

Full paper

Een praktische aanpak voor het voorspellen van majeure ongevallen in de procesindustrie op basis van de barrière status op scenario niveau

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

Key words: Process safety, bowtie, indicator, ammoniak, scenario, barrière

Samenvatting

OCI Nitrogen beoogt om kennis op te bouwen van (leidende) indicatoren die op voorhand inzicht geven in de procesveiligheidsprestaties van hun ammoniak productieproces. Twee deelonderzoeken zijn al eerder in TtA gepubliceerd. Het eerste deelonderzoek had betrekking op het 'ranken' van de gevaarlijkste procesonderdelen van het ammoniakproductieproces. In het tweede deelonderzoek zijn de belangrijkste statische installatiedelen van het ammoniakproductieproces in kaart gebracht, die gerelateerd zijn aan mechanische faalmechanismen. Dit manuscript beschrijft het derde deel van het onderzoek met de vraag of er – op basis van de status van het barrière systeem – indicatoren kunnen worden afgeleid, die op voorhand informatie geven over de ontwikkeling en waarschijnlijkheid van de majeure ongevalsprocessen bij het ammoniak productieproces.

De ongevalsprocessen zijn gevisualiseerd als scenario's in bowties. Dit onderzoek richt zich op de status van de preventieve barrières aan de linkerkant van de bowtie. Zowel de kwaliteit – uitgedrukt in betrouwbaarheid/beschikbaarheid en effectiviteit – als het aangesproken zijn van het barrièresysteem geven een indicatie van de ontwikkeling van ongevalsscenario's en de waarschijnlijkheid van de centrale gebeurtenis. Deze waarschijnlijkheid wordt berekend als een verlies van risicoreductie ten opzichte van het oorspronkelijke ontwerp. De berekeningen van deze beoordeling resulteren in indicatoren die "preventieve barrière-indicatoren" worden genoemd. Ze geven een indicatie van de waarschijnlijkheid van het scenario. Deze waarschijnlijkheid is geen absolute waarde, maar eerder een aanwijzing van de verandering van de status quo die aanleiding moet zijn om verdere actie te ondernemen. Dit manuscript laat zien wat deze actie moet zijn en wat de urgentie van de actie is.

In het hier uitgewerkte concept wordt iedere technische verandering van het barrièresysteem gebruikt om de momentane ontwikkeling en waarschijnlijkheid van het scenario te bepalen. Als de kwaliteitsparameters van de

Abstract

OCI Nitrogen aims to build up knowledge of (leading) indicators that provide insight in advance into the process safety performance of their ammonia production process. Two sub-studies have already been published in TtA. The first sub-study focused on ranking the most dangerous process units of the ammonia production process. In the second sub-study, the most important static equipment of the ammonia production process was mapped, which are related to mechanical failure mechanisms. This manuscript describes the third part of the research with the question of whether – based on the status of the barrier system – indicators can be derived that provide advance information about the development and likelihood of the major accident processes in the ammonia production process.

The accident processes are visualized as scenarios in bowties. This research focuses on the status of the preventive barriers on the left-hand side of the bowtie. Both the quality – expressed in reliability/availability and effectiveness – and the activation of the barrier system give an indication of the development of the accident scenarios and the likelihood of the central event. This likelihood is calculated as a loss of risk reduction compared to the original design. The calculations of this assessment result in indicators called "preventive barrier indicators". They provide an indication of the likelihood of the scenario. This likelihood is not an absolute value, but rather an indication of the change in the status quo which should initiate further action. This manuscript shows what this action must be and what the urgency of the action is.

In the presented concept, every technical change of the barrier system is used to determine the current development and likelihood of the scenario. If the quality parameters of the barriers are accommodated in an automated system, the preventive barrier indicator can be calculated and displayed in real time. This is different for non-technical changes: they will have to be entered and processed manually.

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

barrières in een geautomatiseerd systeem zijn ondergebracht, kan de preventieve barrière indicator real time worden berekend en weergegeven. Voor niet-technische veranderingen ligt dat anders: ze zullen handmatig moeten worden ingevoerd en verwerkt.

