

Full paper

Een praktische, kwalitatieve aanpak voor het voorspellen van majeure ongevallen in de procesindustrie op basis van organisatorische factoren

Peter Schmitz^{1,2,*}, Paul Swuste¹, Genserik Reniers¹, Karolien van Nunen^{1,3}

Key words: delivery systems, safety management system, process safety, bowtie, indicator, ammoniak, organisatorische factoren

Samenvatting

OCI Nitrogen wenst kennis op te bouwen van (leidende, proactieve) indicatoren die inzicht geven in de procesveiligheidsprestaties van het ammoniak productieproces. Drie deelonderzoeken zijn al eerder in TtA gepubliceerd. De hoofdvraag van dit deelonderzoek is of majeure ongevallen in het ammoniak productieproces te voorspellen zijn uit organisatorische factoren, ook wel management delivery systems genoemd. Een uitgewerkt voorbeeld in retrospectief toont aan dat dit mogelijk is. Kwalitatieve informatie kan worden gegenereerd uit audits of peer reviews die eens per drie à vier jaar door interne en/of externe experts worden uitgevoerd. Als daar geen grote tekortkomingen of bevindingen uitkomen, is het zinvol om kwantitatief te gaan meten. Aan de hand van vastgestelde drempelwaarden kunnen vervolgens (management) indicatoren worden bepaald. Het bepalen van drempelwaarden is echter niet gemakkelijk omdat de invloed van organisatorische factoren op de ongevalsprocessen moeilijk vast te stellen is. Er is nog veel (retrospectief) onderzoek naar incidenten nodig om hier iets over te kunnen normeren.

1. Inleiding

In 2015 heeft zich bij een aantal site users van Chemelot, een chemisch industriepark in Geleen, een aantal grote, chemisch proces-gerelateerde incidenten voorgedaan (OVV, 2018). De toename in frequentie en de ernst van de incidenten was voor Chemelot aanleiding om een extern onderzoek te laten uitvoeren (Crisislab, 2016). Dit onderzoek concludeert o.a. dat er zoveel aandacht is voor persoonlijke veiligheid dat procesveiligheid onderbelicht is gebleven. OCI Nitrogen, één van de grotere site-users van Chemelot, heeft recent ook te maken gehad met een aantal ernstige procesveiligheidsincidenten, o.a. bij zijn twee ammoniakfabrieken. Door deze incidenten moest het betreffende ammoniakproductieproces worden stilgelegd. Het management van OCI Nitrogen heeft een eigen onderzoek gestart met de vraag of procesveilig-

Abstract

OCI Nitrogen aims to build up knowledge of (leading, proactive) indicators that provide insight into the process safety performance of the ammonia production process. Three sub-studies have already been published in TtA. The main question of this sub-study is whether major accidents in the ammonia production process can be predicted from organizational factors, also called management delivery systems. A detailed example in retrospect shows that this is possible. Qualitative information can be generated from audits or peer reviews conducted by internal and/or external experts once every three to four years. In case of no major shortcomings or findings, it makes sense to measure quantitatively. Based on established threshold values, (management) indicators can then be determined. However, determining threshold values is not easy because the influence of organizational factors on the accident processes is difficult to determine. Much (retrospective) investigation into incidents is still needed to be able to standardize this.

heid te meten en op basis hiervan te monitoren is. Het onderzoek beoogt om tijdig gerichte maatregelen te kunnen treffen en daardoor grote procesveiligheidsincidenten in de toekomst te voorkomen. De vraag die voorligt is welke indicatoren informatie geven over de ontwikkeling van de majeure ongevalsscenario's van de ammoniakproductieprocessen. Drie deelonderzoeken zijn al eerder in TtA gepubliceerd. Ze gingen over het 'ranken' van de gevaarlijkste procesonderdelen van het ammoniakproductieproces (Schmitz et al., 2018), het beoordelen van mechanische faalmechanismen (Schmitz et al., 2019a; Schmitz et al., 2019b) en het monitoren van de ontwikkeling van scenario's op basis van de barrière status (Schmitz et al., aangeboden).

¹ Safety and Security Science Group, Faculty of Technology, Policy and Management, Technical University of Delft, Jaffalaan 5, 2628 BX Delft, The Netherlands

² OCI-Nitrogen, Urmonderbaan 22, 6167 RD, Geleen, the Netherlands

³ Research Chair Vandeputte, University of Antwerp, 2000 Antwerp, Belgium

* Corresponding author: Tel. +31 613692487, email address: peter.schmitz@ocinitrogen.com

Tabel 1 een (niet-exhaustief) overzicht van organisatorische factoren of management delivery systems

Organisatorische factoren of management delivery systems	Referentie
Competentie, geschiktheid van mensen	Hale (2005), HSE (2006), Kongsvik, Almklov & Fenstad (2010), Øien (2001b), Hassan & Kahn (2012), Bellamy (2015), Duijm (2009), Guldenmund et al. (2006)
Commitment, organisatorisch management	Hale (2005), Duijm (2009), Guldenmund et al. (2006), Wagenaar et al. (1994)
Communicatie, coördinatie van teams	Hale (2005), HSE (2006), Kongsvik, Almklov & Fenstad (2010), Hassan & Kahn (2012), Bellamy (2015), Duijm (2009), Guldenmund et al. (2006), Wagenaar et al. (1994)
Procedures, regels, doelen	Hale (2005), HSE (2006), Bellamy (2015), Duijm (2009), Guldenmund et al. (2006)
Technisch ontwerp en hardware	Hale (2005), HSE (2006), Øien (2001b), Bellamy (2015), Wagenaar et al. (1994)
Interface, ergonomie	Hale (2005), Bellamy (2015)
Beschikbaarheid, planning van personeel	Hale (2005), Bellamy (2015), Duijm (2009), Guldenmund et al. (2006)
Inspectie en onderhoud	HSE (2006), Øien (2001b), Hassan & Kahn (2012)
Instrumentatie en alarmen	HSE (2006)
Wijzigingen in de plant	HSE (2006), Kongsvik, Almklov & Fenstad (2010)
Werkvergunningen	HSE (2006), Hassan & Kahn (2012)
Noodvoorzieningen	HSE (2006)
Werkpraktijk (procedures)	Kongsvik, Almklov & Fenstad (2010)
Instructies en documentatie	Kongsvik, Almklov & Fenstad (2010), Wagenaar et al. (1994)
Werklast en fysieke omgeving	Kongsvik, Almklov & Fenstad (2010)
Planning en coördinatie	Kongsvik, Almklov & Fenstad (2010)
Individuele factor (fouten, vergissingen)	Øien (2001b)
Procedures, Job safety analyse, richtlijnen, instructies	Øien (2001b)
Planning, coördinatie, organisatie, controle	Øien (2001b)
Inspectie- en onderhoudsmanagement	Hassan & Kahn (2012), Wagenaar et al. (1994)
Technische beoordeling	Hassan & Kahn (2012)
Operationele prestaties	Hassan & Kahn (2012)
Conditie van de hardware	Hassan & Kahn (2012), Wagenaar et al. (1994)
Plant configuratie en modificatie	Hassan & Kahn (2012)
Veiligheidssysteem	Hassan & Kahn (2012), Wagenaar et al. (1994)
Crisismanagement	Hassan & Kahn (2012)
Veiligheidscultuur	Hassan & Kahn (2012), Duijm (2009)
Motivatie	Bellamy (2015)
Conflicthantering	Bellamy (2015), Duijm (2009), Guldenmund et al. (2006)
Hard/software aankoop, bouw, interface, installatie	Duijm (2009), Guldenmund et al. (2006)
Hard/software inspectie, onderhoud, vervanging	Duijm (2009), Guldenmund et al. (2006)
Risico identificatie, barrière selectie en specificatie	Guldenmund et al. (2006)
Monitoring, terugkoppeling, verandermanagement	Guldenmund et al. (2006)
Fout bevorderende omstandigheden	Wagenaar et al. (1994)
Orde en netheid	Wagenaar et al. (1994)
Onverenigbare doelen	Wagenaar et al. (1994)
Training	Wagenaar et al. (1994)

Dit deelonderzoek kijkt naar de organisatorische factoren die (direct of indirect) invloed hebben op majeure ongevalsprocessen en beantwoordt de volgende onderzoeksvraag:

Zijn majeure ongevalsprocessen in het ammoniak productieproces te beïnvloeden via organisatorische factoren?

