.....	1
1.2	Tavoite ja rajaukset.....	2
1.3	Tietoperusteet ja tutkimusmenetelmät.....	2
2	Lainsäädäntö.....	3
2.1	1999/92/EY.....	3
2.2	94/9EY.....	3
3	Räjähdyksenvaaralliset tilat ja laitteet.....	5
3.1	Pölyn muodostuminen räjähdyskelpoiseksi ilmaseokseksi.....	5
3.2	Päästölähteet.....	5
3.3	Syttymislähteet.....	6
3.4	Pölyä sisältävät laitteet ja päästölähteiden tunnistaminen.....	7
3.5	Laiteluokat ja ryhmät.....	8
3.6	Tilan luokittelu räjähdysvaaralliseksi.....	9
3.7	Tilaluokkien laajuus.....	10
3.8	Riskien pienentäminen.....	11
4	Räjähdyksen vaikutusten laskenta.....	13
4.1	Kevennyspinta-alojen laskenta.....	13
4.2	Räjähdyksien pituuden ja leveyden laskenta.....	14
4.3	Painevaikutukset ja ulkopuolisen räjähdyspaineen laskenta.....	15
4.4	Rekyylin ja tyhjiön laskenta.....	17
5	Räjähdyksenvaarallisuuden kevennys.....	19
5.1	Vaatimukset.....	19
5.2	Rakenteet.....	19
5.3	Dokumentointi.....	26
5.4	Kevennyslaitteiden testaus, paine ja mekaaninen toimivuus.....	27
5.5	Räjähdyksentestit.....	28
6	Vaihtoehtoinen paineenpurku tapa.....	30
6.1	Räjähdyssuojauskeinot.....	30
6.2	Kattopeltien kiinnittäminen hajoavilla pulteilla.....	31
6.3	Heikompi kattomateriaali.....	32
6.4	Paineenpurku mitoituslaskenta esimerkki siilolle.....	34
7	Yhteenveto.....	38
	Lähteet.....	40

1 Johdanto

1.1 Opinnäytetyön tausta

Valtioneuvoston asetus räjähdyskelpoisten ilmaseosten työntekijöille aiheuttaman vaaran torjunnassa 576/2003 säädöksellä pyritään ylläpitämään työntekijöiden yleistä turvallisuutta ja välttämään henkilö- ja omaisuusvahinkoja. Räjähdysherkkiä paikkoja on erityisesti teollisuudessa, jossa käsitellään räjähdyskelpoisia aineita, jotka normaalipaineisen ilman kanssa muodostavat räjähdysvaarallisia seoksia. Ensisijaisesti räjähdysherkkä tila tulee suunnitella niin, että tilaan ei pääse muodostumaan räjähdysvaarallista ilmaseosta. Tämä ei aina ole mahdollista ja tällöin tila täytyy suunnitella niin, että räjähdysten käydessä räjähdyspaine pääsee hallitusti purkautumaan pois. (Valtioneuvoston asetus räjähdyskelpoisten ilmaseosten työntekijöille aiheuttaman vaaran torjunnasta, 576/2003, 1 §)

Teollisuuden laiteturvallisuus on kokonaisuus, johon täytyy kiinnittää huomiota suunnittelussa, rakentamisessa, käyttötilanteessa sekä vikatilanteessa. Näin voidaan välttyä henkilö- ja omaisuusvahingoilta tai ainakin välttää niitä mahdollisimman hyvin.

Opinnäytetyö painottuu polttoainesilojen kattoihin ja niiden ATEX-vaatimukseen räjähdysonnettomuuksien varalta. Polttoainesiloissa varastoidaan pölyäviä materiaaleja, jolloin on mahdollista, että oikeassa suhteessa ilman kanssa voi syntyä pölyräjähdys. Tämän takia polttoainesilojen kattoihin on tehtävä heikennyksiä mitkä hajoavat tai aukeavat, jos paine silon sisällä kasvaa liian suureksi.

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimii ANDRITZ Oy ja työ toteutetaan yrityksen Lahden toimipisteelle. ANDRITZ-konserni tarjoaa laaja-alaisen valikoiman teollisuuden ja kuntien laitteita, järjestelmiä sekä palveluita. ANDRITZ Oy tarjoaa osaamistaan massa- ja paperiteollisuudelle, vesivoimalle, metallinjalostus- ja muoviteollisuudelle, pumpuille, kiinteiden ja nestemäisten aineiden erotukselle kuntien ja teollisuuden aloilla sekä eläinten rehun ja biomassan pelletoinnin järjestelmille. Suurta tuotevalikoimaa täydentävät myös sähkö-, kierrätys-, kuitukangas- ja paneelituotantolaitokset. Uutena innovaationa toimii Metris-tuotennellä tarjottavat automaatio- ja digitaaliset ratkaisut. ANDRITZ-konsernin alaisuuteen kuuluu kaikkiaan noin 26 700 työntekijää sekä 280 toimipistettä neljässäkymmenessä maassa. Suomessa ANDRITZ Oy:lla on noin 1300 työntekijää seitsemässä toimipisteessä. (ANDRITZ 2021.)

1.2 Tavoite ja rajaukset

Toimeksiantaja haluaa tutkia, voidaanko räjähdysluukut suunnitella kiinteiksi elementeiksi siilon kattoon, jolloin räjähdyspaneelleita ei tarvitsisi ostaa erikseen. Monet polttoainesilojen kattojen räjähdyspaineen vapautusjärjestelmät on toteutettu kaupallisilla räjähdyspaneelleilla. Tällainen ratkaisu on yksinkertainen mutta melko hinnakas, sillä isossa siilossa tällaisia yksittäisiä paneelleita voi olla kymmeniä. Työssä keskitytään pelkästään pölyä sisältävien laitteiden räjähdyspaineen kevennykseen. Opinnäytetyö tulee toimeksiantajalle räjähdyspaineen kevennyslaitteiden suunnittelun sekä räjähdysvaaran kartoittamisen tueksi.

Tietoperusta koostuu laeista ja standardeista, jotka vaikuttavat rakenteellisesti paineen purun suunnitteluun. Opinnäytetyössä käsitellään teoreettisesti, kuinka tällainen siilo olisi mahdollista suunnitella ja toteuttaa.

Yritykseen on aiemmin tehty diplomityö, jossa käsiteltiin silojen kattorakenteiden vakiointia. Työssä ei kuitenkaan otettu kantaa silojen räjähdysten kevennykseen (Keto 2017).

1.3 Tietoperusteet ja tutkimusmenetelmät

Suunnittelun tueksi opinnäytetyöhön on kerätty tietoa laeista ja määräyksistä kattojen suunnitteluun ja valmistukseen liittyen. Pohjana määräyksissä käytetään SFS:n tarjoamia standardeja, joissa on yhteisesti sovittuja vaatimuksia, suosituksia tai ominaisuuksia tuotteille ja niiden valmistukselle (SFS 2021).

Tämä opinnäytetyö on selvitystyö, jonka tavoitteena on kerätä mahdollisimman laaja aineisto eri standardeista ja laeista, jota toimeksiantajayritys pystyisi tulevaisuudessa käyttämään polttoainesilojen kehityksessä. Tutkimusosuudessa esitellään vaihtoehtoinen räjähdyspaineen vapautusmenetelmä ja näytetään esimerkiksi, kuinka lasketaan tarvittava paineenpurkupinta-ala. Työssä ei tulla tekemään valmista fyysistä tuotetta.

2 Lainsäädäntö

2.1 1999/92/EY

Räjähdykset ja äkilliset leimahdukset eivät ole yleisiä tapaturmien syitä, mutta niiden seuraukset ovat hyvin suuria henkilö- ja omaisuusvahingoiltaan. Onnettomuuksien minimoimiseksi Euroopan parlamentti on säätänyt ATEX-direktiivin 1999/92/EY. Direktiivi säädettiin vähentämään räjähdysten ja äkillisten leimahdusten esiintymistä töissä. Säädöksellä on ollut tutkitusti parantava vaikutus niin työterveyteen kuin turvallisuuteen kohdistuvien riskien hallintaan sekä myös yrityksen voittoon. (Euroopan komissio 1999/92/EY.2003.)

ATEX-lainsäädännön tarkoituksena on luoda säännöt räjähdysvaarallisille tiloille ja tiloissa käytettäville laitteille. Laitteiden ja tilojen lainsäädännön toteutumista valvoo tilojen osalta Tukes ja työturvallisuuslainsäädännön osalta työsuojeluviranomaiset. Pelastusviranomaiset valvovat pieniä määriä syttyviä nesteitä ja kaasuja tuottavia laitoksia. (Tukes 2015.)

Direktiivi 1999/92/EY on vähimmäisvaatimus räjähdyskelpoisten ilmaseosten aiheuttamalle vaaralle työturvallisuuden -ja terveyden suojelemisen kannalta. Tämä direktiivi ei ota kantaa esimerkiksi potilaille annettavaan hoitoon, kaasumaisia laitteita käyttävien laitteiden käyttöön, räjähdysaineiden tai epävakaiden aineiden käsittelyyn ja valmistamiseen, kaivosteollisuuteen tai ADR-kuljetuksiin. Direktiiviä ei käytetä Suomessa sellaisenaan, vaan valtioneuvosto on tehnyt asetuksen ”Valtioneuvoston asetus räjähdyskelpoisten ilmaseosten työntekijöille aiheuttaman vaaran torjunnasta” joka säätelee työntekijöihin kohdistuvan räjähdysten aiheuttaman vaaran torjunnassa. Tämä säädös noudattaa direktiivin 1999/92/EY kohtia. (Euroopan komissio 1999/92/EY.2003.)

2.2 94/9EY

Maaliskuussa 1994 on Euroopan parlamentti ja neuvosto säätänyt direktiivin 94/9/EY, jolla säädellään räjähdysvaarallisten laitteiden ja suojajärjestelmien koskevan jäsenvaltioiden lainsäädännön lähentämistä. Euroopan jäsenvaltioilla on vastuu kansalaistensa turvallisuudesta ja joissakin tapauksissa kotieläimistä ja omaisuudesta. Varsinkin työntekijöiden turvallisuus ja terveys on turvattava työskennellessä räjähdysvaarallisissa tiloissa tai räjähdysvaarallisten laitteiden kanssa. (Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 94/9/EY.)

Jäsenvaltioiden on eri säännöksillä määriteltävä tarvittava turvallisuustaso, jota räjähdysvaarallisten tilojen ja laitteiden on noudatettava. Yleensä määräykset koskevat räjähdysvaarallisten tilojen sähkölaitteiden suunnittelua ja valmistamista, jotka vaikuttavat räjähdysvaaran. Eri jäsenvaltioiden välillä voi olla eroja laitteiden vaatimuksissa niiden laajuuden ja tarkastusmenettelyn osalta. Tällaiset erot vaikuttavat vapaaseen kauppaan ja voivat

asettaa toisen valtion epäoikeudenmukaiseen asemaan markkinoilla. Tämän direktiivin tarkoitus on luoda yhteiset pelisäännöt kaikille. (Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 94/9/EY.)

Laitedirektiiviä 94/9/EY uudistaa 20.4.2016 voimaan tullut ATEX-laitedirektiivi 2014/34/EU. Direktiivissä on laitevalmistajille paljon uusia säädöksiä, jotka määräävät kuinka laitteita on valmistettava ja suunniteltava.

3 Räjähdyksvaaralliset tilat ja laitteet

3.1 Pölyn muodostuminen räjähdyskelpoiseksi ilmaseokseksi

Kun tutkitaan räjähdysten kevennyslaitteita, on hieman ymmärrettävä, kuinka pöly voi muodostaa räjähdysten. Jotta pöly muodostaa räjähdyskelpoisen ilmaseoksen, on pölyn sitouttava oikeassa suhteessa ilman kanssa.

Pölyräjähdyksissä yleisin pöly on puupöly, jota muodostuu monesti puunkäsittelylaitoksissa. Pölyn hiukkaskoko täytyy olla oikeanlainen, jotta pöly muodostaa ilman kanssa räjähdyskelpoisen ilmaseoksen. Hiukkaskoko pölyvaaran muodostumiselle on 0,5 mm. Räjähdyksivaara voi silti syntyä, vaikka pölyyn olisi sitoutunut karkeampaa ainetta, jos pölypitoisuus on yli 20 g/m^3 , joka on pölyräjähdysten vaarallisuusraja. Pölypilven pitoisuuden ollessa muutamia kiloja kuutiossa, on tällöin pölypilvi liian rikas syttyäkseen, mutta tällaisella pölypilvellä on myös mahdollisuuksia syttyä reunoiltaan ja näin voi muuttua rikkaan pölypilven seosta liikuttamalla pilveä. Räjähdyksen syntyyn vaikuttavat myös ilmaseoksen happipitoisuus ja pölyn kosteusprosentti. (Laaksonen 2005, 2.)

Puupölyn määrää ilmassa voidaan arvioida silmämääräisesti seuraavalla tavalla. Puupölyn ollessa noin 20 g/m^3 , kahden metrin päässä oleva loisteputki tai hehkulamppu valaisin näkyy heikosti pölypilven takaa. Pölyn määrän arviointi näkö perustein umpinaisessa laitteessa esimerkiksi pölyputkistoissa, suodattimissa ja silloissa on mahdotonta. Tällöin pölyn määrää voidaan arvioida karkeasti poistetun sivutuotteen määrästä poistoilmasta. (Laaksonen 2005, 3.)