1. Inleiding

In 2015 heeft zich bij een aantal site users van Chemelot, een chemisch industriepark in Geleen, een aantal grote, proces gerelateerde incidenten voorgedaan (OVV⁴, 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. Blijkbaar is de focus op arbeidsveiligheid zo groot, dat de potentiële gevaren van de installatie of het chemische proces niet de aandacht krijgen die ze verdienen. Er wordt m.a.w. onvoldoende op 'early warnings' vanuit het proces geanticipeerd.

OCI Nitrogen, één van de grotere site-users van Chemelot, heeft ook te maken gehad met een aantal ernstige procesveiligheidsincidenten, o.a. bij zijn twee ammoniakfabrieken. Door deze incidenten moest het betreffende ammoniakproductieproces worden stilgelegd. Veel van de mogelijke ongevalsscenario's zijn inmiddels beter in kaart gebracht. Ze worden echter niet gemonitord waardoor er noch zicht is op de momentane waarschijnlijkheid van het optreden van de ongevalsscenario's noch zicht of ze zich al ontwikkeld hebben. Het is dan ook niet verrassend dat de incidenten telkens onverwacht kwamen en zich voorgedaan hebben zonder enige waarschuwing.

Het management van OCI Nitrogen heeft een eigen onderzoek gestart met de vraag of procesveiligheid 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. OCI Nitrogen wil weten welke indicatoren informatie geven over de majeure ongevalsscenario's van zijn ammoniakproductieprocessen. Twee deelonderzoeken zijn al eerder in TtA gepubliceerd. Het eerste deelonderzoek had betrekking op het 'ranken' van de gevaarlijkste procesonderdelen van het ammoniakproductieproces (Schmitz et al., 2018). In het tweede deelonderzoek zijn de belangrijkste statische installatiedelen van het ammoniakproductieproces in kaart gebracht, die gerelateerd zijn aan mechanische faalmechanismen (Schmitz, Swuste, Reniers & van Nunen, 2019a; Schmitz, Swuste, Reniers & Decramer, 2019b). Dit manuscript beschrijft het derde deel van het onderzoek: het bevat de resultaten over (preventieve barrière) indicatoren, die als doel hebben om de ontwikkeling van scenario's in een vroeg stadium te herkennen en te stoppen.

⁴ Op de laatste pagina is een afkortingenlijst opgenomen

De onderzoeksvraag die bij dit deelonderzoek hoort, is: *Kunnen er – op basis van de status van het barrière systeem – indicatoren worden afgeleid, die op voorhand informatie geven over de ontwikkeling en waarschijnlijkheid van de majeure ongevalsprocessen bij het ammoniak productieproces?*

De bijbehorende, te onderzoeken deelvragen zijn:

- 1) *Wat is een barrièresysteem?*
- 2) *Hoe kan de status van een barrièresysteem worden bepaald?*
- 3) *Wat is een indicator?*
- 4) *Aan welke criteria moet een indicator voldoen?*
- 5) *Wat is de relatie tussen indicatoren en ongevalsprocessen?*

Ongevalseprocessen 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 die, die majeur of catastrofaal kunnen zijn.

1.1 Het technische ammoniakproces

Het ammoniakproces kent aardgas, stoom en lucht als grondstoffen. Het proces bestaat uit twee hoofdonderdelen: het kraakproces en de synthese. In het kraakproces wordt methaan gekraakt tot waterstof, waarna lucht en daarmee stikstof in de juiste verhouding wordt toegevoegd en waarbij tot slot CO₂ wordt verwijderd. In de synthese wordt het stikstof-waterstof mengsel tot reactie gebracht naar ammoniak, waarna de ammoniak wordt gekoeld en afgevoerd. In het eerste deelonderzoek is het proces uitgebreider beschreven (Schmitz et al., 2018).