De bijbehorende, te onderzoeken deelvragen zijn:

- 1) *Wat zijn organisatorische factoren?*
- 2) *Hoe zijn organisatorische factoren gekoppeld aan de ongevalsprocessen?*
- 3) *Welke informatie kunnen de organisatorische factoren geven over de ongevalsprocessen?*
- 4) *Wat zijn de organisatorische factoren bij het ammoniak productieproces van OCI Nitrogen?*
- 5) *Kan de informatie van de organisatorische factoren de majeure ongevalsprocessen van OCI Nitrogen beïnvloeden?*

Ongevalsprocessen die hun oorsprong vinden in arbeidsomstandigheden zijn in dit deelonderzoek uitgesloten. Dit manuscript handelt alleen over mogelijke incidenten die betrekking hebben op procesveiligheid en daarnaast alleen chemisch proces-gerelateerde incidenten, die majeur of catastrofaal kunnen zijn.

1.1 Organisatorische factoren

De term “organisatorische factoren” kent vele synoniemen. Kletz, Perrow en Turner hebben vanaf de eindjaren zeventig gesteld dat majeure ongevalsprocessen vaak minder opvallend beginnen (Turner, 1978; Perrow, 1984; Kletz, 1988). De aandacht voor latente factoren in een organisatie bracht Turner ertoe om zijn idee van incubatietijd te introduceren. Incubatie verwijst naar mechanismen in organisaties, die gevaren en risico's ontkenen. In de Zwitserse kaas-metafoor van Reason (1987, 1997) worden de latente factoren (“pathogenen”) gevisualiseerd door de gaten in barrières, later uitgewerkt als basisrisicofactoren van het Tripod-model (Swuste et al., 2019).

Het Joint Research Center van de Europese Commissie startte begin van dit millennium twee projecten om de structuur van risicomanagement voor de procesindustrie uit te werken. ARAMIS (Accident Risk Assessment Methodology for Industries) en IRisk (de ontwikkeling van een geïntegreerde technische en management risicomethodologie voor chemische installaties) onderzochten allebei de positie en invloed van organisatorische factoren. Hale et al. (2007) spreken met referentie naar het I-Risk project van delivery systems en Guldenmund, Hale, Goossens, Betten en Duijm (2006) hebben het in het kader van het ARAMIS project over management delivery systems. Kongsvik, Almklov en Fenstad (2010) benoemen organisatorische factoren als organisational safety conditions, Øien, Utne en Herrera (2011) als functional areas en Hassan en Khan (2012) als activity indicators. Maar organisatorische factoren worden ook beschreven als

secundaire managementprocessen (Papazoglou et al., 2003) of support safety barriers (Bellamy et al., 2007; Ale et al., 2008), waarmee de indirecte invloed op ongevalsprocessen wordt benadrukt. Voor Duijm en Markert et al. (in Li, Guldenmund en Aneziris, 2020) zijn delivery systems belangrijke managementsystemen, die de werking van barrières garanderen. In de professionele literatuur zijn organisatorische factoren of delivery systems vaak als elementen te zien van een (process) safety managementsysteem (CCPS 2016; OSHA, z.d.) of als onderdelen van een risico beheerssysteem (HSE, 2006). Tot slot zijn organisatorische factoren te extraheren uit onderzoeksmethoden, zoals de eerdergenoemde basisrisicofactoren van het Tripod-model (Wagenaar, Groeneweg, Hudson en Reason, 1994).

In dit manuscript wordt naast organisatorische factoren ook de term “management delivery systems” als synoniem gebruikt. De term “management delivery systems” is in het kader van dit onderzoek al vaker toegepast, terwijl “organisatorische factoren” zich gemakkelijker laten vertalen naar de praktische realiteit.

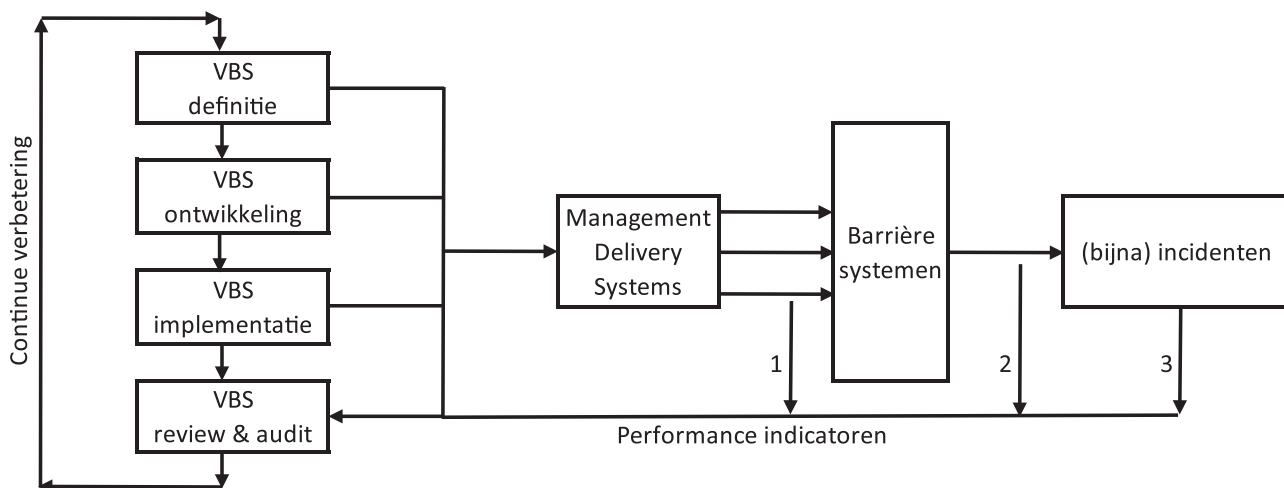
In Tabel 1 is een (niet-exhaustief) overzicht te zien van verschillende organisatorische factoren of management delivery systems uit de wetenschappelijke en professionele literatuur. In de tabel is sprake van enige dubbeling omdat daar waar de organisatorische factoren of management delivery systems niet geheel overeenkomen, ze apart genoteerd zijn.

1.2 Het veiligheidsbeheerssysteem

De delivery systems ondersteunen het algehele beheer van barrières (Li et al., 2020). Ze zijn een integraal onderdeel van het veiligheidsbeheerssysteem (Hale, 2005). De integriteit van de primaire barrières (barrières met een directe invloed op het ongevalsproces, zie Figuur 2) wordt door het veiligheidsbeheerssysteem in stand gehouden (Bellamy et al., 2007). De management delivery systems die de primaire barrières ondersteunen, worden als niet-technisch beschouwd omdat hun werkwijze gebaseerd is op werkprocessen en procedures waarin menselijk handelen en besluitvorming de boventoon voert.

Om het aantal incidenten te verminderen, is het volgens Hale's concept van een veiligheidsbeheerssysteem nodig om de gevaren in kaart te brengen, de risico's te bepalen en d.m.v. barrières te verlagen, de barrières m.b.v. management delivery systems in gebruik te nemen en dit proces te reviewen en ervan te leren (Li, 2019). Dit manuscript geeft een handreiking voor de laatste twee stappen van deze vier-traps raket: welke management delivery systems zijn noodzakelijk en wat leveren ze op om toekomstige incidenten te voorkomen?