Vaikka usein puhutaan pölyräjähdyksestä, ei pöly yleensä räjähdä vaan ennemminkin palaa humahtaan. Tästä ei yleensä synny kovin suurta painetta, mutta tuli sen sijaan leviää tehokkaasti avoimessa tilassa. (Laaksonen 2005, 3.)

3.2 Päästölähteet

Päästölähteet ovat paikkoja tai pisteitä, joista voi päästä ilmaan pölyä niin, että se muodostaa räjähdyskelpoisen ilmaseoksen. Olosuhteet vaikuttavat räjähdyskelpoisten päästölähteiden räjähdyskelpoisuuteen. Kaikki päästölähteet eivät välttämättä muodosta ilman kanssa räjähtävää ilmaseosta. Kaikissa tilanteissa, joissa prosessilaitteet, prosessivaiheet tai muut odotettavissa olevat toiminnot, jotka voivat muodostaa räjähdyskelpoisia ilmaseoksia tai pölykerroksia on tunnistettava. (SFS-EN 60079-10-2:2015, 13.)

3.3 Syttymislähteet

Räjähdykset voivat syntyä tuotantotiloissa käytetyistä materiaaleista, käytöstä aiheutuvista päästöistä tai komponenttien rakennemateriaaleista. Räjähttäminen ei aina johdu ainoastaan vain materiaaleista, vaan myös niiden virheellisestä käsittelystä. Laitteet tulee aina suunnitella niin, että laitteiden väärinkäyttö olisi mahdotonta. Laitteiden oikea ja turvallinen käyttötapa oikeanlaisten materiaalien kanssa vähentää riskiä, että laitoksessa syntyisi räjähdystä. (SFS-EN 1127-1:2019, 11.)

Kuumat pinnat voivat toimia räjähdysten lähtökipinä, sillä myös kuumen pinnan päällä oleva pölykerros tai palava kiinteä aine voivat aiheuttaa syttymisen. Kuumen pinnan syttämiskyky riippuu ilmaan sekoittuneen aineen tyypistä ja pitoisuudesta, pinta-alasta, pinnan muodosta, pitoisuuden muutoksesta pinnan läheisyydessä, pintamateriaalista sekä pinnan lämpötilasta. Räjähdykskelpoinen ilmaseos altistuessaan pitkille ajoille kuumalle pinnalle voi pinnalla esiintyä harvinainen esireaktio, jota kutsutaan nimellä viileä liekki. Viileä liekki ei suoranaisesti räjähdystä aiheuta, mutta voi muodostaa hajaantumistuloksia, jotka voivat edistää alkuperäistä ilmaseoksen syttymistä. Kuumia pintoja voi syntyä koneistusprosesseissa. Tällaisia laitteita prosessissa voivat olla kitkakytkimet ja mekaaniset jarrut, jotka toimiessaan muuttavat liike-energiaa lämmöksi. Laakereiden, akseliläpivientien, tiivistysholkkien ym. liikkuvat osat voivat tuottaa lämpöä riittämättömän voitelun takia ja muodostua mahdollisiksi syttymislähteiksi. (SFS-EN 1127-1:2019, 11.)

Liekit syntyvät tyypillisesti yli 1000 °C lämpötilassa. Liekkien palaessa syntyy kuumia kaasuja, ja pölyn ja noen palaessa ilmaan syntyy myös kuumia hehkuvia hiukkasia. Edellä kuvatut reaktiot voivat sytyttää räjähdyskelpoisen ilmaseoksen, jopa pienet liekit toimivat todella tehokkaina syttymislähteinä. Hitsauksesta ja leikkaustyöstä syntyvät roiskeet ovat erittäin hyviä syttymislähteitä, sillä kipinät ovat isoja ja näin ollen kytevät pitkään. (SFS-EN 1127-1:2019, 11–12.)

Kitkaa, iskuja ja kulutusta sisältävissä töissä ja prosesseissa, esimerkiksi hionnassa materiaalista voi irrota partikkeleita, jotka kuumenevat hiomisesta johtuvasta energiasta. On myös mahdollista, että partikkelit kuumenevat entistä korkeampaan lämpötilaan hapettumisen takia, jos materiaalina on rauta tai teräs. Tällaiset kipinät voivat helposti sytyttää kaasuja ja pölyjä palamaan, jolloin kipinät voivat pölykerroksissa käynnistää kytymisen ja toimia näin sytyttäjänä räjähdyskelpoisille ilmaseoksille. Pahimmassa tapauksessa kevytmetallit kuten alumiini ja magnesium voivat hiottaessa aiheuttaa termiittireaktion. Reaktio synnyttää nopeasti paljon lämpöä ja reaktion sammuttaminen on erittäin hankalaa. (SFS-EN 1127-1:2019, 12.)

Hajavirrat voivat aiheuttaa syttymisiä. Hajavirtoja voi esiintyä laitteiden sähköratojen kosketuspinnolla laitteiden liikkeessa kiskoilla. Hajavirtoja voi muodostua jopa pienillä jännitteillä ja synnyttää tarpeen suuria valokaaria tai kipinöitä, jotka voi toimia sytytyksenä räjähdykselle. (SFS-EN 1127-1:2019, 13.)

Staattinen sähkö voi aiheuttaa syttymisen, sillä staattisia purkauksia syntyy normaalisti kahden materiaalin välille. Riippuen purkuenergian suuruudesta, voivat staattiset kipinät sytyttää melkein minkä tahansa räjähdyskelpoisen ilmaseoksen. (SFS-EN 1127-1:2019, 13.)

Eksotermiset reaktiot voivat muodostaa lämpöä ja sytyttää materiaalin itsestään palamaan. Jos eksotermisessä reaktiossa vapautuu enemmän lämpöä kuin sitä katoaa, on mahdollisuus, että pöly syttyy itsestään palamaan. Tällaisia reaktioita aiheuttavat ilman itsestään syttyvät aineet, vesi ja alkalimetallit, orgaanisten peroksidien hajaantuminen ja polymerointireaktiot. (SFS-EN 1127-1:2019, 15.)

Adiabaattisessa tai lähes adiabaattisessa puristuksessa sekä paineaaltojen vaikutuksessa voi syntyä korkeita lämpötiloja, jotka voivat aiheuttaa syttymisiä. Nopeasti muodostuva korkea paine voi synnyttää korkeita lämpötiloja. Tällaisia lämmön muodostumia voi syntyä paineilmaa tuotettaessa kompressoreissa, jossa ilmaa puristetaan nopeasti. (SFS-EN 1127-1:2019, 15.)

3.4 Pölyä sisältävät laitteet ja päästölähteiden tunnistaminen

Laitteet, jotka sisältävät pölyä mutta eivät päästä pölyä ulos, voivat prosessin muuttuessa muodostaa jatkuvia pölypilviä. Pölypilviä voi esiintyä jatkuvasti tai niiden voidaan olettaa esiintyvän pitkiä tai lyhyitä aikoja. Laitteita tulisi tarkastella niin, että prosessin mahdollisesti muuttuessa on mahdollisuus, että pölyä pääsee syntymään. Tällaisia tilanteita ovat käynnistys ja pysäytys sekä epänormaalit käytöt. (SFS-EN 60079-10-2:2015, 14.)

Tilaluokitukseen voivat vaikuttaa myös monet tekijät pölyä sisältävän laitteen ulkopuolella. Laitteissa, joissa käytetään ilmakehää suurempaa painetta, on suurempi mahdollisuus, että laitteen ulkopuolelle muodostuu pölyä, kun taas alipaineessa laitteessa tällainen mahdollisuus on pieni. Asioita, jotka vaikuttavat pölyn päästömääriin ovat pölyhiukkasen koko, kosteuspitoisuus, joissakin tapauksissa jos pölyä siirretään nopeasti, pudotetaan korkealta tai imetään runsaasti. Kun päästön syntymismahdollisuus on tiedossa, jokainen päästölähde on tunnistettava ja määritettävä päästöluokka. (SFS-EN 60079-10-2:2015, 14.)

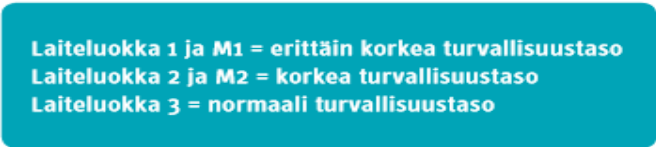
Päästöluokat:

- Jatkuva päästöluokka: Päästö esiintyy jatkuvasti tai sen voidaan olettaa esiintyvän pitkiä ajanjaksoja tai useita lyhyitä aikoja. Esimerkkinä sekoittimen sisätilat tai varastosilo, joka täytetään ja tyhjennetään usein.
- Primäärinen päästöluokka: Päästö, jonka voidaan olettaa syntyvän määrääjain tai satunnaisesti normaalin käytön aikana. Esimerkkinä avoimen säkkien täyttö- ja tyhjennyspaikan lähiympäristö.
- Sekundäärinen päästöluokka: Päästö, jonka ei oleteta esiintyvän normaalikäytössä ja mikäli se esiintyy, niin tapahtuu vain harvoin ja lyhyen ajan. Esimerkkinä pölyävän aineen käsittelylaitos, jonka yhteydessä esiintyy pölykertymiä. (SFS-EN 60079-10-2:2015, 14.)

Suuria tai katastrofimaisia laitosonnettomuuksia ei tarvitse huomioida päästölähteitä arvioi-
dessa. Tällaisia kohteita ovat sellaiset laitteet, joiden ei oleteta päästävän ulos mitään
muussa tapauksessa kuin onnettomuudessa. Tämä oletamus sisältää muun muassa pai-
neastiat ja miesluukut.

3.5 Laiteluokat ja ryhmät

Ex-laitteet jaetaan ryhmiin I ja II. Ryhmän I laitteita ovat kaivoksissa ja niiden maanpäälliset
laitteet, räjähdysvaara perustuu yleensä kaivoskaasuun (metaani) ja pölyyn. I ryhmän lait-
teet jaetaan kahteen laiteluokkaan, M1 ja M2. Ryhmä II laitteet ovat muissa paikoissa käy-
tettäviä laitteita kuin kaivoksissa, nämä laitteet luokitellaan kolmeen laiteluokkaan 1, 2 ja 3
riippuen miten suurta turvallisuustasoa laitteelta vaaditaan. Laiteluokka määrittää millainen
turvallisuustaso (kuva 1) vaaditaan tilassa, johon laiteluokiteltu laite sijoitetaan. (Tukes
2015.)



Laiteluokka 1 ja M1 = erittäin korkea turvallisuustaso
Laiteluokka 2 ja M2 = korkea turvallisuustaso
Laiteluokka 3 = normaali turvallisuustaso

Kuva 1. Laiteluokkien turvallisuustasot (Tukes 2015)

3.6 Tilan luokittelu räjähdysvaaralliseksi

Tilaa arvioitaessa räjähdysvaaralliseksi pitää tutkia räjähdysten mahdollista aiheuttaja ainetta. Vaikka tilassa olisi hyvin suuren pitoisuuden omaava pölypilvi, tarvitsee se myös oikean suhteen ilmaa, jotta räjähdys olisi mahdollinen. On mahdollista, että vaara räjähdykselle on, jos pölypilven pitoisuus laskee ja muodostaa ihanteellisen seoksen ilman kanssa. (SFS-EN 60079-10-2:2015, 12.)

Pöly, jota ei poisteta mekaanisesti pölyimurijärjestelmillä tai ilmanvaihdolla, laskeutuu hiukkaskoosta riippuvalla nopeudella kerroksiksi ja kasaantumiksi. Pitoisuudeltaan laimea tai pieni jatkuva päästölähde voi ajan saatossa muodostaa vaarallisen pölykerroksen. (SFS-EN 60079-10-2:2015, 12.)

Pölyjen synnyttämiä vaaratekijöitä ovat pölyntyminen ja pölyn kasaantuminen. Pöly voi laitteiden päälle kasaantuessaan aiheuttaa ajan kuluessa lämpöeristeen, joka voi yli kuummentaa laitteen ja näin sytyttää pölyn palamaan. Palava pölykerros voi olla syttymislähde myös räjähdyskelpoiselle ilmaseokselle. (SFS-EN 60079-10-2:2015, 12.)

Räjähdyskelpoisia pölypilviä, pölykerroksia ja kaikkia syttymislähteitä tulisi välttää. Jos syttymislähteitä ei voida poistaa, täytyy syttymisen ennalta ehkäisemiseksi vähentää pölyn määrää tai syttymislähteiden esiintymistodennäköisyyttä, niin että molemmat olisivat mahdollisimman pienet. (SFS-EN 60079-10-2:2015, 12.)

Tapauksissa, joissa ei ole mahdollista poistaa räjähdysvaaraa kokonaan, on tarvittavaa käyttää jotakin räjähdysensuojajärjestelmää, kuten räjähdyspaineen kevennystä tai räjähdysten tukahdutusta. Tällaisissa tilat täytyy luokitella tiettyjen ehtojen mukaan. (SFS-EN 60079-10-2:2015, 12.)