Dit manuscript heeft drie voorbeelden beschreven, waarvan er zich één in het kraakproces bevindt en twee in het synthese gedeelte. De naverbrander (par. 3.2, Figuur 7) is onderdeel van het kraakproces en kraakt onder zeer hoge temperatuur tot wel 1400 °C het resterende aardgas uit de reformer. De twee voorbeelden in de synthese zijn de moleculaire zeven (par. 3.3, Figuur 9), na de eerste trap van de synthesesegas compressor waar een druk van ca. 72 bar heerst, en het ammoniak expansievat (par. 3.1, Figuur 5) waar de druk net voor binnenkomst in het vat gereduceerd is van 200 naar 18 bar. Van alle drie de voorbeelden is telkens één ongevalsscenario uitgewerkt.

1.2 Indicatoren

Volgens Swuste, Theunissen, Schmitz, Reniers en Blokland (2016) is al veel geschreven over procesveiligheidsindicatoren, maar is er weinig empirisch onderzoek over gepubliceerd. Daarentegen wordt door veel (petro)chemische bedrijven gemeten en hebben HSE (2006), CCPS (2011), Cefic (2011, 2016), OGP (2011) en ANSI/API (2010) richtlijnen opgezet om procesveiligheid te monitoren aan de hand van indicatoren. Daarbij wordt vaak onderscheid gemaakt tussen 'leading' en 'lagging' indicatoren. Waar de eersten proxies zijn voor gevaren, barrières, scenario's en management factoren, geven de laatsten iets weer over de centrale, 'loss of containment/control' gebeurtenis en de gevolgen. Volgens Swuste et al. stelt de wetenschappelijke literatuur vraagtekens bij dit onderscheid.

Leidende indicatoren dienen informatie te verschaffen voordat een incident plaatsvindt en aan te geven in hoeverre men afwijkt van een ideale situatie. Ze zijn te beschouwen als een vroege waarschuwing (Dokas, Feehan & Syed, 2013; Knegtering & Pasmaan, 2013; Øien, Utne & Herrera, 2011; Øien, Utne, Tinmannsvik & Massaiu, 2011; Vinnem, 2010). Volgens Hale (2009) dienen (leidende) indicatoren het veiligheidsniveau te monitoren, te beslissen waar en hoe actie dient te worden genomen en hen te motiveren om de benodigde actie daadwerkelijk uit te voeren. In een richtlijn van de HSE (2006) zijn leidende indicatoren een vorm van actieve monitoring gericht op een aantal kritische onderdelen van het risicobeheersingssysteem. Ze dienen ertoe aan te zetten dat de belangrijkste acties of activiteiten worden uitgevoerd zoals ze bedoeld zijn.

Dit manuscript legt de nadruk op de leading indicatoren en richt zich op de barrières aan de linkerkant van de bowtie. Ze dienen zo gedefinieerd te zijn, dat ze inzicht verschaffen in de kwaliteit van de barrières en de ontwikkeling van scenario's (Swuste et al., 2016). Om het veilig-

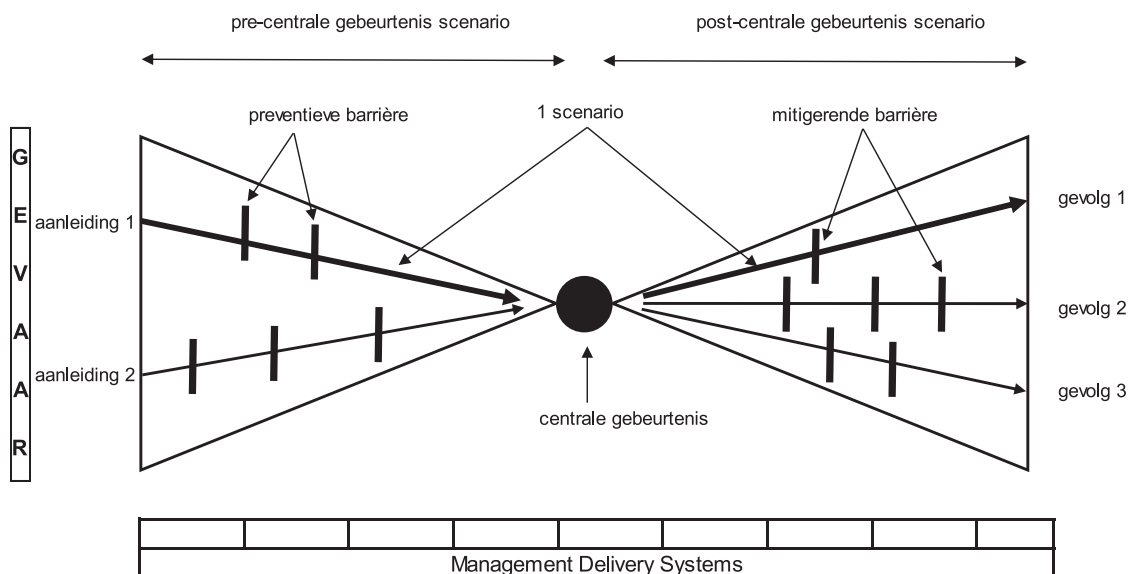
heidsniveau te meten dienen de barrièrekwaliteit en de scenario's actief te worden gemonitord. Dit betekent dat het monitoren continue en 'real time' dient te gebeuren.