In Figuur 1 is de rol van de management delivery systems te zien in de beheersing van de risico's (gebaseerd op fig. 3.1 uit Li, 2019). In Hale's concept (2005) zijn de manage-



Figuur 1 de rol van de management delivery systems in de beheersing van de risico's

ment delivery-systemen opgenomen in het veiligheidsbeheerssysteem (VBS), in deze context ook wel "process safety management" (PSM) genoemd. De invloed van de management delivery systems op de (bijna) incidenten is indirect, d.w.z. via de barrièresystemen. In Figuur 1 zijn, naast het VBS-element "review en audit", drie terugkoppel-loops te zien op basis waarvan het veiligheidsbeheerssysteem verbeterd kan worden.

De informatie van de drie terugkoppel-loops kan worden gebruikt om indicatoren te ontwikkelen. Ze kunnen een beeld geven van de kwaliteit van de management delivery systems (loop 1) en van het barrière systeem (loop 2). Dit manuscript heeft als doel om de indicatoren van loop 1 te ontwikkelen. De loop 2 indicatoren, die inzicht in de status en kwaliteit van de barrière systemen geven, zijn beschreven als deelonderzoek 3 (Schmitz et al., aangeboden). De loop 3 indicatoren kunnen gevonden worden in geanalyseerde (bijna-) ongevalsprocessen en vormen een belangrijke terugkoppeling m.b.t. het leren van incidenten en het functioneren van het veiligheidsbeheerssysteem als geheel. De loop 3 indicatoren, ook 'lagging indicatoren' genoemd, maken geen deel uit van het onderzoek omdat het gaat om een proactieve focus.

1.3 Barrière systemen

Daar de management delivery systems verantwoordelijk zijn voor de kwaliteit van de barrière systemen, dient zich de vraag op waar de invloed van de management delivery systems op de barrière systemen plaatsvindt? En hoe barrière systemen opgebouwd zijn. Een barrièresysteem is het geheel van aanwezige barrières dat dient te voorkomen dat oorzaken zich ontwikkelen tot gevolgen (Schmitz et al., aangeboden). Een barrière bestaat daarbij uit elementen die detecteren, beslissen of uitvoeren (Guldenmund et al., 2006). Barrière elementen kunnen zowel fysiek als niet-fysiek of technisch en niet-technisch zijn, maar ook onderverdeeld worden als hardware (al dan niet met software/logica) en de mens (Duijm, 2009; Pitblado et al., 2016; Sobral en Guedes Soares, 2019; Li et al., 2020).

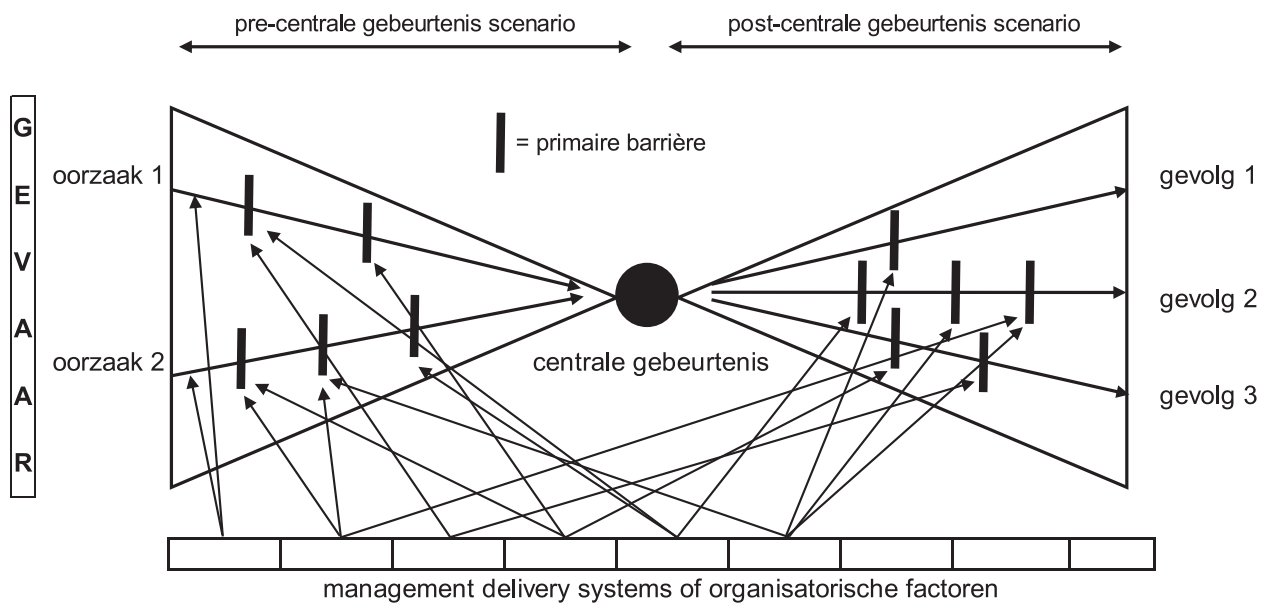
De mens is daarbij een individu met zijn/haar gedrag, kennis en persoonsgebonden acties of een onderdeel van een organisatie met zijn afspraken en procedures. In dit manuscript wordt de invloed van de management delivery systems op de barrière elementen (detectie, beslissing, uitvoering) beschouwd. Barrière elementen zijn daarbij technisch of niet-technisch, waarbij niet-technisch kan worden vertaald in organisatorisch of menselijk in de vorm van een handeling of gedrag.

Soms wordt bij barrière systemen onderscheid gemaakt in life cycles. Storybuilder kent er vier: aanbieden, gebruiken, onderhouden en monitoren (Bellamay et al., 2013; Bellamy, 2015) en ARAMIS heeft vijf life cycles: ontwerpen, installeren, gebruiken, onderhouden en verbeteren (Betten in Li et al., 2020). Voor de twee bestaande amoniakinstallaties van OCI Nitrogen van ruim 35 en 50 jaar oud zijn alleen de life cycles 'gebruiken', 'onderhouden' en 'monitoren/verbeteren' van toepassing. In dit deelonderzoek is een onderverdeling per life cycle echter niet zinvol, omdat het in dit manuscript gaat om een karakterisering van de verschillende management delivery systems en een overzicht van de activiteiten van elk van hen.

1.4 Management indicatoren

Welke informatie kunnen organisatorische factoren geven over de ongevalsprocessen? Naast de vele management delivery systems zijn er in de wetenschappelijke en professionele literatuur ook veel indicatoren te vinden die aan management delivery systems of organisatorische factoren gekoppeld kunnen worden (Swuste et al., 2016). Volgens Øien (2001a) zijn indicatoren maatstaven die worden gebruikt om de toestand van een breder fenomeen of aspect van de werkelijkheid te beschrijven. Management indicatoren dienen volgens deze definitie een beeld te geven van de werking en efficiëntie van de management delivery systems of organisatorische factoren.

Om de kwaliteit van de management delivery systems te meten, zal er zowel kwantitatief als kwalitatief gemeten



Figuur 2 de management delivery systems of organisatorische factoren in de bowtie metafoor

moeten worden (van Nunen et al., 2018). Een management indicator als het aantal werknemers dat een veiligheidstraining heeft gevolgd, kan bijvoorbeeld een verkeerd beeld schetsen als in kwantitatief opzicht aan een trainingsprogramma wordt voldaan zonder dat naar de inhoud (de kwaliteit) van de opleiding is gekeken. Vinnem (2010) benoemt het preventief onderhoudsprogramma als voorbeeld: bij te grote inspectie-intervallen zal er wellicht geen inspectie-achterstand zijn, terwijl het risico daardoor mogelijk onacceptabel groot is. Als de inspectie-intervallen erg klein zijn, kan daarentegen het risico bij een achterstand nog steeds acceptabel zijn.