Tilaluokitusta tehdessä täytyy ottaa huomioon monia eri asioita useista eri lähteistä:

- Pölyn palavuus täytyy tutkia. Tutkinta voidaan suorittaa laboratoriotestein standardin ISO/IEC 80079-20-2 mukaisesti.
- Esiintyvien pölyjen ominaisuudet. Tiedot saadaan erilaisista julkaistuista lähteistä, prosessiasiantuntijalta tai testaamalla. Ominaisuudet, jotka on saatu lähteistä, tulee vahvistaa kyseessä olevaan tilanteeseen, koska pölyjen ominaisuusarvoissa on usein merkittäviä eroja riippuen tiedonlähteestä.
- Prosessin tiettyjen kohteiden edustaman päästön luonne. Tämä tieto voi olla saatavissa laitossuunnittelun erityistiedostosta.
- Laitoksen käyttö- ja kunnossapitokäytäntö, muun muassa siivous.
- Muu laite- ja turvallisuusinformaatio. (SFS-EN 60079-10-2:2015, 12–13.)

Yhteistyö turvallisuus- ja laitesuunnittelijoiden välillä on tärkeää. Tilaluokkia määriteltessä tutkitaan vain pölypilvestä aiheutuvaa vaaraa, joten siinä on myös otettava huomioon, että kasaantunut pöly voi häiriintyessään lähteä lentoon ja muodostaa pölypilven. Tilaluokkien tunnistamisenmenettelyssä on kolme vaihetta:

- Ensimmäisessä vaiheessa määritellään aineominaisuudet aineelle, joilla kartoitetaan onko aine palavaa. Vaikuttavia kohtia ovat hiukkaskoko, kosteuspitoisuus, pölypilven ja pölykerroksen minimi syttymislämpötilat, pölyn sähkönjohtavuus sekä soveltuva pölyryhmä: Ryhmä IIIA palaville hahtuville, Ryhmä IIIB eristävälle pölylle tai Ryhmä IIIC johtavalle pölylle.
- Toisessa vaiheessa selvitetään pölyä sisältävien laitteiden tai muiden pölypäästölähteiden sijainti päästölähteiden mukaan.
- Kolmannessa vaiheessa määritellään todennäköisyys sille, syntyykö kohteista pölypäästöjä ja sitten todennäköisyys syttyykö ne. (SFS-EN 60079-10-2:2015, 13.)

Näiden tarkasteluvaiheiden jälkeen tilaluokat ja niiden laajuus voidaan määrittää. Päätökset tilaluokista ja niiden laajuudesta sekä pölykerrosten esiintymiset on dokumentoitava tilaluokituspiirustuksiin. Piirustuksia käytetään syttymislähteiden arviointiin. (SFS-EN 60079-10-2:2015, 13.)

Päätösten perustelut tulee kirjata tilaluokka tutkimusmuistiinpanoihin, jotta tulevaisuudessa ymmärrettäisiin tehdyt ratkaisut. Tilaluokituksia joudutaan tarkastelemaan aika ajoin uudestaan laitoksen kulumisen, prosessin muuttuessa tai prosessissa käytettävien aineiden muuttuessa. (SFS-EN 60079-10-2:2015, 13.)

3.7 Tilaluokkien laajuus

Pölyräjähdysvaaralliset tilat jaetaan luokkiin niiden räjähdyskelpoisen ilmaseosten esiintymisen keston ja esiintymislaajuuden mukaan. Tilaluokan lisäksi määritellään myös luokitellun tilan laajuus, jossa määritellään matka päästölähteestä, jossa vaaraa ei enää ole. (SFS-EN 60079-10-2:2015, 14–15.)

Pölypilven ilmaseosta ei pidetä räjähdyskelpoisena, jos pilven pölypitoisuus jää alle sopivan varmuusmarginaalin alapuolelle kuin räjähdyskelpoisen ilmaseoksen vaadittu minimipitoisuus. Vaikka pölypitoisuus olisi alhainen, tulisi huomioida pölyn mahdollinen kulkeutuminen ilmavirran avulla rakennuksen muihin osiin. Jos tilaluokkien välille jää pieniä alueita, jotka ovat vaarattomia, täytyisi nämä luokat muuttaa samaan vaarallisuusluokkaan kuin ympäröivät tilat. Tällaisia tiloja ovat esimerkiksi laitosten välille jäävät ulkotilat, jotka voivat muuttua vaarallisiksi muun muassa tuulen vaikutuksesta. (SFS-EN 60079-10-2:2015, 15.)

Tilaluokka 20 pitää sisällään putkien, kanavien sekä tuotanto- ja käsittelylaitteiden sisäpuolisen tilan, jos räjähdyskelpoinen ilmaseos on jatkuvaa tai toistuvaa. Jos tilojen ulkopuolella on mahdollista jatkuvaa räjähdyskelpoiseen pölyilmaseokseen, on tilat luokiteltava myös tilaluokkaan 20. (SFS-EN 60079-10-2:2015, 15.) Tilaluokka 20 esimerkkituloja ovat pölyä sisältävät laitteet ja niiden osat, täryttimet, siilot, pölynkuljetusjärjestelmät, sekoittimet ja myllyt (SFS-EN 60079-10-2:2015, 19). Tilaluokassa 20 käytetään laiteluokan 1 laitteita (Tukes 2015).

Tilaluokka 21 on asetettava tilalle silloin, jos pölypäästölähteistä on mahdollisuus päästä pölyä tilaan esimerkiksi täyttöaukosta tai avonaisesta tarkastusluukusta (SFS-EN 60079-10-2:2015, 15). Tilaluokassa 21 käytetään laiteluokan 1 tai 2 laitteita (Tukes 2015).

Tilaluokka 22 asetetaan tilalle, jos tilalla on vähäinen tai harvoin riski muodostaa räjähdyskelpoisia ilmaseoksia. Esimerkkitapauksia tällaisista ovat harvoin avattavat tarkastusluukut, pölyviä tuotteita sisältävät säkkivarastot, joissa voi olla mahdollisuus pölylle, jos säkki rikoontuu. (SFS-EN 60079-10-2:2015, 20.) Tilaluokassa 22 käytetään laiteluokan 1, 2 tai 3 laitteita (Tukes 2015).

3.8 Riskien pienentäminen

Räjähdys vaatii samanaikaisesti räjähdyskelpoisen ilmaseoksen ja syttymislähteen, jotta räjähdys olisi mahdollinen. Räjähdysriskin pienentämisen pohjana voidaan käyttää räjähdysten ennakoituja seurauksia, jotka johtavat suoraan räjähdysten eston ja suojausten periaatteisiin.

- Esto
 - 1. Vältä tai vähennä räjähdysvaarallisten aineiden käyttöä prosesseissa, joissa on mahdollisuus räjähdyskelpoisten ilmaseosten synnylle.
 - 2. Vältä kaikkia mahdollisia syttymislähteitä.
- Suojaus
 - 1. Pysäyttämällä tai rajoittamalla riittävästi räjähdysten vaikutusalueita riittävin suojaustoimenpitein esimerkiksi eristämällä, tuulettamalla, tukahduttamalla ja suojarakenteilla. Toisin kuin estokohdan kohtien kohdalla, suojauskohdan säännön kohdalla sallitaan räjähdysten tapahtuminen.

Räjähdysten riskiä voidaan pienentää soveltamalla yhtä edellä mainituista eston tai suojausten periaatteista. Yhdistelmiä näistä periaatteista on myös suositeltavaa käyttää. (SFS-EN 1127-1:2019, 16.)

Ensisijaisesti prosesseissa pitäisi aina välttää räjähdyskelpoisia ilmaseoksia. Mitä enemmän räjähdyskelpoista ilmaseosta on, sitä enemmän on torjuttava aktiivisia syttymislähteitä. Esto- ja suojaustoimenpiteiden suunnittelussa on kiinnitettävä huomiota prosessin normaaliin toimintaan, joita ovat käynnistäminen ja alasajo. Lisäksi on otettava huomioon prosessin häiriöt ja mahdolliset käyttäjien väärinkäytöt standardin EN ISO 12100:2010 mukaan. Räjähdysten esto- ja suojaustoimenpiteiden soveltaminen edellyttää perusteellista asiantuntemusta ja riittävää kokemusta, tästä syystä on suositeltavaa käyttää asiantuntijaa mukana suunnittelussa. (SFS-EN 1127-1:2019, 16–17.)

Aineita, jotka saattavat aiheuttaa räjähdyskelpoisia ilmaseoksia pitäisi välttää tai korvata sellaisilla aineilla, jotka eivät muodosta vaaraa räjähdyskelpoiselle ilmalle. Aina tämä ei kuitenkaan ole mahdollista ja tällöin on tehtävä tarpeellisia varotoimenpiteitä prosessiin varmistamaan, että räjähdyskelpoisia ilmaseoksia ei pääse syntymään. (SFS-EN 1127-1:2019, 16–17.)

Ellei prosessia pystytä käyttämään ilman aineita, jotka muodostavat räjähdyskelpoisia ilmaseoksia, on niiden määrää ja pitoisuutta säädeltävä toimenpiteillä esimerkiksi tukahduttamalla. Tukahduttamisessa prosessiin lisätään prosessin kanssa yhteensopivaa ainetta, joilla estetään räjähdyskelpoisten ilmaseosten syntyminen esimerkiksi kaasua (typeä, hiilidioksidia, jalokaasuja), vesihöyryä tai jauhemaista sammutusaineita (kalsiumkarbonaattia). Invertointi perustuu siihen, että prosessin happipitoisuutta lasketaan ja näin alennetaan ilmaseoksen räjähdyskelpoisuutta. (SFS-EN 1127-1:2019, 18.)

4 Räjähdyksen vaikutusten laskenta

4.1 Kevennyspinta-alojen laskenta

Paineen alennus voidaan toteuttaa rakennusta heikentämällä tai tähän tarkoitukseen tehdyillä luukuilla. Luukkujen toiminta on rikkoontua, kun ennalta määrätty paine ylittyy ja vapauttaa laitteen sisältä ylipaineen. Luukkujen suuntauksella on myös merkitystä ja luukkujen edessä täytyy olla reilusti tilaa, jotta paine pääsee purkautumaan nopeasti ulos. (SFS-EN 14491,12.)

Paineen kevennyksen tärkein ominaisuus on rajoittaa räjähdyspainetta, eikä sammuttaa sitä. Räjähdyksen kevennyksessä tärkeintä on laskea riittävän suuri kevennyspinta-ala laitteeseen, jotta saavutetaan suurin hyöty räjähdyspaineen alentamisessa. Kevennyspinta-ala määrä ja suuruus riippuu pölyn räjähdysominaisuuksista, pölypilven olotilasta (pitoisuus, turbulenssi, jakautuma), tilan geometriasta ja kevennyslaitteen rakenteesta. Pinta-ala voidaan laskea kaavalla 1, jos ylipaine ($p_{red,max}$) on suurempi kuin 0,1 bar, mutta pienempi kuin 1,5 bar. (SFS-EN 14491,12–14.)

$$A = B(1 + C * \log \frac{L}{D}) \quad (\text{kaava 1})$$

Jossa A on vaadittava kevennyspinta-ala, (L/D) tilan muotoa kuvaava pituuden suhde halkaisijaan ja V on suojattavan tilan tilavuus (SFS-EN 14491, 8). Jotta kaava 1 voidaan laskea, täytyy kaavasta laskea ensin B kaavalla 2.

$$B = [3,264 * 10^{-5} * p_{max} * K_{St} * p_{red,max}^{-0,569} + 0,27 * (p_{stat} - 0,1) * p_{red,max}^{-0,5}] * V^{0,753}$$

(kaava 2)

Jossa p_{max} on suurin räjähdyspaine pölyseoksen räjähtäessä, pölyn räjähdysvakio K_{St} kuvaa paineen nousunopeuden maksimiarvoa suljetussa tilassa (kuutiomaisten tilojen p_{max} ja K_{St} ovat käytännössä riippumattomat tilan koosta). p_{stat} kevennyslaitteen toimintapaine, $p_{red,max}$ kuvaa tilan maksimipaineen kestävyyttä. Kun tutkitaan tilan maksimipaineen kestävyyttä, on otettava huomioon kaikki tilassa räjähdyspaineeseen vaikuttavat osat esimerkiksi venttiilit, näkölasit, miesluukut ja liitetyt kanavat. Räjähdyksen kevennyspaineen

kestävyyssarvona on käytettävä laitteiden alinta räjähdyspaineen kestävyysarvoa. C saadaan laskettua kaavalla 3.

$$C = (-4,305 * \log p_{red,max} + 0,758) \quad (\text{kaava 3})$$

Yhtälön reunaehdot ovat:

- Tilan koko $0,1 \text{ m}^3 \leq V \leq 10\,000 \text{ m}^3$.
- Kevennyslaitteen staattinen toimintapaine $0,1 \text{ bar} \leq p_{stat} \leq 1 \text{ bar}$ (jos p_{stat} on $< 0,1 \text{ bar}$ käytä $p_{stat} = 0,1 \text{ bar}$).
- Suurin kevennetyyn räjähdysten ylipaine $0,1 \text{ bar} < p_{red,max} \leq 2 \text{ bar}$.
- K_{St} ja suurin räjähdysten ylipaine $5 \text{ bar} \leq p_{max} \leq 12 \text{ bar}$ pölyn ominaisparametrille: $300 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1} < K_{St} \leq 800 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.
- Tilan pituus/halkaisija $1 \leq L/D \leq 20$. (SFS-EN 14491,14–16.)