2. Methode en technieken

Het management dient via de management delivery systems te borgen dat barrières effectief werken (Guillaume, 2011). In Figuur 2 zijn de management delivery systems onder de bowtie metafoor getekend. Volgens de Ruijter en Guldenmund (2016) laat dit de integratie met de organisatie zien. De pijlen in Figuur 2 geven de invloed aan van de management delivery systems naar de primaire barrières. De primaire barrières zijn getekend als verticale, dikke strepen in het scenario. Ze stoppen de ontwikkeling van een ongevalsproces en bestaan uit zowel technische als niet-technische barrière-elementen. Management delivery systems zijn niet-technisch van aard. Ze moeten worden beschouwd als werkprocessen en procedures waarin menselijk handelen en besluitvorming de bovenaan voert.

In Figuur 2 zijn eveneens pijlen te zien die niet bij barrières uitkomen, maar een directe invloed uitoefenen op de scenario's. Er zijn management delivery systems, die fouten bevorderen en latente, gevaarlijke condities creëren. Ze worden "performance influencing factors" of "error producing conditions" genoemd. Ze hebben

doorgaans een algemene invloed op veel scenario's en beïnvloeden de effectiviteit van het barrièresysteem (Sonnemans, 2010). Een voorbeeld hiervan is communicatie zoals dienstoverdracht tussen ploegen of werkafspraken tussen de onderhouds- en productie-afdeling.

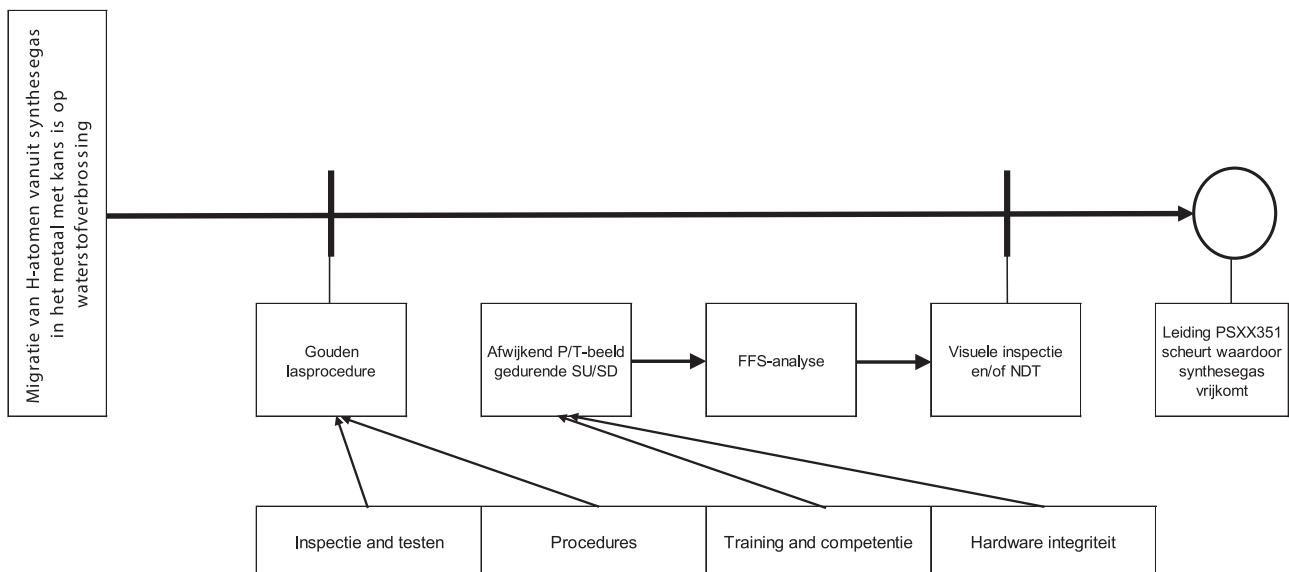
Management delivery systems leveren ondersteuning aan de primaire barrières. Om de ondersteuning te waarborgen dient een plan opgesteld te worden. Het plan kan een handelwijze of strategie bedragen en ingaan op de taken en verantwoordelijkheden van personeel en de inzet van middelen. Daarnaast kan het plan succesfactoren en doelen bevatten in de vorm van kwaliteit, kwantiteit en tijd. Het plan dient gecontroleerd en geaccordeerd te zijn, bekend en toegankelijk. De opzet en kwaliteit van het plan beïnvloeden de resultaten van de uitvoering, in kwantitatief en kwalitatief opzicht.

In de uitvoering gaat het naast de realisatie ervan ook om de achterstand in planning, de kwaliteit van het geleverde werk, de opvolging van acties, de rapportages, de kwalificaties van de uitvoerders en de evaluatie van de uitvoering. De resultaten bepalen de mate waarin de primaire barrières de benodigde ondersteuning ontvangen en er voordeel van hebben. Het plan dient dus niet alleen goed te worden opgezet, maar ook goed te worden uitgevoerd.

Bij het monitoren van management delivery systems is het belangrijk om vast te stellen of en in hoeverre ze een zodanige output leveren dat 1. van de barrièresystemen verwacht mag worden dat ze betrouwbaar/beschikbaar en effectief zullen zijn, zoals beschreven door Schmitz et al. (aangeboden) en 2. er geen latente, gevaarlijke condities gecreëerd worden. Om de management delivery systems te beoordelen, is het belangrijk dat zowel naar het plan als naar de uitvoering gekeken wordt. Daarbij dient het

Tabel 2 beschrijving van de organisatorische factoren of management delivery systems bij OCI Nitrogen incl. de bijbehorende activiteiten opgedeeld naar plan en uitvoering

Organisatorische factoren of management delivery systems	Beschrijving	Plan en Uitvoering	Activiteiten
Onderhoud	Het beheer van predictieve, preventieve en correctieve onderhoudsprogramma's (uitvoering, planning en registratie) van alle hardware- en softwarestructuren, -systemen en -componenten.	Plan	Preventief onderhoudsplan, correctieve onderhoudsdoelen, kwaliteitsdoelen, strategie m.b.t. openstaande activiteiten
		Uitvoering	PM-achterstand, CM voltooiing, kwaliteit van werk en rapportage, beschikbaarheid van plant apparatuur en back-up systemen, actie opvolging
Inspectie en testen	Het beheer van de inspectie- en testprogramma's (uitvoering, planning en registratie) van alle hardware- en softwarestructuren, -systemen en -componenten.	Plan	Inspectieplan, kwaliteitsdoelen, strategie m.b.t. openstaande activiteiten, inspectie- en testprocedure
		Uitvoering	Inspectie & test achterstand, kwaliteit van werk en rapportage, actie opvolging
Training en competentie	Het beheer van selectie en training waarmee voldoende kennis en vaardigheden worden gegarandeerd voor het veilig uitvoeren van de kritische bedrijfsprocessen en -activiteiten.	Plan	Opleidingsprogramma, opleidingsdoelen, competentiematrix
		Uitvoering	Kennis en vaardigheden, opleiding en training, kwalificaties & certificeringen
Management	Het besturen van een onderneming of organisatie waarbij o.a. de volgende facetten een rol spelen: beleid, commitment en motivatie, doelen, planning en beschikbaarheid van personeel, werklast, veiligheidscultuur, conflicthantering, communicatie met de werkvloer.	Plan	Planning van werk, beschikbaarheid van middelen en productie-, kwaliteit- en veiligheidsdoelen
		Uitvoering	Bemensing van teams, werkdruk, opvolging van VGM-acties, orde en netheid, geïntegreerd en geïnformeerd personeel, veilige en gezonde werkomgeving
Procedures	Het beheer van het systeem waarin de regels, werkwijze en afspraken beschreven zijn over o.a. wijzigingen in de plant (MoC, Management of Change), werkvergunningen (Permit to Work), job safety analysis (JSA), last minute risk assessment (LMRA), overbruggingen, pre start-up safety review (PSSR), LoToTo (log-out, tag-out, try-out) en de gouden lasprocedure.	Plan	Beschreven procedures en werkwijzen, die praktisch haalbaar zijn en voldoen aan wet- en regelgeving
		Uitvoering	Uitvoering in overeenstemming met de procedure
Plant documentatie	Het beheer van plant gerelateerde documentatie inclusief bedieningsinstructies.	Plan	Reviewplan, archiveringsbeleid
		Uitvoering	Leesbaarheid (duidelijkheid en compleetheid), overeenstemming met de huidige situatie, beschikbaarheid, toegankelijkheid
Communicatie en coördinatie	Alle mondelinge en schriftelijke communicatie en coördinatie tussen de verschillende afdelingen van het primaire bedrijfsproces.	Plan	Afspraken over samenwerking, communicatie en rapportages
		Uitvoering	Werk- en dienstoverdracht, samenwerking tussen Productie en Onderhoud, shift rapportage, projectoverdracht naar Productie, (bijna) incident meldingen
Plant ontwerp en bedrijfsvoering	Het technisch ontwerp en de bedrijfsvoering van de plant met inbegrip van de mens-machine interface, ergonomie en fysieke omgeving.	Plan	Plant specbook, bedieningsinstructies, veiligheidsstudies incl. actieplannen, milieuvergunningen
		Uitvoering	Plant prestaties, plant uitval, overbruggingen van beveiligingssystemen, plant regelsysteem (handbediening), gebruik back-up systemen, design & safety operating windows, alarm overbelasting, vergunningsoverschrijdingen, actieopvolging uit veiligheidsstudies
Hardware integriteit	De conditie van de hardware met inbegrip van de veiligheidssystemen.	Plan	Beleid t.a.v. plant beschikbaarheid en reserveonderdelen, wet- en regelgeving, hardware beoordelingsstudies (FMEA, corrosie- en mechanische faalmechanismen) incl. actieplannen
		Uitvoering	Hardware conditie incl. veiligheidssystemen, condition monitoring, beschikbaarheid en prestatie van apparaten, beschikbaarheid van back-up systemen, integrity operating window, actieopvolging uit hardware studies



Figuur 3 linkerzijde van de bowtie van een gescheurde leiding door waterstofverbrossing
(P/T: druk/temperatuur; SU/SD: start-up/shutdown; FFS: fitness for service; NDT: niet-destructief testen)

plan en de uitvoering zowel kwalitatief als kwantitatief te worden beoordeeld. De bestaande wet- en regelgeving, de geldende interne vereisten en richtlijnen, actuele 'good practices' en 'expert judgement' zijn hierbij grotendeels bepalend voor de normstelling.

3. Resultaten

Een veilige installatie vraagt om een robuust ontwerp gebaseerd op "defence in depth". Voor elke barrière die wordt geïnstalleerd om te voorkomen dat een gevaarlijk scenario zich ontwikkelt, moeten de essentiële voorwaarden door de organisatie geïdentificeerd worden opdat ze kunnen werken (Hale, 2005). Als dat is gebeurd, zal vervolgens gemonitord moeten worden om te bepalen of steeds aan de voorwaarden wordt voldaan. Het monitoren kan behalve op het niveau van de (primaire) barrières (loop 2 in Figuur 1) ook op het niveau van de management delivery systems (loop 1, Figuur 1). Belangrijk is dat ze daarbij gericht zijn op potentiële veranderingen (Øien, 2001b). Op deze manier dragen management delivery systems, als onderdeel van het veiligheidsbeheersysteem, bij aan het veilig beheer van organisatie naar operationeel niveau.

3.1 De management delivery systems van OCI Nitrogen

In Tabel 2 zijn de organisatorische factoren uit Tabel 1 samengevoegd tot negen management delivery systems, die alle primaire barrières van de ongevalsprocessen bij OCI Nitrogen kunnen ondersteunen. Ze zijn elk beschreven voor wat betreft hun functie en/of doel. Een management delivery system hoeft daarbij niet per definitie door één afdeling of team te worden uitgevoerd, maar kan binnen een organisatie verdeeld zijn, waarbij de verantwoordelijkheid bij meerdere afdelingen, teams of rollen kan liggen. Inspecties van drukapparatuur zijn bijvoorbeeld bij een onafhankelijke of externe conformiteitsbeoordelingsinstantie ondergebracht, terwijl het testen van instrumen-

tele beveiligingen door een onderhoudsafdeling gebeurt. Het trainen en opleiden is bij een aantal instructeurs ondergebracht, die onderdeel zijn van de operationele staf. Selectie en competentiebeheer wordt gedaan door de afdeling HR in samenspraak met het operationele management.

Tabel 2 laat ook een overzicht zien van de belangrijkste activiteiten van de negen management delivery systems. De activiteiten zijn onderverdeeld in activiteiten gerelateerd aan het plan om de doelen te bereiken en aan de uitvoering van het plan. In de volgende paragraaf is aan de hand van een voorbeeld een aanzet gegeven voor een kwalitatieve beoordeling van een aantal management delivery systems.

3.2 Casestudie: een bijna-incident t.g.v. waterstofverbrossing

In 2018 werd tijdens een operatorronde ammoniak waargenomen. Uit nader onderzoek door de operator ter plaatse bleek dat de isolatieschaal van een leiding gedeeltelijk blauw was gekleurd en dat synthesesgas en ammoniak naar buiten lekten. De ammoniakinstallatie is direct gestopt en van druk gelaten. Nadat de isolatieschaal en het onderliggende isolatiemateriaal verwijderd waren, was een scheur langs een las van de leiding te zien. Daar lokale reparatie niet mogelijk bleek, is een gedeelte van het leidingwerk verwijderd en vervangen. De leiding was over de gehele omtrek gescheurd en gedeeltelijk door de gehele wanddikte van 50 mm, hetgeen duidde op hoge spanningen in het leidingsysteem. Dat werd bevestigd doordat de veerhanger van het leidingsysteem vrijwel allemaal buiten hun bereik stonden. Het leidingsysteem is opgehangen aan veerhanger die de krachten, die zich ontwikkelen door uitzetting van het leidingsysteem, moeten compenseren. Als de veerhanger niet goed ingesteld