4.2 Räjähdysliekin pituuden ja leveyden laskenta

Räjähdyksessä säiliöstä tai laitteesta vapautuu palanutta ja palamatonta materiaalia sekä liekkejä. Räjähdyspaineen kevennyslaitteet tulisi suunnata niin, että niistä ei ole vaaraa läheisille laitoksen osille tai henkilöstölle. Räjähdyspaineelle on siis jätettävä tarpeeksi paljon tilaa purkautua, että se ei aiheuta lisäpaloja tai räjähdyksiä muissa prosessilaitteissa, myös henkilöstön pääsy tälle alueelle räjähdysvaaran aikana on estettävä. Turvallista etäisyyttä miettiessä voidaan mahdollinen liekkien pituus laskea kaavalla 4. (SFS-EN 14491, 30.)

$$L_F = 10V^{1/3} \quad (\text{kaava 4})$$

Jossa L_F on liekinpituus metreinä ja V on tilan tilavuus neliömetreinä. Yllä kuvattu kaava pätee, jos räjähdyspaineen kevennys on kohdistettu vaakasuuntaan. Kun räjähdyspaineen kevennys on suunnattu ylöspäin, käytetään kaavaa 5. (SFS-EN 14491, 30.)

$$L_F = 8V^{1/3} \quad (\text{kaava 5})$$

Vaara-alueiden kokoa arvioidessa on yksi helpottava tekijä, että liekkiä pituus ei kuitenkaan yllä yli 60 metriin edes suurilla tilavuuksilla, tätä rajaa voidaan pitää L_F arvon ylärajana (SFS-EN 14491, 32). Liekin kokoa voidaan myös rajoittaa erilaisilla liekin suuntauslevyillä ja liekin tukahduttamalla, joista puhutaan enemmän luvussa 5.

Molempia yhtälöitä pätevät samat reunaehdot:

- Tilan koko $0,1 \text{ m}^3 \leq V \leq 10\,000 \text{ m}^3$.
- Staattinen toimintapaine $0,1 \text{ bar} \leq p_{stat} \leq 0,2 \text{ bar}$.
- Suurin kevennetyn räjähdysten ylipaine $0,1 \text{ bar} < p_{red,max} \leq 2 \text{ bar}$.
- Suurin räjähdysten ylipaine $5 \text{ bar} \leq p_{max} \leq 10 \text{ bar}$.
- K_{St} -arvo $10 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \leq K_{St} \leq 300 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.
- Säiliön pituuden suhde halkaisijaan $L/D \leq 20$. (SFS-EN 14491, 30.)

Liekin leveyden laskennassa käytetään kaavaa 6. Kaava pätee niin pituus- ja leveys-suuntaisen liekin leveyden laskentaan.

$$W_F = 2,8V^{1/3} \quad (\text{kaava 6})$$

4.3 Painevaikutukset ja ulkopuolisen räjähdyspaineen laskenta

Räjähdysten synnyttämän paineaallon ulkopuolista vaikutusaluetta ja voimakkuutta voidaan arvioida laskennallisesti kaavalla 7. Laskennassa on otettava huomioon niin säiliön sisäpuolisen räjähdysten kevennetty räjähdyspaine, kuin mahdollinen säiliön ulkopuolella tapahtuva pölyräjähdysten paine. Molempien tapausten paine on laskettava ja käytettävä laskennasta saatua suurempaa painearvoa. (SFS-EN 14491, 32.)

$$p_{ext,max} = 0,2 * p_{red,max} * A_V^{0,1} * V^{0,18} \quad (\text{kaava 7})$$

Jossa $p_{ext,max}$ (bar) kuvaa suurinta ulkopuolista painetta, joka syntyy räjähdyksessä, $p_{red,max}$ (bar) on suurin kevennys räjähdyspaine, A_V on kevennyspinta-ala (m^2) ja V on säiliön tilavuus (m^3) (SFS-EN 14491, 32).

Paine on suurimmillaan tietyn matkan päässä laitteesta. Etäisyyden laskennassa käytetään liekin pituus arvoa L_F , tätä arvoa hyödyntämällä saadaan laskettua matka metreinä kaavasta 8. (SFS-EN 14491, 32.)

$$R_s = 0,25 * L_F \quad (\text{kaava 8})$$

Räjähdyks alkua menettämään painetta, kun paineen matka ylittää R_s kaavasta saadun etäisyyden jälkeen. Tämän jälkeen paine häviötä matkalla voidaan laskea kaavalla 9. Kaavassa r toimii etäisyytenä kevennyslaitteesta. (SFS-EN 14491, 33.)

$$p_{ext,r} = p_{ext,max}(R_s/r)^{1,5} \quad (\text{kaava 9})$$

Kevennetyn räjähdysten synnyttämä ylipaineen paine tietyn matkan päässä lasketaan kaavalla 10 (SFS-EN 14491, 34).

$$p_{ext,r} = 1,24 * p_{red,max} * (D/r)^{1,35} / [1 + (\alpha/56)^2] \quad (\text{kaava 10})$$

Jossa D on kevennyslaitteen hydraulinen halkaisija (m) ja α on poikkeama kevennyspaineen purkusuunnasta asteina kun:

- $\alpha = 0^\circ$ suoraan purkusuunnasta.
- $\alpha = 90^\circ$ sivusuunnassa. (SFS-EN 14491, 34.)

Yhtälön reunaehdot ovat kaikissa yllä kuvatuissa yhtälöissä:

- Säiliön tilavuus $0,1 \text{ m}^3 \leq V \leq 250 \text{ m}^3$.
- Kevennyslaitteen staattinen toimintapaine $p_{stat} \leq 0,1 \text{ bar}$.
- Suurin kevennetyn räjähdysten ylipaine $0,1 \text{ bar} < p_{red,max} \leq 1 \text{ bar}$.
- Etäisyys kevennyslaitteesta $r > R_s$.
- Suurin räjähdysten ylipaine $5 \text{ bar} \leq p_{max} \leq 10 \text{ bar}$.
- K_{St} -arvo $K_{St} \leq 200 \text{ bar} \cdot \text{ms}^{-1}$.
- Säiliön pituuden suhde halkaisijaan $L/D \leq 2$ (SFS-EN 14491, 34.)

4.4 Rekyilin ja tyhjiön laskenta

Rekyylivoimia syntyy, kun räjähdysmateriaali ja liekit karkaavat räjähdyskevennysaukosta paineenkevennyksen aikana. Rekyyli siis aiheuttaa vastasuuntaista voimaa räjähdyksestä vastakkaiseen suuntaan. Tällaiset voimat saattavat vaurioittaa säiliön tukirakenteita tai pahimmassa tapauksessa aiheuttaa romahduksen. Näitä voimia voidaan mahdollisesti kompensoida asentamalla räjähdyskevennyslaitteiden vastakkaiselle puolelle rekyylivoimille oma kevennyslaitte ja näin kompensoida rekyylivoimia. Vaarana voimien voimatasapainottamisessa voi olla se, että rekyylivoimalle tarkoitettu kevennyslaite aukeaa ensin ja näin päästää räjähdyskevennysaukosta vääriin suuntaan. Rekyylivoiman suuruus voidaan laskea kaavalla 11. (SFS-EN 14491, 36.)

$$F_{Rmax} = 119 * A_V * p_{red,max} \quad (\text{Kaava 11})$$

Jossa F_{Rmax} kuvaa rekyylivoiman suuruutta (kN), A_V on kevennyspinta-alan koko (m²) (SFS-EN 14491, 36).

Rekyylivoimien ajallista kestoa t_R , voidaan arvioida kaavalla 12. Tämä helpottaa joitakin tukirakenteiden suunnittelussa (SFS-EN 14491, 36).

$$t_R = (K_{St} * V * 10^{-4}) / (A_V * p_{red,max}) \quad (\text{Kaava 12})$$

Tyhjiö

Räjähdyskevennysaukun jälkeen palotapahtuma polttaa ilman säiliön sisältä pois ja näin syntyy tyhjiö, joka voi vaurioittaa tai romahduttaa säiliön. Tästä syystä on varmistettava säiliölle tarpeellisen suuri korvausilman saanti. Säiliön vaarallisen alipaineen voi välttää, varustamalla säiliö tyhjiön estävällä laitteella. Tyhjiölaitteelle pitää laskea kaavalla 13 tarpeellinen tehollinen imuaukon koko A_{suc} (m²). (SFS-EN 14491, 38.)

$$A_{suc} = [-0,00219x \ln p_{vac} + 0,014] * V^{(-0,0207 * \ln p_{vac} + 0,8147)} \quad (\text{Kaava 13})$$

Jossa p_{vac} on säiliön tyhjiökestävyys (mbarg) ja V on säiliön tilavuus (m^3). Kaavan reuna-
ehtoja ovat:

- Säiliön tilavuus $5 m^3 \leq V \leq 5000 m^3$.
- Säiliön tyhjiökestävyys $25 mbarg \leq p_{vac} \leq 500 mbarg$. (SFS-EN 14491, 38.)

5 Räjähdyspaineen kevennys

5.1 Vaatimukset

SFS 14797 standardi asettaa tiettyjä vaatimuksia räjähdyspaineen kevennyslaitteille. Kevennyslaitteet ovat turvalaitteita, jotka sisältävät paineeseen reagoivan osan (metallikalvo). Osan tarkoituksena on hajota tai aueta räjähdysten muodostamasta paineesta ja näin päästää räjähdyspaine ulos laitteesta suunniteltuun suuntaan vahingoittamatta laitteita, rakennuksia tai työntekijöitä mahdollisimman vähän. Laitteiden suunnittelussa on otettava huomioon, että luukku tai kalvo ei hajoa pieniin osiin ja aiheuta loukkaantumisvaaraa henkilöille leviämislänsä, tästä syystä esimerkiksi ikkunan käyttö räjähdysten kevennyksenä ei ole suositeltavaa. Luukut on suunniteltava niin, että mikään osa jonka ei pidä irrota räjähdyksessä ei saa irrota tai murtua. Luukkujen materiaali on valittava niin, että se soveltuu prosessissa käytettäviin kemiallisiin ja mekaanisiin olosuhteisiin, myös lumikuormat on otettava huomioon. Kevennyslaitteiden osien, jotka vapautuvat tai hajoavat, on oltava kertakäyttöisiä tai uudelleenkäytettävissä. (SFS-EN 14797, 14.)

5.2 Rakenteet

Kevennyslaitteita on kahdenlaista tyyppiä, uudelleen käytettävät ja kertakäyttöiset luukut, jotka eroavat toisistaan hieman uudelleen toimintakuntoon laittamisen kohdalla räjähdysten jälkeen. Uudelleen käytäviä rakenneosia sisältävät kevennyslaitteet ovat tyyppillisesti laitteita, jotka voidaan virittää uudelleen käyttöön räjähdysten jälkeen automaattisesti tai kohdistamalla laitteen pidikkeet uudelleen. Kertakäyttöisiä kevennyslaitteita ovat laitteet, jotka keventäessään painetta eivät ole enää uudelleen käytettävissä ilman uusimalla laitteen rakenneosia (kalvoa tai kiinnikkeitä). (SFS-EN 14797, 14–16.)

Kevennyslaitteiden osat ovat merkittävä pysyvin merkein, joista selviää valmistaja, tyyppi-merkinnät, kevennyslaitteet, nimellimitat, valmistusvuosi, valmistuserä, ominaismassa, staattinen toimintapaine, laiteryhmä, suurin K_{st}/k_G -suhde ja p_{red} -arvo. Jos merkintöjä ei ole mahdollista merkitä kevennyslaitteeseen sen koon, muodon tai toimivuuden takia, on tällöin tyyppimerkinnät tehtävä laitekohtaiseen viittaus asiakirjaan. (SFS-EN 14797, 30–32.)

Kevennyslaitteet on tarkistettava vähintään kerran vuodessa pätevän henkilön toimesta, mutta huonojen ympäristö- tai prosessiolosuhteiden takia pitää tarkistuksia suorittaa useammin. Kevennyslaitteiden huolto sisältää kertakäyttöisten luukkujen kertakäyttöisten osien vaihtamisen sekä säätötoimenpiteiden suorittamisen. Kaikki luukkuihin suoritettut toimenpiteet täytyy kirjallisesti kirjata käyttöpäiväkirjaan aikajärjestyksessä, ja kirja tulee pysyä

asennushenkilöstön hallussa. Kirjaukset tekevän henkilön täytyisi oltava käyttäjä tai opastamansa käytöstä vastaava henkilö. (SFS-EN 14797, 46.)