Tabel 3 verdiepende vragen over de management delivery systems 1

Management delivery system	Plan / Uitvoering	Verdiepende vragen
Inspectie en testen	Plan: Inspectieplan <ul style="list-style-type: none"> • Kwaliteitsdoelen • Strategie m.b.t. openstaande activiteiten • Inspectie- en testprocedure 	<ul style="list-style-type: none"> • Wie heeft het plan opgesteld? • Wie heeft het plan gecontroleerd en geaccordeerd? • Wat staat in het plan (selectie, planning)? • Is er een derde partij, "certified body" bij betrokken? • Welke doelen zijn gesteld en wie controleert of ze behaald zijn? • Zijn het plan en de doelen bekend? • Is er een plan t.a.v. openstaande activiteiten? • Worden het plan, de doelen en de strategie periodiek geëvalueerd? • Wat is de kwaliteit van de inspectie- en testprotocol? • Wie heeft dit gecontroleerd en geaccordeerd?
	Uitvoering: <ul style="list-style-type: none"> • Inspectie & test achterstand • Kwaliteit van werk en rapportage • Actie opvolging 	<ul style="list-style-type: none"> • Wat zijn de te volgen procedures (inspectiemethode, standaard)? • Zijn de inspecteurs voldoende gekwalificeerd? • Hoe en naar wie wordt gerapporteerd? • Wie beoordeelt en accordeert de rapportages? • In hoeverre is de uitvoering volgens plan? • Hoeveel inspecties voldoen aan de gestelde kwaliteit? • Wanneer is de inspectie achterstand te groot? • Hoe is de opvolging van acties geregeld? • Wordt het uitvoeringsproces periodiek geëvalueerd?
Procedures	Plan: Beschreven procedures en werkwijzen, die praktisch haalbaar zijn en voldoen aan wet- en regelgeving	<ul style="list-style-type: none"> • Is de procedure bekend en begrepen? • Is de procedure toegankelijk? • Wat is de kwaliteit van de procedures? • Is het praktisch haalbaar? • Voldoet het aan wet- en regelgeving? • Worden de procedures periodiek geëvalueerd?
	Uitvoering: Uitvoering in overeenstemming met de procedure	<ul style="list-style-type: none"> • Hoe wordt toegezien op toepassing van de procedure? • Wie beoordeelt afwijkingen in de uitvoering van de procedure? • Wat gebeurt bij geen of onjuiste toepassing? • Welk percentage van de procedures wordt volgens de afspraken uitgevoerd? • Wordt uitvoeringsproces periodiek geëvalueerd?
Opleiding en competentie	Plan: <ul style="list-style-type: none"> • Opleidingsprogramma • Opleidingsdoelen • Competentiematrix 	<ul style="list-style-type: none"> • Hoe zien het opleidingsprogramma, -doelen en competentiematrix eruit? • Wie heeft het opleidingsprogramma, -doelen en competentiematrix opgesteld, gecontroleerd en geaccordeerd? • Worden het programma, doelen en competentiematrix periodiek geëvalueerd?
	Uitvoering: <ul style="list-style-type: none"> • Kennis en vaardigheden • Opleiding & training • Kwalificaties & certificeringen 	<ul style="list-style-type: none"> • Wordt het opleidingsprogramma volgens plan uitgevoerd? • Hoe worden kennis en vaardigheden getoetst? • Wie beoordeelt de inhoudelijke diepgang van de trainingen? • Komen de trainingen overeen met de praktijk? • Worden ook niet-standaard situaties getraind? • Is er voldoende mix tussen theorie en praktijk? • Komen grote ongevalsprocessen ook aan bod? • Wat gebeurt er als iemand onvoldoende gekwalificeerd is? • Welke kwalificaties hebben de trainers? • Wordt uitvoeringsproces periodiek geëvalueerd?
Hardware integriteit	Plan: <ul style="list-style-type: none"> • Beleid t.a.v. plant beschikbaarheid en reserveonderdelen • Wet- en regelgeving • Hardware beoordelingsstudies (FMEA, corrosie- en mechanische faalmechanismen) 	<ul style="list-style-type: none"> • Wie heeft het beleid opgesteld? • Wie heeft het beleid gecontroleerd en geaccordeerd? • Wordt het beleid periodiek geëvalueerd? • Wordt er gehandeld naar de laatste wet- en regelgeving? • Zijn de corrosie- en mechanische faalmechanismen in kaart gebracht? • Wie heeft de beoordeling gedaan? • Hoe vaak vindt een hardware beoordeling plaats? • Wat zijn de uitgangspunten? • Wie controleert en accordeert de beoordelingsstudies?
	Uitvoering: <ul style="list-style-type: none"> • Hardware conditie incl. veiligheids-systemen • Beschikbaarheid en prestatie van apparaten • Beschikbaarheid van back-up systemen • Integrity operating window • Actieopvolging uit hardware studies 	<ul style="list-style-type: none"> • Hoe is de algemene conditie van de hardware? • Hoeveel veiligheidssystemen zijn onwerkzaam en waarom? • Hoe vaak is de plant's beschikbaarheid te wijten aan verslechterde hardware conditie? • Wat is de beschikbaarheid van back-up systemen "on demand"? • Hoe vaak wordt het integrity operatie window overschreden? • Wat is dan de procedure? • Hoe is de opvolging van acties uit hardware studies geregeld? • Hoe groot is de achterstand? • Wordt het uitvoeringsproces periodiek geëvalueerd?

zijn of niet goed functioneren, kunnen grote, lokale spanningen in het leidingsysteem ontstaan.

Uit metallurgisch onderzoek is gebleken dat de las zonder lasdefecten is gelegd en voldeed aan de gestelde normen. De eindconclusie van het metallurgisch onderzoek was dat interne, hoge spanningen door verkeerde montage, in combinatie met een te hoge hardheid en kerfwerking van de las, de scheurvorming hebben veroorzaakt. Hier was sprake van waterstofverbrossing.

Bij de vervanging van een warmtewisselaar is dit leidingdeel in 2012 vervangen. De veerhanger van het leidingsysteem zijn indertijd bij demontage van de oude leiding niet vastgezet, waarna de nieuwe leiding verkeerd is ingemeten. Daarbij zijn de bocht en de leiding met kracht op één lijn geplaatst voordat de las is gelegd. Dit heeft ter plaatse van de las voor blijvende, hoge spanningen gezorgd.

Op basis van twee interne, niet openbare onderzoeksverslagen is de linkerzijde van de bowtie van het ongevalsproces opgetekend (Figuur 3). Dit deel van de bowtie laat twee (primaire) barrières zien, waarvan de eerste primaire barrière één barrière element heeft en de tweede primaire barrière drie elementen. De eerste barrière betreft het lassen volgens een procedure, de gouden lasprocedure. De gouden lasprocedure wordt toegepast bij lassen met verhoogde aandacht, bijvoorbeeld bij hogedruk leidingen als de leiding in kwestie, die niet kunnen worden afgeperst. De gouden lasprocedure borgt dat een aantal belangrijke, veiligheidskritische stappen genomen wordt. Het niet goed volgen van de procedure kan leiden tot een latente, onveilige toestand (Schmitz, 2012).

De tweede barrière bestaat uit drie elementen: een afwijkend druk- en temperatuurbeeld tijdens het opstarten of stoppen van de installatie is een indicatie dat waterstof opgesloten kan raken in het metaalrooster. Dit kan in combinatie met verhoogde spanningen (waaronder spanningen veroorzaakt door niet goed functionerende veerhanger) zorgen voor waterstofverbrossing en scheurvorming. Een fitness-for-service analyse en/of een stressberekening kan aantonen of en waar geïnspecteerd dient te worden. Uit een inspectie moet vervolgens blijken in hoeverre scheurvorming heeft plaatsgevonden en of reparatie dan wel vervanging van de las noodzakelijk is.

Dit ongevalsproces heeft zich kunnen ontwikkelen omdat de twee barrières niet gefunctioneerd hebben of niet aanwezig waren. De gouden lasprocedure bestaat al langere tijd en was ten tijde van de lasaanmaak een verplichte procedure. Uit het onderzoek kwam vast te staan dat de procedure niet (volledig) gevolgd is, m.a.w. de eerste barrière was niet betrouwbaar/beschikbaar en/of niet effectief. De kennis over waterstofverbrossing in dit leidingsysteem is pas opgedaan tijdens het ongevalsonderzoek. Dat betekent dat de tweede barrière niet aanwezig was. Een afwijkend druk/temperatuur beeld tijdens het starten

en stoppen van de ammoniakinstallatie werd niet gemeld omdat het niet hoefde. Naar de stand van de veerhanger werd niet gekeken omdat het belang van de veerhanger niet (meer) bekend was.

De vier barrière elementen van de twee primaire barrières kunnen gekoppeld worden aan één of meerdere van de negen management delivery systems van OCI Nitrogen. De vraag hierbij is in hoeverre het niet goed werken van de management delivery systems bijgedragen heeft aan het falen van de barrière elementen. In Tabel 3 zijn de management delivery systems van de barrière elementen 'gouden lasprocedure' en 'afwijkend P/T-beeld' uitgewerkt.

Voor de gouden lasprocedure spelen de management delivery systems "inspectie en testen" en "procedures" een rol en voor het eerste barrière element van de tweede barrière zijn dat "opleiding en competentie" en "hardware integriteit". Tabel 3 laat een niet-uitputtende lijst van verdiepende vragen t.a.v. het plan en de uitvoering van de vier management delivery systems zien, die tijdens een audit of peer review kunnen worden beantwoord. Om het plan te kunnen beoordelen dienen vragen te worden gesteld, die iets zeggen over de ontwikkeling van het plan (controle, accordering) de bekendheid en toegankelijkheid, de inhoud (omvang, doelen, planning, succesfactoren, taken en verantwoordelijkheden) en de evaluatie van het plan. Om inzicht in de uitvoering te krijgen, is het belangrijk dat de vragen gaan over de realisatie van de activiteiten, de achterstand t.o.v. de planning, de kwaliteit van het werk, de opvolging van acties, de rapportages, de kwalificaties van de uitvoerders en de evaluatie van de uitvoering.

De gouden lasprocedure is een bekende procedure waarvan het belang en de inhoud door de gebruikers begrepen dient te worden. De procedure is wel eens aangepast, maar is nooit goed tegen het licht gehouden. Het toezicht op het gebruik van de procedure gebeurt te vaak vanaf het papier en te weinig vanuit het veld, terwijl dat wel zo in de procedure staat. Er wordt vertrouwd op mondelinge terugkoppelingen in plaats van eigen 'veld verificatie'. Dat gold ook voor het laswerk in 2012: de bocht en de leiding zijn met kracht op één lijn geplaatst voordat de las is gelegd. Als de inspecteur ter plaatse was geweest, was het werk afgekeurd nog voordat er met lassen zou zijn begonnen. De vraag hoe wordt toegezien op toepassing van de procedure, had voldoende indicatie moeten geven dat de gehanteerde werkwijze in de praktijk afwijkt van wat er in de procedure staat en kan leiden tot gevaarlijke situaties.

Bij de tweede barrière speelt kennis over waterstofverbrossing een belangrijke rol. Er was niets bekend over het faalmechanisme waterstofverbrossing en afwijkende druk/temperatuur beelden werden niet gemeld omdat het gevaar ervan niet bekend was. Tot voor kort waren alleen de corrosie- en mechanische faalmechanismen in

kaart gebracht die zich kunnen ontwikkelen tijdens normaal bedrijf van de ammoniakfabriek. Pas zeer recent is dat ook gedaan voor de bedrijfsfasen van het opstarten en stoppen, waardoor kennis kwam over dit specifieke faalmechanisme. De in het verleden uitgevoerde studies zijn nooit door een (externe) deskundige beoordeeld. Inhoudelijke vragen over de resultaten en uitgangspunten van de beoordelingsstudies hadden dit hiaat kunnen ontdekken.

4. Discussie

Figuur 1 laat zien dat er verschillende terugkoppel-loops zijn waaruit informatie kan worden gewonnen om majeure ongevallen te voorspellen. In dit manuscript is dat stroom 1. Kwalitatieve informatie kan worden gegenereerd uit audits of peer reviews die eens per drie à vier jaar door interne en/of externe experts worden uitgevoerd. Pas als uit audits of peer reviews blijkt dat hier geen grote tekortkomingen of bevindingen zitten, is het zinvol om op frequentere basis (bijvoorbeeld één keer per maand of kwartaal) kwantitatief te gaan meten.

In het uitgewerkte voorbeeld is alleen een kwalitatieve beschouwing gedaan van de management delivery systems. Voor een kwantitatieve beoordeling hadden bijvoorbeeld onderstaande vragen kunnen worden gesteld. De drempelwaarden zijn daarbij indicatief en kunnen als management indicator dienen.

- Bekendheid met de gouden lasprocedure: minimaal 90% van de inspecteurs en toezichhouders dient getraind te zijn en de toets met succes afgelegd te hebben;
- Toepassing van de gouden lasprocedure: het aantal verificaties dat in het veld uitgevoerd wordt t.o.v. het vereiste aantal mag niet kleiner dan 75% zijn;
- Hardware beoordelingsstudies: van alle in de volgende turnaround te inspecteren apparaten zijn de opstart- en stopfase meegenomen in de analyse van de corrosie- en mechanische faalmechanismen.

Het uitvoeren van een beoordeling, bijvoorbeeld in de vorm van een audit of peer review vraagt meer dan alleen het stellen van vragen. Volgens Hale (2005) is auditen meer een kunst dan een kunde, waarbij de wetenschappelijke onderbouwing ontbreekt. De vragen in Tabel 3 zijn vooral procedureel van aard en gaan deels voorbij aan de intermenselijke relaties. Communicatie en samenwerking (niet begrijpen, slecht communiceren, niet op de hoogte zijn) zijn van vitaal belang, en nodig om procedures en werkprocessen goed te laten functioneren. Zo wordt de kwaliteit van opleidingen bijvoorbeeld ook bepaald door de (mondelijke) kennisoverdracht. Daarnaast kan sprake zijn van tegenstrijdige doelen of beperkingen in tijd en/of middelen waardoor keuzes gemaakt moeten worden, die het niet altijd mogelijk maken om de procedure helemaal te volgen. En ook hier ligt een taak voor de beoordelaars, auditeurs of reviewers om op het juiste moment door te vragen en te zoeken naar mechanismen, die procedures en werkprocessen belemmeren.

5. Conclusies

De hoofdvraag van dit (vierde) deelonderzoek is of majeure ongevallen te beïnvloeden zijn via organisatorische factoren bij het ammoniak productieproces. Het hier uitgewerkte voorbeeld op basis van retrospectieve gegevens toont aan dat met gerichte vragen inzicht verschaft had kunnen worden over de werking van een aantal organisatorische factoren of management delivery systems. Het is niet ondenkbaar dat met het verkregen inzicht diepgaander onderzoek zou zijn verricht, waardoor het hier uitgewerkte bijna-incident voorkomen had kunnen.

Het bepalen van drempelwaarden waarbij actie nodig is, is niet gemakkelijk omdat de invloed op de ongevalsproces moeilijk vast te stellen is. Als er drempelwaarden zijn vastgesteld, kunnen (management) indicatoren ontwikkeld worden, die met een frequentie van bijvoorbeeld eens per maand of eens per kwartaal worden gemeten. Er is echter nog veel retrospectief onderzoek naar incidenten nodig om hier iets over te kunnen normeren.

Alleen als een organisatie de juiste vragende houding heeft, kan het haar prestaties op het gebied van procesveiligheid via de management delivery systems verbeteren. In de lijst van verdiepende vragen van Tabel 3 is zowel voor het plan als voor de uitvoering de vraag gesteld of het proces periodiek wordt geëvalueerd. Dit kan gezien worden als een 'first loop learning' van het management delivery systeem, terwijl de 'second loop learning' zich op het niveau van het veiligheidsbeheerssysteem bevindt.

Niet goed functionerende management delivery systems kunnen een majeur ongevalsproces in de hand werken. Management, communicatie en samenwerking, plant ontwerp en bedrijfsvoering en hardware integriteit zijn "performance influencing factors" of "error producing conditions". Ze bevorderen fouten en creëren latente, gevaarlijke condities zonder dat ze directe invloed uitoefenen op barrières of barrièresystemen. De andere management delivery systems hebben daarentegen wel een directe invloed op barrières of barrièresystemen.

Organisatorische factoren of management delivery systems zijn niet-technisch van aard en moeten worden beschouwd als werkprocessen en procedures waarin menselijk handelen of besluitvorming de boventoon voert. Het menselijk handelen wordt mede beïnvloed door de omgeving waarin en de systemen waarmee gewerkt wordt, waarbij de mens altijd zal proberen om de gemakkelijkste manier te vinden, ook al is die gevaarlijker. Men kan niet aannemen dat mensen rationeel zijn en dat kent z'n beperkingen. Het is daarom belangrijk om de management delivery systems met regelmaat te monitoren en te evalueren.