Painovoimaisesti uudelleen sulkeutuvat kevennyslaitteet

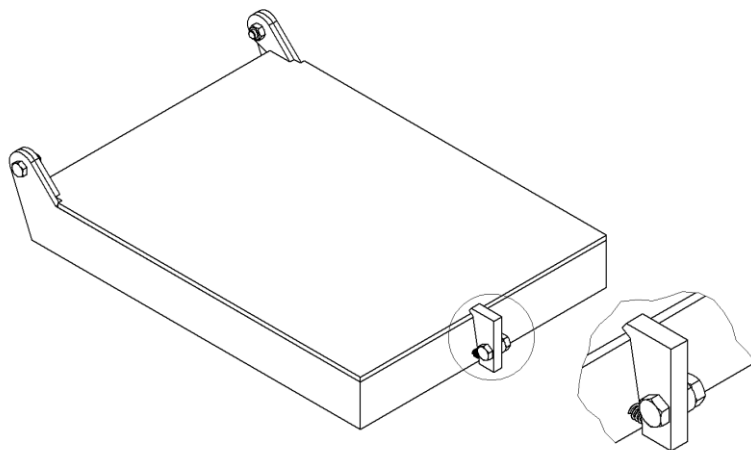
Painovoimaisesti toimivat kevennysluukut on saranoitu yhdestä pisteestä ja painovoima pitää peitelevyä tiiviisti aukon suojana. Painovoimaiset luukut palautuvat omasta painostaan takaisin aukon päälle räjähdysen jälkeen ja ovat näin taas uudelleen käytettävissä. Painovoimaisissa luukuissa ei ole hajoavia tai vaihdettavia osia, jotta luukku voisi käyttää uudestaan, mutta luukun toiminta täytyy silti varmistaa ja todeta että kaikki luukun osat ovat kunnossa. Peitelevy voi olla tiivistetty aukon päälle tai kehyksen sisään. Painovoimaisten luukkujen sijoittelussa laitteeseen on kiinnitettävä erityistä huomiota, jotta luukku toimii oikein. (SFS-EN 14797, 34.)

Alipaineen syntyminen räjähdysen jälkeen on painovoimaisissa luukuissa suuri, alipaineen kevennetty luukku pitäisi myös varustaa alipaineen keventimellä, jottei vaarallista alipainetta pääsisi muodostumaan laitteeseen ja vaurioittaisi laitteen rakennetta. Luukun toiminta perustuu painovoimaan ja saranoidun luukun painoon, joka toimii staattisen paineen vastustajana, luukun painoa muuttamalla on mahdollista muuttaa staattista avautumispainetta.

Jousikuormitetut kevennysluukut

Jousikuormitettujen (kuva 2) luukkujen toiminta perustuu jousijännitteiseen kiinnityspidikeeseen, joka vapautuu valmistajan ilmoittaman staattisen käyttöpaineen ylittyessä. Jousikuormitetuissa luukuissa ei ole hajoavia osia, tämän takia luukut sulkeutuvat automaattisesti räjähdysen jälkeen ja ovat heti uudelleen käytettäviä. (SFS-EN 14797, 34.)

Jousikuormitetun luukun käytössä on huomioitava alipaineen muodostuminen räjähdysen jälkeen ja kevennettävä laite on myös varustettava alipaineen kevennyksellä.

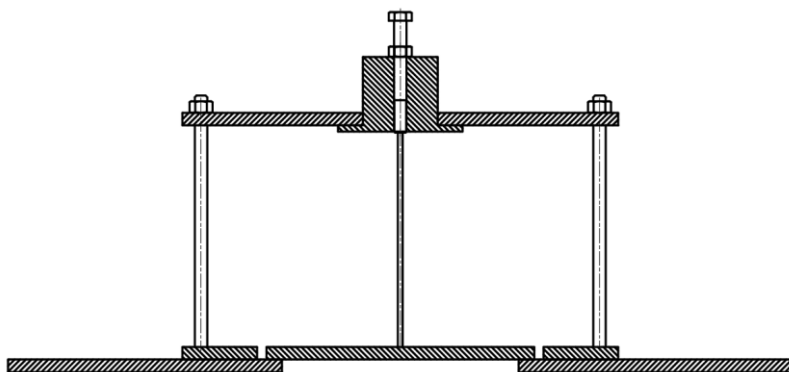


Kuva 2. Jousikuormitteinen kevennysluukku

Nurjahdussauva kevennysluukku

Nimensä mukaan nämä luukut käyttävät nurjahtavaa hoikkasauvaa, joka on suunniteltu nurjahtamaan valmistajan ennalta määrättyssä staattisessa paineessa ja näin vapauttaa räjähdyspaineen (kuva 3). Nurjahdussauva kevennysluukku rakentuu kolmesta perusosasta. Kevennysluukku, joka sulkee ja tiivistää laitteen kevennysaukon päälle. Rungosta, joka estää luukun liikkumisen muihin suuntiin kuin nurjahdussauvan suuntaisesti. Kolmas osa on hoikkasauva, joka toimii hajoavana osana, kun paine laitteen sisällä kasvaa liian suureksi.

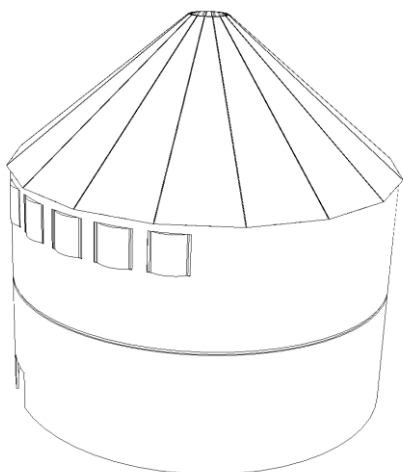
Nurjahdussauvan toiminta perustuu nurjahdukseen eli sauva on pitkä ja kapea, joka helpottaa sauvan nurjahdusta. Sauva on asennettava valmiiksi jo pienen jännitykseen, joka varmistaa sauvan toiminnan räjähdystilanteessa. Nurjahdussauvan materiaali, koko ja räjähdysaukon pinta-ala vaikuttavat sauvan mitoittamiseen. Nurjahdussauva luukut ovat kertakäyttöisiä ja jokaisen hallitun paineen purun jälkeen luukkuun on vaihdettava nurjahdussauva, jotta luukkua voidaan käyttää uudelleen. Tästä syystä luukku ei ole uudelleen sulkeutuva luukku. (SFS-EN 14797, 36.) Nurjahdusluukut jäävät auki räjähdysten sattuessa ja näin laitteen korvausilman saanti on turvattu.



Kuva 3. Nurjahdussauva luukun poikkileikkaus (mukailtu SFS-EN 14797, 36)

Murtolevyllä varustetut luukut

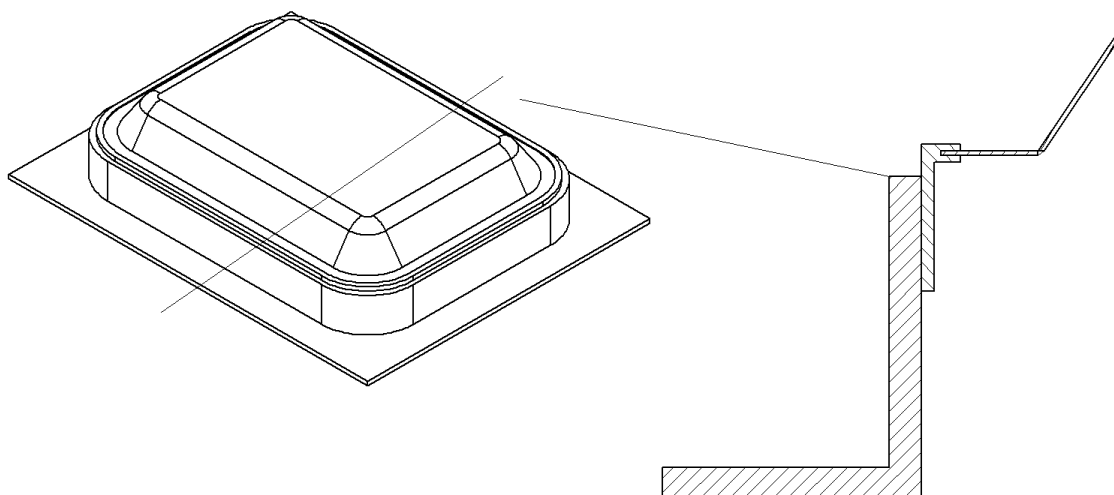
Murtolevylliset luukut (kuva 4) ovat rakenteeltaan yksinkertaisia ja sisältävät yleensä vain laitteen rungon ja tasaisesti runkoon pultattavan levyn. Levyt ovat normaalisti ohuita teräslevyjä, jotka murtuvat hallitusti laitevalmistajan suunnitellulla tavalla. Murtolevyt ovat kertakäyttöisiä ja näin ollen räjähdysen jälkeen levyosa on korvattava uudella levyllä. (SFS-EN 14797, 40.) Murtolevyllisen luukun alipaineen syntymisen vaaraa ei tarvitse huomioida, sillä luukku jää räjähdysen jälkeen auki.



Kuva 4. Murtolevyjä voidaan asentaa siilon kylkeen

Ponnahduslevylliset luukut

Ponnahdusluukut eivät sisällä saranoita eikä laitteiden toiminta perustu levyn hajoamiseen vaan sen irtoamiseen kumihuuli tiivisteestä. Luukun osia ovat runko, ponnahduslevy ja pidätintiiviste. Kuvassa 5 on esitetty yksinkertainen rakenne ponnahduslevyllisestä luukusta. Ponnahduslevy on kiinnitetty laitteen runkoon reunatiivisteiden avulla. Tiiviste on joustavaa materiaalia, joka taipuu paineen vaikutuksesta ja vapauttaa ponnahduslevyn. Tiivisteiden materiaali vaikuttaa luukun avautumispaineeseen. (SFS-EN 14797, 40.) Ponnahduslevylliset luukut sisältävät uudelleen käytettäviä osia ja ovat uudelleen käytettävissä räjähdyspaineen vapautuksen jälkeen. Koska luukku on kerta-aukeava ja vaatii uudelleen virittämistä, ei laitteen sisälle ole alipaineen muodostumisvaaraa.



Kuva 5. Ponnahduslevyllinen luukku

Vastapainetuki

Tapauksessa, jolloin ulkoinen paine on suurempi kuin paine suojattavan laitteen ulkopuolella, on laite varustettava vastapainetuella, jotta kevennyslaite ei vaurioituisi ulkopuolisesta paineesta. Vastapainetuki on kiinnitettävä pysyvästi kevennysluukkuun ja se on asennettava puolelle, jolla tukea tarvitaan. Vastapainetuki ei saa vaikuttaa luukun normaalin toimintaan virheellisesti. Tämä on otettava huomioon luukkuun suunniteltaessa, koska

kevennyslaitteet vaikuttavat kevennyspinta-alaan ja kevennyslaitteen hyötysuhteeseen. (SFS-EN 14797, 16.)

Paineen purku rakenteellisesti

Paine on mahdollista purkaa laitteista myös rakenteellisesti heikentämällä laitetta tai rakennusta. Rakennuksen seinien ja katon heikentäminen, niin että räjähdyspaine murtaa suunnitellun murtuvan rakenteen ja vapauttaa räjähdyspaineen ja suojaa rakennuksen tai laitteen kantavia rakenteita. Kevennetyt rakenteet täytyy sijoittaa tasaisesti rakennuksen seinä- ja kattopinnoille, jotta kevennys toimisi saman aikaisesti räjähdysten sattuessa ja näin keventäisi räjähdyspaineen purkua tehokkaasti. Kun räjähdyspaineen purku toteutetaan rakenteita keventämällä, on kiinnitettävä huomiota lumen ja jään kertymiseen kevennetyjen laitteiden päälle, jotka voivat heikentää laitteen toimivuutta. (Valkama 2017, 43.)

Räjähdyksen tukahdutus

Räjähdyks on mahdollista myös tukahduttaa räjähdysten tukahduttamisjärjestelmillä. Laitteiden toiminta perustuu siihen, että laitteisto havaitsee räjähdysten jo ennen kuin se kehittyy liikaa painetta ja vaurioittaa suojattavaa laitetta. Laitteisto havainnoi paineen nousua ja räjähdysliekkiä, kun laite havaitsee räjähdysten alkaneen laite vapauttaa nopeasti sammutusaineen laitteen sisään ja tukahduttaa näin räjähdysten. Tukahdutuslaitteiden etu on paikoissa, joissa paineen purkua ulos laitteesta ei voida toteuttaa. Nämä laitteet sopivat sisätiloissa käytettäviksi. Laitteet ovat yksinkertaisia ottaa käyttöön, eivätkä ne edellytä suuria muutoksia laitteisiin. Kuvassa 6 nähdään kuinka panokset vievät vain pienen tilan laitteen sivuilta. (VST Engineering.)

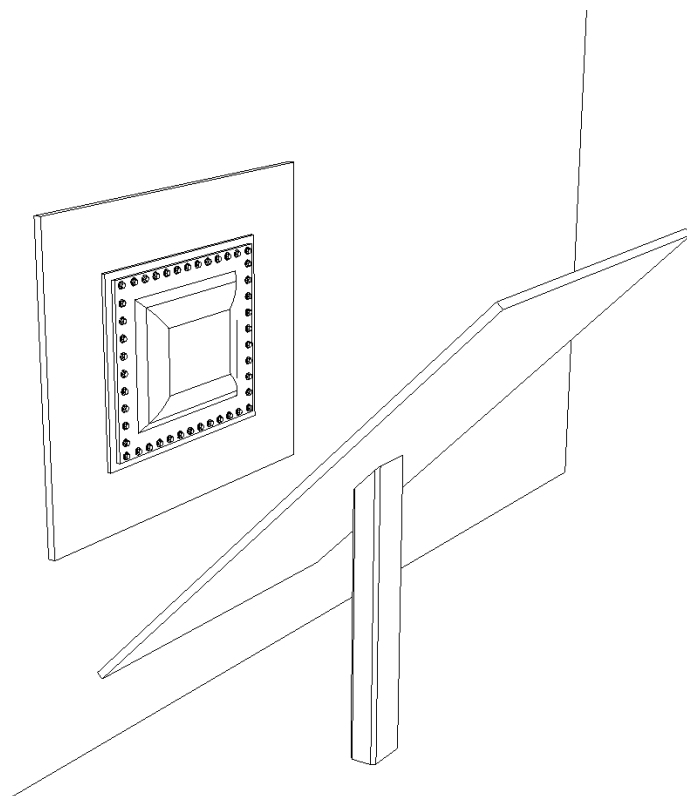


Kuva 6. Tukahdutuspanokset kuljettimen sivuilla (VST Engineering)

Suuntauslevyt

Suuntauslevyjen tarkoituksena on suunnata räjähdyksessä syntyvä ulkopuolinen liekki turvalliseen suuntaan ja lyhentää liekin aksiaalista pituutta. Vaikka suuntalevyjen käyttö pienentää vaara-aluetta on mahdollisuus, että liekki kiertää levyn sen sivuilta. Näin ollen levyn takana olevaa aluetta ei voida pitää täysin turvallisena. Ohjaavilla suuntalevyillä ei oleteta olevan suurta vaikutusta ulkopuolisiin paineiskuihin. (SFS-EN 14491, 64.)

Levyjä suunniteltaessa tulisi levyn pinta-alan olla vähintään kolminkertainen kevennyspinta-alan nähden ja päämittojen 1,6 kertaiset. Suuntauslevy tulee asentaa kulmaan lattiapintaan nähden 45°- 60° välille, jotta liekit suuntautuisivat ylöspäin. Suuntauslevyt on asetettava tarpeen etäälle kevennysaukoista, jotta levyt eivät vaikuta kevennyslaitteen toimintaan tai nostata kevennyspainetta. Levyjen asennus liian kauaksi kevennysaukostaan ei ole optimaalinen ratkaisu, sillä ohjeistuksen mukaan levyt tulisi sijoittaa $1,5 * H_{alkasija}$ jotta hyöty olisi mahdollisimman suuri. Levyn täytyy kestää räjähdyksestä syntyvä paine ja levy täytyy mitoittaa niin, että se kestää voiman hajoamatta, joka lasketaan kertomalla maksimi kevennetty räjähdyspaine suuntauslevyn pinta-alalla. Huomaa kuitenkin, että yllä esitetyt laskentaohjeet pätevät ainoastaan alta 20m³ kokoisille säiliöille. (SFS-EN 14491, 64.)



Kuva 7. Liekin suuntauslevy asetettu kevennysaukon eteen

Liekintukahdutus

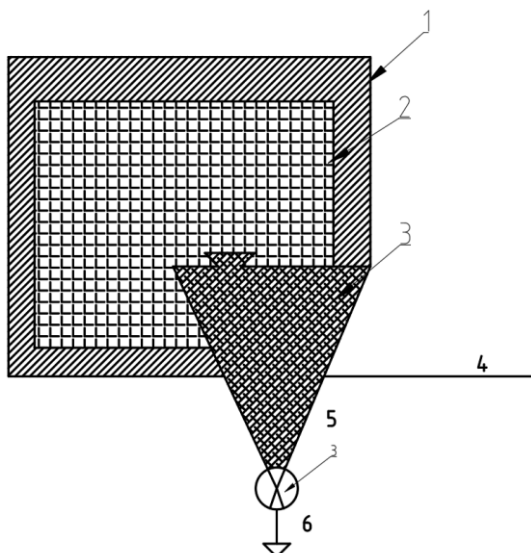
Räjähdyksen ulkopuolisen liekin tukahduttamiseen voidaan käyttää liekintukahduttimia, jotka paksun suodatinkankaansa ansiosta tukahduttavat liekin eikä näin ollen päästä liekkiä ympäristöön. Liekintukahduttimet asennetaan räjähdysten kevennyslaitteiden päälle. Päälle asennuksella saattaa olla vaikutusta kevennysluukun toimivuuteen ja tämä on huomioitava suunnitellessa kevennyslaitetta. Yleensä liekintukahduttimet suunnitellaan kokonaisuuksiksi, jossa itsessään on liekintukahdutin ja räjähdyspaneeli.

5.3 Dokumentointi

Tilaluokitusdokumentit sisältävät kaikki tasopiirustukset poikkileikkauksineen, joista selviää tilaluokan laajuus ja tilaluokka tyyppi, pölykerrokset, pölykerrosten sallitut paksuudet ja pölyn pienin syttymislämpötila. Dokumentoinnissa tarvitsee myös näkyä muita merkitseviä tietoja:

- Päästölähteiden sijainnit ja tunnistustiedot. Isoissa laitoksissa, joissa on monia päästölähteitä, olisi hyvä numeroida päästölähteet helpottamaan tilaluokituspiirustusten tiedostojen lukemista varten.
- Siivous ja ehkäisevät toimet, jotka ovat määrittäneet tilaluokituksen.
- Ohjeistukset tilaluokituksen ylläpitämiseksi ja säännölliseksi tarkistamiseksi että muutoskäytännöksi, kun prosessiaineet, menetelmät ja laitteet muuttuvat.
- Tilaluokitusten jakeluluettelo.
- Perustelut joihin tilaluokkien ja pölykerrosten tyypistä ja laajuudesta on perustettu. (SFS-EN 14797, 16.)

Kuvassa 8 on esimerkki, kuinka tilaluokitukset tulisi merkitä, selvyyden vuoksi merkintätavat voivat olla erilaisia. Kuvassa on suursäkkien tyhjennyspaikka ilman paikallispoistoa, kuvaan on merkitty numeroin tilaluokat joista 1 on tilaluokka 22, 2 on tilaluokka 21, 3 on tilaluokka 20, 4 lattia, 5 säkkien tyhjennyspöly, 6 lähtö venttiili prosessiin. (SFS-EN 14797, 21.)



Kuva 8. Suursäkkien tyhjennyspaikka (mukailtu SFS-EN 14797, 21)

5.4 Kevennyslaitteiden testaus, paine ja mekaaninen toimivuus

Kaikille räjähdyspaineen kevennyslaitteille on tehtävä tyyppitestit sekä rakennearviointi varmistamaan toiminta- ja laitekokonaisuus, hyötysuhde (tarvittaessa) ja staattinen toimintapaine. Staattinen ja mekaaninen kestävyys on todennettava. (SFS-EN 14797, 16.)

Staattinen toimintapaine voidaan mitata joko painetestillä tai mekaanisella testimenetelmällä. Laitteen staattinen toimintapaine saavutetaan, kun paineen purkautuminen alkaa tai kun kevennysluukun pidike vapautuu. Testissä saadut staattisen toimintapaineen arvot on kirjattava. Staattista toimintapainetta testattaessa sisä- ja ulkopuolisen paineen täytyy olla sama lähtötilanteessa. Lämpötilavaikutukset on huomioitava testejä tehdessä. Normaali lämpötila on 15–25 astetta, mutta jos staattinen toimintapaine on riippuvainen lämpötilasta, on tämä määritettävä laitteen käyttöpaikan lämpötila-alueen mukaan. (SFS-EN 14797, 18.)

Painetestissä luokkuun kohdistetaan tasaisesti painetta ensin 5 sekunnin paineistuksella 90 prosenttia määritellystä alimmasta toimintapaineesta, tämän jälkeen painetta nostetaan tasaisella nopeudella, mikä mahdollista painemittarin tarkan havaitsemisen, kun paine viimein purkaantuu. Enimmäinen paineen nostoaika on 120 sekuntia. Testaus täytyy suorittaa testaukseen tarkoitetuilla ja kalibroituilla painemittareilla. (SFS-EN 14797, 18.)

Mekaanisessa menetelmässä kevennyslaitteeseen kohdistetaan tasaista mekaanista voimaa, voiman täytyy olla kohtisuoraan luukkuun nähden ja voiman kohdistuspiste määräytyy kevennyslaitteen rakenteen mukaan. Mekaanisen voiman täytyy kohdistua staattisesti

luokkuun nähden $10\text{kN m}^{-2}\text{min}^{-1}$) Sekä paine että mekaaninen testi on suoritettava erityistä turvallisuutta noudattaen. (SFS-EN 14797, 18.)

Kertakäyttöisiä osia käyttävät kevennysluukut täytyy testata tietty määrä riippuen luukkujen valmistusmäärästä taulukon 1 mukaisesti (SFS-EN 14797, 20).

Painetestattavien laitteiden määrät

Valmistusmäärä	Testattavien laitteiden määrä
Alle 10	2
10–15	3
16–30	4
31–100	6
101–250	4 % mutta vähintään 8
251–1000	3 % mutta vähintään 10

Taulukko 1. Painetestattavien laitteiden testausmäärät (mukailtu SFS-EN 14797, 20)

Testattavien luukkujen on oltava kustakin erästä satunnaisesti valittuja. Kuitenkaan valmistuksesta poistettuja tai koetestikappaleita ei saa käyttää osana testejä, jotta varmistetaan testien paikkansapitävyys. Jokainen kevennyslaite, jossa on uudelleen käytettäviä osia on staattisen toimintapaineen kokeet suoritettava kolme kertaa. Kaikkien tulosten on jäätävä valmistajan staattisen paineen arvon toleranssin alapuolelle, muuten koko valmistuserä on merkittävä hylätyksi. (SFS-EN 14797, 20.)

5.5 Räjähdykset

Räjähdykset on tehtävä, jotta pystytään arvioimaan laitteen mekaaninen kestävyys ja toiminta räjähdystilanteessa. Räjähdyksiä on suoritettava vähintään kaksi kappaletta jokaista luukua kohden ja mekaanisen kestävyuden vaatimuksena on, että mikään osa, jonka ei kuulu irrota ei irtoa räjähdystestien aikana. Kaikki räjähdykset on dokumentoitava. Räjähdykseteissä määritellään kevennyslaitteen mekaaninen lujuus ja paineenkevennyksen hyötysuhde. Valmistajan täytyy määrittellä tietyt suunnitteluarvot: Nimelliskokoalue p_{stat} -arvo, suurin K_{st}/k_G -suhde, p_{max} -arvo ja p_{red} -arvo. (SFS-EN 14797, 20.)

Kun tyyppitestattavat kevennyslaitteet ovat samanlaisia mutta eri kokoisia, ei kaikkia kokoja tarvitse testata, vaan testiin valitaan pienin ja suurin. Jos erikokoja on enemmän kuin viisi kappaletta, testiin valitaan vähintään yksi välikoko. (SFS-EN 14797, 20.)

Räjähdyksetissä käytettävän räjähdysastian purkuaukko ei saa olla suurempi kuin testattavan luukun aukko. Astian ja luukun välillä saa käyttää adapteria, jotta osat saadaan

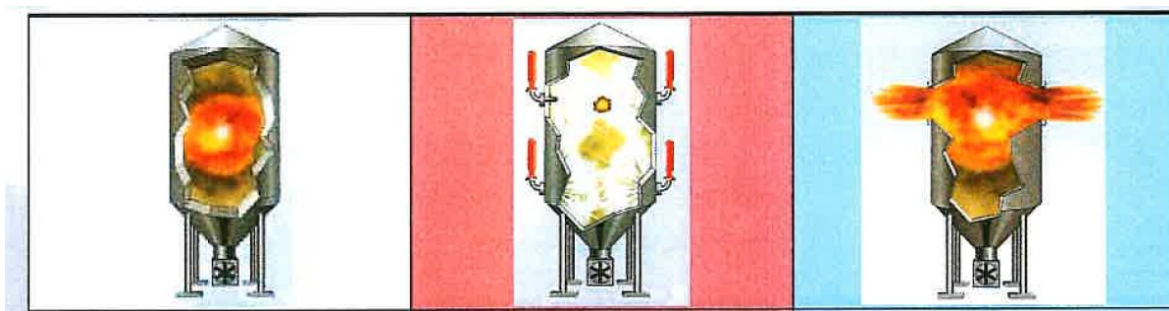
toisiinsa kiinni. Testauslaitteen on kestävä ainakin 1.1x suurin paine, jota testattavan laitteen tulisi kestää. (SFS-EN 14797, 20.)

6 Vaihtoehtoinen paineenpurku tapa

6.1 Räjähdyssuojauskeinot

Toimeksiantajayritys halusi tutkia millaisia mahdollisuuksia olisi toteuttaa vaihtoehtoisesti siilojen räjähdyspaineen purku nykyisten räjähdyskalvojen sijaan. Haluttiin löytää ratkaisu, joka pystyttäisiin sulauttamaan polttoainesiilojen rakenteeseen ja näin saada säästöjä siilojen valmistuksessa ja materiaalikustannuksissa.

Paineen purun kannalta ajatellen tapauksessa on teoriassa kolme vaihtoehtoa toteuttaa räjähdysuojaus. Kuvassa 9 on kolme erilaista tapaa toteuttaa suojaus.