Referenties

- Ale, B., Baksteen, H., Bellamy, L., Bloemhof, A., Goossens, L., Hale, A., Mud, M., Oh, J., Papazoglou, I., Post, J. & Whiston, J. (2008). Quantifying occupational risk: The development of an occupational risk model. *Safety Science*, 46, 176-185. Doi:10.1016/j.ssci.2007.02.001
- Bellamy, L.J., Ale, B.J.M., Geyer, T.A.W., Goossens, L.H.J., Hale, A.R., Oh, J., Mud, M., Bloemhof, A., Papazoglou, I.A., & Whiston, J.Y. (2007). Storybuilder – A tool for the analysis of accident reports. *Reliability Engineering and System Safety*, 92, 735-744. Doi:10.1016/j.res.2006.02.010
- Bellamy, L., Mud, M., Manuel, H. & Oh, J. (2013). Analysis of underlying causes of investigated loss of containment incidents in Dutch Seveso plants using the Storybuilder method. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 26, 1039-1059. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2013.03.009>
- Bellamy, L. (2015). Exploring the relationship between major hazard, fatal and non-fatal accidents through outcomes and causes. *Safety Science* 71, 93-103. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2014.02.009>
- CCPS (2016). *Guidelines for implementing process safety management* (2nd ed.). Hoboken, US: John Wiley & Sons Inc.
- Crisislab. (2016). *Toevoel of structureel incidentisme? Negen incidenten uit 2015 bij Chemelot nader beschouwd*. Geraadpleegd van <http://crisislab.nl/wordpress/wp-content/uploads/2016-06-07-rapport-Chemelot-def.pdf>
- Duijm, N. (2009). Safety-barrier diagrams as a safety management tool. *Reliability Engineering and System Safety*, 94, 332-341. Doi:10.1016/j.res.2008.03.031
- Guillaume, E. (2011). *Identifying and Responding to Weak Signals to Improve Learning from Experiences in High-Risk Industry*. Proefschrift Technische Universiteit Delft. Oisterwijk, The Netherlands: Bopress BV.
- Guldenmund, F., Hale, A., Goossens, L., Betten, J., & Duijm, N.J. (2006). The development of an audit technique to assess the quality of safety barrier management. *Journal of Hazardous Materials*, 130, 234-241.
- Hale, A. (2005). Safety Management, what do we know, what do we believe we know, and what do we overlook? *Tijdschrift voor toegepaste Arbowedenschap*, 2005(3), 58-66.
- Hale, A., Ale, B., Goossens, L., Heijer, T., Bellamy, L., Mud, M., Roelen, A., Baksteen, H., Post, J., Papazoglou, I., Bloemhoff, A. & Oh, J. (2007). Modelling accidents for prioritizing prevention. *Reliability Engineering and System Safety*, 92, 1701-1715.
- Hassan, J., & Khan, F. (2012). *Risk-based asset integrity indicators*. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 25, 544-554.
- HSE (2006). *Developing process safety indicators, a step-by-step guide for the chemical and major hazards industries*. Geraadpleegd van <http://www.hse.gov.uk/pUbns/priced/hsg254.pdf>
- Kletz, T. (1988). *Learning from accidents in industry*. London, UK: Butterworths.
- Kongsvik, T., Almklov, P. & Fenstad, J. (2010). Organisational safety indicators: Some conceptual considerations and a supplementary qualitative approach. *Safety Science*, 48, 1402-1411. Doi:10.1016/j.ssci.2010.05.016
- Li, Y. (2019). *A systematic and Quantitative Approach to Safety Management*. Proefschrift Technische Universiteit Delft. Enschede, The Netherlands: Ipskamp Printing.
- Li, Y., Guldenmund, F. & Aneziris, O. (2020). Delivery systems: A systematic approach for barrier management. *Safety Science*, 121, 679-694. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2017.02.007>
- Nunen van, K., Swuste, P., Reniers, G., Paltrinieri, N., Aneziris, O. & Ponnet, K. (2018). Improving Pallet Mover Safety in the Manufacturing Industry: A Bow-Tie Analysis of Accident Scenarios. *Materials*, 11, 1-19. Doi:10.3390/ma11101955
- Øien, K. (2001a). Risk indicators as a tool for risk control. *Reliability Engineering and System Safety*, 74, 129-145.
- Øien, K. (2001b). A framework for the establishment of organizational risk indicators. *Reliability Engineering and System Safety*, 74, 147-167.
- Øien, K., Utne, I. & Herrera, I. (2011). Building Safety indicators: Part 1 – Theoretical foundation. *Safety Science*, 49, 148-161. Doi:10.1016/j.ssci.2010.05.012
- OSHA (z.d.). *Process Safety Management*. Geraadpleegd van <https://www.osha.gov/Publications/OSHA3132.html>
- OVV. (2018). *Chemie in samenwerking – Veiligheid op het industriecomplex Chemelot*. Geraadpleegd van <https://www.onderzoeksraad.nl/nl/page/4707/chemie-in-samenwerking--veiligheid-op-het-industriecomplex-chemelot>
- Papazoglou, I., Bellamy, L., Hale, A., Aneziris, O., Ale, B., Post, J. & Oh, J. (2003). I-Risk: development of an integrated technical and management risk methodology for chemical installations. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 16, 575-591. Doi:10.1016/j.jlp.2003.08.008
- Perrow, C. (1984). *Normal accidents. Living with high-risk technologies*. New York, US: Basic Books.
- Pitblado, R., Fisher, M., Nelson, B., Fløtaker, H., Molazemi, K. & Stokke, A. (2016). Concepts for dynamic barrier management. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 43, 741-746. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2016.07.005>
- Reason, J. (1987). The Chernobyl errors. *Bulletin of the British Psychological Society* 40, 201-206.
- Reason, J. (1997). *Managing the risks of organizational accidents*. Abingdon, UK: Taylor & Francis.
- Ruijter, A. de, & Guldenmund, F. (2016). The bowtie method: A review. *Safety Science*, 88, 211-218.
- Schmitz, P. (2012). Meer veiligheid met minder regels. Thesis MoSHE course, Technische Universiteit Delft.
- Schmitz, P., Swuste, P., Theunissen, J., Reniers, G., Decramer, G., & Uijterlinde, P. (2018). Een aanpak voor het bepalen van een realistische ranking van de gevaarlijkste procesonderdelen van het ammoniakproductieproces. *Tijdschrift voor toegepaste Arbowedenschap*, 2018(2), 42-56.
- Schmitz, P., Swuste, P., Reniers, G., & Nunen van, K. (2019a). Mechanical integrity of process installations: an assessment based on bow-ties. *Chemical Engineering transactions*, 77, 97-102. Doi:10.3303/CET1977017
- Schmitz, P., Swuste, P., Reniers, G., & Decramer, G. (2019b). Een aanpak voor het beoordelen van mechanische faalmechanismen van statische apparaten van het ammoniakproductieproces. *Tijdschrift voor toegepaste Arbowedenschap*, 2018(2), 34-54.
- Schmitz, P., Swuste, P., Reniers, G., & Nunen van, K. (aanbieden). Een praktische aanpak voor het voorspellen van majeure ongevallen in de procesindustrie op basis van de barrière status op scenario niveau. *Tijdschrift voor toegepaste Arbowedenschap*.
- Sobral, J. & Guedes Soares, C. (2019). Assessment of the adequacy of safety barriers to hazards. *Safety Science*, 114, 40-48. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.12.021>
- Sonnemans, P.J.M., Körvers, P.M.W., & Pasman, H.J. (2010). Accidents in "normal" operation – Can you see them coming?. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 23, 351-366. Doi:10.1016/j.jlp.2010.01.001
- Swuste, P., Theunissen, J., Schmitz, P., Reniers, G., & Blokland, P. (2016). Process safety indicators, a review of literature. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 40, 162-173. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2015.12.020>
- Swuste, P., van Gulijk, C., Zwaard, W., Lemkowitz, S., Oostendorp, Y., Groeneweg, J. (2019). *Van veiligheid naar veiligheidskunde*. Alphen aan den Rijn, The Netherlands: B + B Vakmedianet.
- Turner, B. (1978). *Man-made disasters*. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann.
- Vinnem, J.E. (2010). Risk indicators for major hazards on offshore installations. *Safety Science*, 48, 770-787. Doi:10.1016/j.ssci.2010.02.015
- Wagenaar, W., Groeneweg, J., Hudson, P. & Reason, J. (1994). Promoting safety in the oil industry. The Ergonomics Society Lecture Presented at the Ergonomics Society Annual Conference, Edinburgh, 13-16 April 1993. *Ergonomics*, 37:12, 1999-2013. Doi:10.1080/00140139408964963