Kuva 9. Räjähdyssuojaus kolmella tavalla (Rembe 2017)

Vaihtoehto 1 toteuttaa rakenne niin, että laite pitää räjähdyspaineen täysin sisällään. Tällaista rakennetta kutsutaan paineastiaksi. Siilon muuttaminen paineastiaksi olisi käytännössä todella kallista eikä järin järkevää.

Vaihtoehto 2 olisi käyttää räjähdysten tukahduttajia, jotka havaitsevat räjähdysten alkamisen ja näin tukahduttavat alkaneen räjähdyspaineen.

Vaihtoehto 3 jota käsitellään tässä opinnäytetyössä, on toteuttaa räjähdyspaineen purku joko paineenpurkulaitteella tai rakenteellisesti heikentämällä laitetta.

Laskenta ja paineenpurun toiminnan arviointi

Ensimmäiseksi pitää selvittää, kuinka paljon kevennyspinta-alaa silo tarvitsee, jotta paineen kevennystä voidaan suunnitella. Kun tarvittava kevennyspinta-ala on laskettu, voidaan alkaa miettimään, miten ja mihin kohtiin siiloa paineen kevennyslaite sijoitetaan. Laskelmista saatu kevennyspinta-ala voidaan jakaa pienempiin osiin. Tämä helpottaa huomattavasti räjähdys- ja painetestien tekoa, sillä tällöin kevennyspinta-ala pienenee.

Esimerkiksi siilon katosta ei tarvitse tässä tapauksessa testata kuin yksi sektori, jos katon paineenpurku on jaettu tasaisesti katolle.

Toisessa vaiheessa täytyy miettiä, kuinka kevennyslaite tulee toimimaan eli mikä osa antaa periksi räjähdysten sattuessa ja miten. Tämän tiedon pohjalta voidaan suunnitella missä paineessa luukku vapautuu. Valmistajien räjähdysluukkujen normaali avautumispaine on 0,05 bar, joten tätä painetta on hyvä käyttää mitoittavana arvona, kun mietitään luukun vapautumispainetta, standardin vaatima avautumispaine on 0,1 bar.

Kun lähdetään suunnittelemaan rakenteellisia tai erillisillä luukuilla tapahtuvaa paineenpurkua, on suunnittelussa huomioitava, että paineenpurun yhteydessä laite ei saa murtua sinkoutuviin osiin. Myös talviolosuhteet on otettava huomioon ja varmistettava, että paineenpurkulaitteeseen ei vaikuta talvisilla keleillä laitteen päälle kertyvä lumi. Yleensä lumesta ei ole vaaraa, sillä katot ovat jyrkkiä ja näin ollen lumi ei kerry katolle suuriksi taakoiksi.

Paineenpurun toiminnan testaus

Suojapeitteen käyttö paineenpurkuna vaatii standardin SFS-EN 14797 mukaiset räjähdys- ja painetestit, joilla varmistetaan painepurkulaitteen oikea toiminta räjähdystilanteessa. Testit voidaan suorittaa siilon katolle pelkästään peitteen osalta, jolloin koko kattoa ei tarvitse testata, vaan siihen riittää vain yhden suojapeitteellä varustetun kattolohkon testaus.

Staatteisella painetestillä varmistetaan luukun toiminta eli testillä varmistetaan, että luukku aukeaa valmistajan tarkoittamalla tavalla. Testejä täytyy suorittaa taulukon 1 mukaan, joka kertoo monta kevennyslaitetta, on valmistettavista testattava. Kaikkia lohkoja ei tarvitse testata, vaan siihen riittää taulukon mukainen määrä valmistettua paineen kevennysluukku kohden.

Räjähdystestin avulla nähdään, miten luukku käyttäytyy räjähdystilanteessa sekä pystytään toteamaan, että laite toimii oikein. Räjähdys kevennyslaite ei pirstaloidu pieniin palasiin ja aiheuta vaaraa ulkopuolelle. Räjähdystestiä ei tarvitse suorittaa kaikkiin eri koon siilojen räjähdys kevennyslaitteisiin, mutta standardin mukaiset testit tulee suorittaa pienimmälle sekä suurimmalle kevennyslaitteelle. Tämän jälkeen, kun räjäytys- ja painetestaus on suoritettu ja todettu että laite kykenee vapauttamaan räjähdyspaineen pois laitteen sisältä suunnittelussa paineessa ja avautuu oikein, on laite standardien näkökulmasta katsottuna turvallinen.

6.2 Kattopeltien kiinnittäminen hajoavilla pulteilla

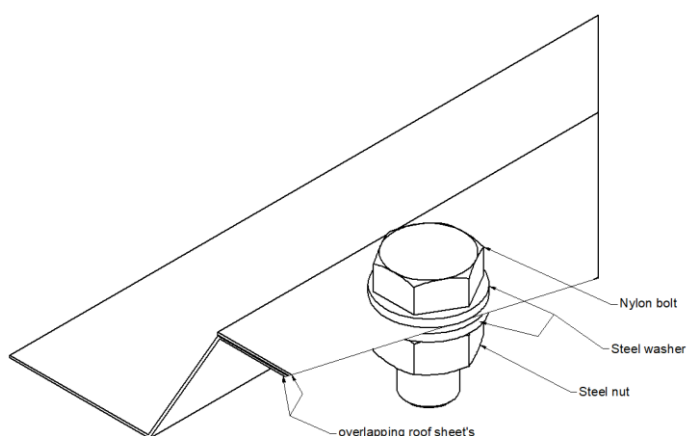
Markkinoilla oleva valmistaja Symaga Silos on ratkaissut räjähdyspaineen purkuongelman korvaamalla osan siilon kattopeltien kiinnityspulttien materiaalin muovilla. Pulttien tarkoitus

on normaalitilanteessa pitää kattopellit paikoillaan, mutta räjähdystilanteessa pulttien on tarkoitus murtua ennalta määrättyssä räjähdyspaineesta. (Symaga Silos 2017.) Suomen sääolosuhteissa voi ongelmia olla talvisin kylmillä keleillä pultin kestävyys kannalta ja pultit voivat hajota helpommin. Peltien kiinnityksessä on huomioitava se, että yksi laita pelleistä täytyy kiinnittää metallisilla pulteilla, että kattopelti ei räjähdysvoimasta lähde irti katolta ja lennä maahan aiheuttaen vaaraa.

Tällainen ratkaisu on kertakäyttöinen ja räjähdysvoimien jälkeen hajonneet pultit täytyy vaihtaa uusiin. Etuja tällainen paineen purku antaa monipuolisuudessaan, sillä suunnitelmassa voidaan laitteita yksinkertaistaa ja jättää ylimääräiset räjähdyspaineen purkulaitteet pois.

Ratkaisu on kustannustehokas normaaleihin räjähdysluokkiin nähden, sillä kattorakennelma ei sisällä liikkuvia osia ja räjähdysvoimien jälkeen katon takaisin viritys vaatii vain hajonneiden muovipulttien sekä vääntyneiden kattopeltien uusimista.

Jotta Symaga on voinut saada tällaisen kattoratkaisun markkinoille, on heidän täytynyt suorittaa standardien mukaiset räjähdystestit paineenpurkujärjestelmälle todentaakseen niiden toimivuuden räjähdystilanteessa. Kuvassa 10 on yksinkertainen malli, kuinka Symaga toteuttaa kiinnityksen.



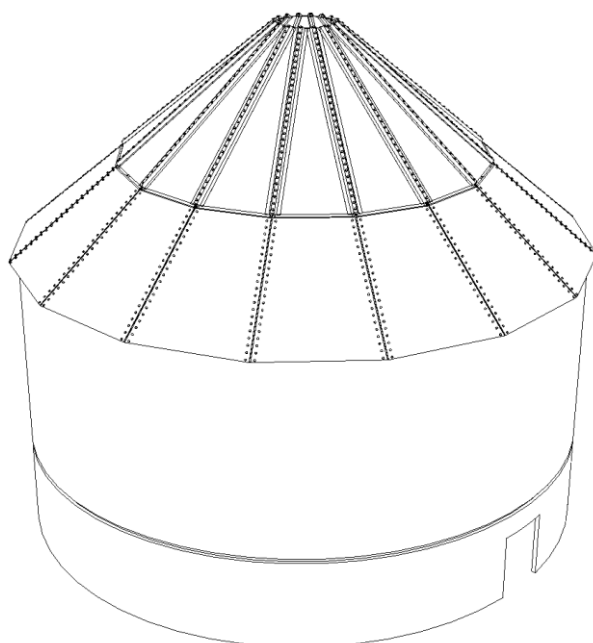
Kuva 10. Symagan kiinnitysratkaisu (mukailtu Symaga Silos 2017)

6.3 Heikompi kattomateriaali

Siilon kattomateriaalina on mahdollista käyttää jotain muuta heikompa materiaalia, joka räjähdyspaineen noustessa vapauttaisi räjähdyspaineen. Katosta tulisi näin ollen

kaksiosainen eli räjähdystilanteessa paineen purkuun tarkoitettu heikompi materiaali hajotaisi, kun taas kestävämpi materiaali, joka on katon pysyvä rakenne kestäisi paikoillaan.

Kuvassa 11 nähdään, kuinka osa siilon katosta voidaan korvata heikommalla materiaalilla. Katon alaosa on korvattu heikommalla materiaalilla, joka on pultattu suoraan siilon katon runkoon kiinni.



Kuva 11. Esimerkki pressukaton toteutuksesta

Paineenpurkutavan selitys

Räjähdyksen sattuessa heikoimman materiaalin tulisi revetä tai irrota kiinnityskohdistaan irti ja vapauttaa räjähdyspaine hallitusti siilon ulkopuolelle. Oletettavasti materiaalin pitäisi olla niin kestävä, että materiaali lävistyisi kiinnityspulttien kannoista irti. Heikompi kattomateriaali kiinnitettäisiin normaaleilla pulteilla siilon kattorunkoon. Pulttien koko ratkaisee lävistäkö pultti räjähdystilanteessa kankaan. Pienempi pultin koko muodostaa lävistettävään materiaaliin suuremman lävistysvoiman, jolloin materiaali lävistyy helpommin kiinnityskohdastaan. Materiaalin lävistyskestävyyttä voidaan laskea kaavalla 14. Kaavalla voidaan testata eri kokoisten pulttien lävistysvoimaa.

$$B_{p,Rd} = \frac{0,6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \quad (\text{kaava 14})$$

Jossa $B_{p,Rd}$ on materiaalin lävistyskestävyys, d_m on pultin kannan halkaisija, t_p perusmateriaalin paksuus, f_u perusmateriaalin murtolujuus, γ_{M2} osavarmuusluku. Pulttien määrällä voidaan myös kompensoida tarvittavaa pulttikokoa.

Kiinnityksen voisi toteuttaa myös toisella tavalla, jossa heikompi kattomateriaali olisi kiinnitetty hajoavilla kiinnikkeillä katon runkoon. Tässä tapauksessa hajoavien kiinnikkeiden tulisi hajota tietyssä räjähdyspaineessa. Hajoavien kiinnikkeiden materiaalina voisi olla muovi. Kiinnikkeiden suunnittelu tietysti toisi lisää suunnittelutyötä ja monimutkaistaisi rakennetta.

Kattomateriaali

Sopiva materiaali siilojen katoissa olisi sääolosuhteita ja aurinkoa kestävä materiaali. Materiaalin tulisi olla antistattista, koska siilojen sisällä varastoitava hake tai turve pölyävät helposti ja tällainen materiaali muodostaa helposti hankausta ja näin muodostaa staattisia varauksia materiaalin pinnalle. Materiaalit pitää valita niin, että ne kestävät säiden vaihtelua ja auringon valoa.

6.4 Paineenpurku mitoituskalkenta esimerkki siilolle

Laskuissa käytetään esimerkkinä tilavuudeltaan 2500m^3 polttoainesiiloa, joka on korkeudeltaan 21 metriä ja leveydeltään 12,5 metriä. Polttoaineena siilossa on laskuissa käytetty puupellettiä, jonka K_{St} on $230 \text{ bar} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ja p_{max} on 10,5 bar (Vapo 2011). Siilon katto on tasakattoinen ja paineen purku on toteutettu suoraan siilon kattoon, jolloin paineenpurku tapahtuu suoraan ylöspäin.

Muita pohjatietoja, joita laskuissa tarvitaan, on $p_{red,max}$ tilan maksimikestävyys, joka tässä tapauksessa on 0,7 bar ja p_{stat} paine, jossa kevennyslaite aukeaa, käytämme tässä laskelmassa arvoa 0,2 bar.

L/D eli pituuden suhde halkaisijaan aloitetaan laskemalla kaavalla 15 säiliön osan tilavuus V_{eff} , jonka kautta liekit enimmäkseen kulkevat (SFS-EN 14491, 46). Kaavassa 15 D on siilon halkaisija ja H korkeus.

$$V_{eff} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot H = \frac{\pi \cdot (12,5\text{m})^2}{4} \cdot 21\text{m} = 2577,09\text{m}^3 \quad (\text{kaava 15})$$

Tulokseksi saatu pinta-ala V_{eff} jaetaan korkeudella H kaavalla 16, jolloin saadaan siilon tehollinen pinta-ala A_{eff} suhteessa korkeuteen.

$$A_{eff} = \frac{V_{eff}}{H} = \frac{2577,09m^3}{21m} = 122,718m^2 \quad (\text{kaava 16})$$

Tehollisen halkaisijan D_{eff} lasketaan kaavalla 17, jossa hyödynnetään aikaisemmin laskettua tehollista pint-alaa A_{eff} .

$$D_{eff} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{eff}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 122,718m^2}{\pi}} = 12,5m \quad (\text{kaava 17})$$

Lopuksi voidaan laskea L/D suhde kaavalla 18, jota käytetään kevennyspinta-alan laskennassa. Kuten kaavan tuloksestakin huomataan, niin L/D suhde on sama kuin pohjatietojen leveys ja pituus. Tämä johtuu siitä, että siilon katto ja pohja ovat tasaisia ja paineenpurku on ollut suoraan ylöspäin eli paineen purkuluukku on sijoitettu siilon katolle. Jos siilo olisi esimerkiksi kartiopohjainen, olisi tehollisessa pinta-alassa pientä muutosta, joka vaikuttaisi L/D suhteeseen. Tässä tilanteessa L/D suhde on suoraan verrannollinen siilon fyysisiin mittoihin (SFS-EN 14491, 46).

$$\frac{L}{D} = \frac{H}{D_{eff}} = \frac{21m}{12,5m} = 1,68 \quad (\text{kaava 18})$$

Kun kaikki kevennyspinta-alaan vaikuttavat arvot on selvitetty, voidaan kevennyspinta-ala laskea kaavalla 19, jossa A on tarvittava kevennyspinta-ala. Tämä pinta-ala voidaan sijoittaa siilon katolle kokonaisuudessaan yhtenä suurena palana tai pienissä paloissa, jotka muodostavat tarvittavan kevennyspinta-alan.

$$A = B(1 + C * \log \frac{L}{D}) = 46,6312 \left(1 + 0,505475 * \log \frac{21m}{12,5m} \right) = 51,942m^2 \quad (\text{kaava 19})$$

jossa B saadaan laskettua kaavasta 20.

$$B = [3,264 \cdot 10^{-5} * 10,5 \text{ bar} * 230 \text{ bar} * m/s * 0,7 \text{ bar}^{-0,569} + 0,27 * (0,2 \text{ bar} - 0,1) * 0,7 \text{ bar}^{-0,5}] * 2500 m^3^{0,753} = 46,631 \quad (\text{kaava 20})$$

Kaavan 19 C saadaan laskettua kaavasta 21.

$$C = (-4,305 * \log 0,7 \text{ bar} + 0,758) = 0,505475 \quad (\text{kaava 21})$$

Liekin fyysisten mittojen laskentaan voidaan käyttää arvioidessa turvallisia etäisyyksiä toisten laitteiden sijoittamisesta paineen purkulaitteiden eteen. Esimerkiksi tässä tapauksessa siilon liekkien purkusunta on ylöspäin, joten siilon päälle ei tule suunnitella kulkusiltaa, mutta liekki voidaan suunnata esimerkiksi suuntauslevyillä sivulle, jolloin kulku sillan rakentaminen siilon yläpuolelle olisi mahdollista.

Koska esimerkissä räjähdyspaine on suunnattu ylöspäin, voidaan räjähdyksestä syntyvän liekkien pituutta arvioida kaavalla 22. Maksimiarvona voidaan kuitenkin pitää 60 metriä, vaikka siilon tilavuus olisi todella suuri (SFS-EN 14491, 32).

$$L_F = 8V^{1/3} = 8 * 2500 m^3^{1/3} = 108,5 m \sim 60 m \quad (\text{kaava 22})$$

Liekin leveyttä on hyvä arvioida suuntauslevyjä suunnitellessa, sillä leveä liekki voi kiertää suuntauslevyn osuessaan. On siis hyvä mitoittaa levy hieman leveämmäksi kuin laskettu liekin leveys. Liekin leveys lasketaan kaavalla 23.

$$W_f = 2,8V^{1/3} = 2,8 * 2500 m^3^{1/3} = 38 m \quad (\text{kaava 23})$$

Räjähdyksessä syntyy rekyylivoimia, kun liekit purkautuvat nopeasti ulos kevennysaukosta. Rekyylin voima voidaan laskea kaavalla 24. Rekyylin voima on hyvä tiedostaa varsinkin tässä tilanteessa, kun paineen purku on suoraan ylöspäin ja rekyylivoima kohdistuu

suoraan alaspäin. Siilon tukirungon täytyy kestää siilon oman painon lisäksi myös räjähdysten aikana syntyvä rekyylivoima.

$$F_{Rmax} = 119 * A_V * p_{red,max} = 119 * 52m^2 * 0,7 \text{ bar} = 4327kN \quad (\text{kaava 24})$$

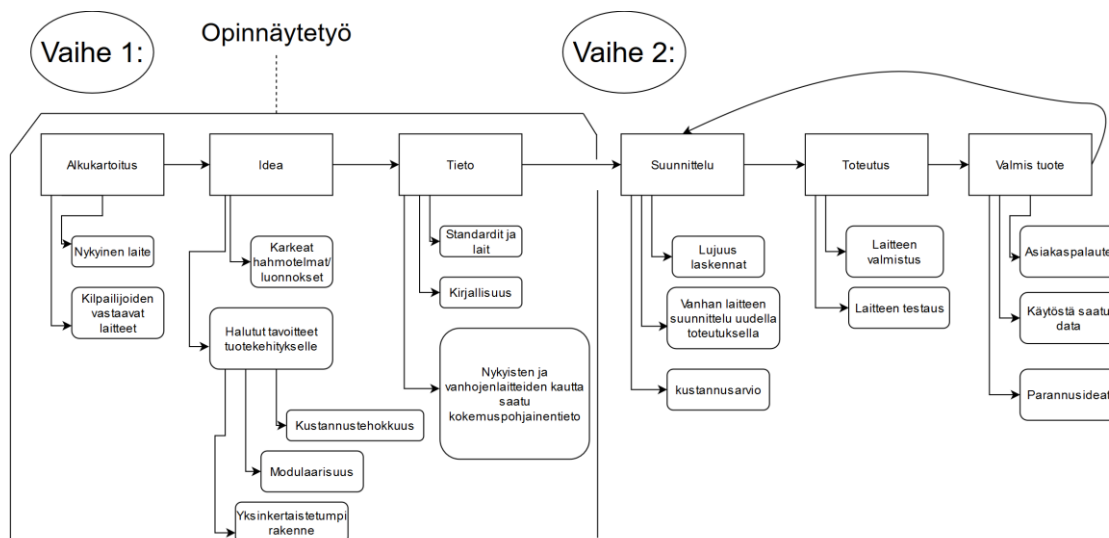
Rekyylin ajallinen kesto voidaan laskea kaavalla 25. Rekyylin ajallinen kesto on kuitenkin vain hetkellinen, eikä rakenteita kannata mitoittaa niin, että rakenteissa olisi huomioitu rekyylin voiman täysi vaikutus.

$$t_R = \frac{K_{St} * V * 10^{-4}}{A_V * p_{red,max}} = \frac{230 \text{ bar} * \frac{m}{s} * 2500m^3 * 10^{-4}}{52m^2 * 0,7 \text{ bar}} = 1,58s \quad (\text{kaava 25})$$

7 Yhteenveto

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia millaisia vaatimuksia standardeissa ja laeissa on toteuttaa rakenteellinen paineen purku polttoainesiloille sekä tarjota vaihtoehtoisia menetelmiä purkaa sillojen räjähdyspainetta nykyisten tilalle. Työssä ilmi tulleissa ideoissa ei otettu kantaa paineenpurkulaitteiden rakenteelliseen kestävyys tai toimivuuteen vaan annettiin enemmänkin ideoita toteuttaa kevennyslaitteita. Toimeksiantaja tarvitsi tietoa, jotta voisi kehittää laitteitaan kustannustehokkaammaksi. Opinnäytetyö toimii pohjana myös muillekin kevennystä vaativille laitteille kuin siloille, sillä samat standardit pätevät myös muissa laitteissa.

Kuvassa 12 on prosessikaavio, jossa havainnoidaan tämän opinnäytetyön olevan osana suurempaa kokonaisuutta. Vaihe yksi pitää sisällään paljon kohtia pohjatiedon hankinnassa sekä visioita, joita haluttaisiin toteuttaa opinnäytetyössä. Toinen vaihe on toteutusvaihe, jossa lähdetään suunnittelemaan rakenteita tämän opinnäytetyön pohjalta. Toista vaihetta tutkiessa huomataan, että valmis tuote yhdistyy takaisin suunnitteluun. Tämä tarkoittaa sitä, että tuotekehitys on jatkuvaa. Tuotekehityksen jatkuvuuteen vaikuttavat niin asiakaspalautteet, kuin lakien ja säädösten uudet vaatimukset.



Kuva 12. Projektin prosessikaavio

Monien standarditulkintojen jälkeen voidaan todeta, että rakenteellisesti oleva paineenpurku siloissa on mahdollista toteuttaa. Lopputuloksena saatiin hyvä pohja sillojen paineenpurun tuotekehittämiselle. Seuraava vaihe on sillojen kattojen uudelleen suunnittelu, jossa

etsittäisiin hyvä tapa toteuttaa rakenteellinen paineenpurku muun muassa tässä opinnäytetyössä esille tulleiden ideoiden pohjalta.

Opinnäytetyöprosessi oli aikaa vievä, sillä kaikki oli teoriapohjaista standardien läpikäymistä ja niiden avaamista työhön. Toivon, että tämä opinnäytetyö toimii hyvänä pohjana toimeksiantajayritykselle kevennyslaitteiden osalta, ja että he pystyisivät hyödyntämään tätä työtä suunnitelmissaan.

Lähteet

ANDRITZ. 2021. ANDRITZ GROUP: Results for Q2 and H1 2021. Viitattu 23.8.2021. Saatavissa <https://www.andritz.com/newsroom-en/news/2021-07-30-results-h1-2021-group>

Euroopan komissio. Hyviä käytäntöjä esittelevä ohjeellinen toimintaopas vähimmäisvaatimuksista räjähdyskelpoisten ilmaseosten aiheuttamalle vaaralle mahdollisesti alttiiksi joutuvien työntekijöiden turvallisuuden ja terveyden suojelun parantamiseksi annetun Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 1999/92/EY täytäntöönpanemiseksi. Viitattu 7.5.2021. Saatavissa <https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2003/FI/1-2003-515-FI-F1-3.Pdf>

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 94/9/EY. Viitattu 7.5.2021. Saatavissa <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/ALL/?uri=celex%3A31994L0009>

Finlex. Räjähdyskelpoisten ilmaseosten työntekijöille aiheuttaman vaaran torjunnasta. Viitattu 4.5.2021. Saatavissa <https://finlex.fi/fi/laki/alkup/2003/20030576#Pidp447132944>

Keto, J. 2018. Eurokoodien mukaisesti mitoitettujen siilorakenteiden vakiointi. Viitattu 24.8.2021. Saatavissa <https://www.finna.fi/Record/tuni.992577395305973>

Laaksonen E. 2005. Puupölyjen aiheuttama palo- ja räjähdysvaara ja sen torjuminen mekaanissa puunjalostusteollisuudessa. Viitattu 9.8.2021. Saatavissa https://www.tekninenopettaja.net/images/tyoturvallisuus/Atex/puupolyjen_aiheuttama_raja_hdysvaara.pdf

Rembe. 2017. Industrial explosion safety seminar 2017. Seminaari Tampereen Scandicissa 24 -25.1.2017

SFS. Mitä standardi tarkoittaa? Viitattu 24.8.2021. Saatavissa <https://sfs.fi/standardeista/mika-on-standardi/>

SFS-EN 60079-10-2:2015. 2015. Räjähdysvaaralliset tilat. Osa 10-2: tilaluokitus. Pölyvaaralliset tilat. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

SFS-EN 14797:2006. 2007. Räjähdyspaineen kevennyslaitteet. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

SFS-EN 14491:2012. 2012. Pölyräjähdysten paineenkevennysjärjestelmät. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

SFS-EN 1127-1:2019. 2019. Räjähdysvaaralliset tilat. Räjähdysksen esto ja suojaus. Osa 1: Peruskäsitteet ja menetelmät. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

Symaga Silos. 2019. Venting system roof. Esite

Tukes. ATEX Räjähdyksvaarallisten tilojen turvallisuus. Viitattu 6.5.2021. Saatavissa <https://tukes.fi/documents/5470659/8293726/ATEX-opas.pdf/73c4dc8f-edbd-4c25-8ef9-6cfdef86717d/ATEX-opas.pdf>

Valkama, J. 2017. Räjähdyksvaarallisen tilan paineenkevennys. Viitattu 5.7.2021. Saatavissa <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/25175/Valkama.pdf?sequence=4&isAllowed=y>

Vapo. 2011. Vapon puupelletti. Viitattu 18.8.2021. Saatavissa https://www.vapo.com/filebank/940-Vapon_Puupelletti_KTT_18_6_2012.pdf

VST Engineering. Antidet suppressor. Viitattu 19.7.2021. Saatavissa <https://www.ytm.fi/tuotteet/palontorjunta/paineen-ja-polyrajahdysten-suojausjarjestelmat/rajahdyksen-tukahduttaminen-antidet-suppressor/>