1.3 Barrières

Het bowtie model ligt aan de basis van dit deelonderzoek. De bowtie is een geschikt model om visueel in kaart te brengen wat het verloop is van mogelijke ongevalsscenario's (van oorzaak tot gevolg), en laten toe hier preventieve en mitigerende barrières aan te koppelen (Schmitz et al., 2019a, 2019b). In de centrale gebeurtenis komt een gevaarlijke stof en/of energie ongecontroleerd vrij en ontstaat een toestand met een onbeheersbaar gevaar. Deze toestand dient te allen tijde te worden voorkomen. Om de ongevalsprocessen in een vroegtijdig stadium te kunnen stoppen (nog voordat een centrale gebeurtenis plaatsvindt), wordt in dit manuscript de aandacht gericht op de barrières in het linkerdeel van de bowtie, de preventieve barrières zoals in Figuur 1 is te zien.

Volgens Bellamy (2007) is een barrière alles wat voorkomt dat oorzaken zich ontwikkelen tot gevolgen, inclusief het voorkomen van de oorzaak zelf. Als barrières niet aanwezig zijn of worden doorbroken, kan een scenario zich ontwikkelen tot een centrale gebeurtenis, of kan de centrale gebeurtenis zich ontwikkelen tot ongewenste gevolgen.

Barrières zijn op verschillende manieren in te delen: Sklet (2006) maakt onderscheid tussen fysiek en niet-fysiek, terwijl Hollnagel (2008) ze naar functie of doel indeelt en Vinnem (2010) voor technische en operationele barrière-elementen kiest. Barrières zijn doorgaans opgebouwd uit drie elementen: een sensor, een beslisser en een uitvoerend orgaan, door Guldenmund (2006) aangeduid als een detectie, een diagnose en een actie. Een barrière werkt alleen als alle drie de onderdelen functioneren. In die zin is een barrière te beschouwen als een 3-uit-3 systeem.



Figuur 1 Het bow-tie model (Schmitz et al., 2019b)

Een barrièresysteem is het geheel van aanwezige barrières dat dient te voorkomen dat oorzaken zich ontwikkelen tot gevolgen. Het barrièresysteem in dit manuscript beperkt zich tot het geheel van aanwezige preventieve barrières (in het linkerdeel van de bowtie), dat dient te voorkomen dat oorzaken zich ontwikkelen tot de centrale gebeurtenis van het ongevalsproces. Om ervoor te zorgen dat oorzaken zich niet tot de centrale gebeurtenis ontwikkelen, moet een barrièresysteem aanwezig zijn, en van goede kwaliteit zijn. Verschillende parameters zeggen iets over de kwaliteit van barrières. Volgens Sklet (2006), Vinnem (2010) en Baddredine (2014) wordt de kwaliteit van barrières bepaald door:

- Effectiviteit (functionaliteit, capaciteit): het vermogen van een barrière om zijn noodzakelijke functie correct te uit te voeren;
- Betrouwbaarheid: de kans dat een barrière in staat is om zijn noodzakelijke functie, gegeven de vooraf vermelde voorwaarden, voor een bepaalde tijd uit te voeren;
- Beschikbaarheid: de kans dat een barrière op een willekeurig moment in tijd functioneert;
- Kosten: de kosten om de barrière functioneel, betrouwbaar en beschikbaar te houden;
- Robuustheid: het vermogen om te blijven functioneren in geval van (extreme) omgevingsinvloeden, zoals een incident;
- Reactietijd: de tijd vanaf het activeren van de barrière tot en met de uitvoering van de beoogde functie;
- 'Triggeren': de gebeurtenis of conditie, die de barrière activeert.

Bovengenoemde parameters karakteriseren de kwaliteit van een barrière. Het zijn 'qualifiers', eisen waaraan een kwaliteitsvolle barrière moet voldoen. De kwaliteit van barrières gaat achteruit doordat ze bijvoorbeeld slijten, verlopen, vervuilen, degraderen, worden aangetast of defect raken. Om de waarschijnlijkheid dat een scenario zich tot een centrale gebeurtenis ontwikkelt te meten, is het nodig om de afname in kwaliteit van de barrières te monitoren. Deze monitoring kan gedaan worden door middel van het selecteren van parameters, die in staat zijn om de afname van de kwaliteit van barrières in kaart te brengen. Dat betekent dat deze parameters gevoelig moeten zijn voor verandering, iets dat meerdere auteurs benadrukken als een belangrijk criterium (Hale, 2009; Vinnem, 2010; Sinelnikov, 2015). Van de bovengenoemde kwaliteitsparameters zijn effectiviteit, betrouwbaarheid en beschikbaarheid de enige, die voldoende in de tijd variëren en de mogelijke kwaliteitsafname van een barrière in beeld kunnen brengen. In dit manuscript worden, in lijn met Sklet's (2006) benadering, betrouwbaarheid en beschikbaarheid onder één noemer beschouwd. Daar waar effectiviteit het vermogen van een barrière is om zijn noodzakelijke functie correct te uit te voeren, wordt onder betrouwbaarheid/beschikbaarheid de kans verstaan, dat een barrière op een willekeurig moment in tijd functioneert. Het verschil schetst Sklet aan de hand van

een ESD-systeem. Een interne lekkage van een ESD-klep reduceert de effectiviteit, terwijl de betrouwbaarheid/beschikbaarheid er niet door beïnvloed wordt. Een barrière dient zowel betrouwbaar/beschikbaar als effectief te zijn om de ontwikkeling van een ongevalsscenario te stoppen.

Betrouwbaarheid/beschikbaarheid en effectiviteit zijn in dit manuscript geselecteerd om de kwaliteit van een barrière of barrièresysteem te monitoren. Door deze parameters te bewaken kan een beeld van de kwaliteitsstatus van een barrière of barrièresysteem gevormd worden, hetgeen zich laat vertalen in een momentane waarschijnlijkheid van een ongevalsscenario.

Preventief en correctief onderhoud, inspectie- en testprogramma's en management- en administratieve aspecten beïnvloeden de betrouwbaarheid/beschikbaarheid en effectiviteit van technische barrièresystemen (Vinnem, 2006). Het is binnen de (petro)chemische industrie vereist om barrières volgens een vastgestelde planning te onderhouden, te inspecteren en te testen op hun werking. Het niet (goed) of niet tijdig uitvoeren van zo'n programma kan zowel de betrouwbaarheid/beschikbaarheid als de effectiviteit van een barrière nadelig beïnvloeden. In dit manuscript is aangenomen dat het onderhoud, de inspectie en het testen van een barrière kwalitatief goed wordt uitgevoerd en dat de barrière na tijdig onderhoud betrouwbaar/beschikbaar en effectief is. Daarbij dient het testen zo veel mogelijk aan de specifieke condities van de plant te voldoen. Een barrière kan namelijk in de werkplaats zijn goedgekeurd maar niet naar behoren functioneren in de eigenlijke installatie (Mannan, 2005 met verwijzing naar Lees, 1976).

Naast de invloed die onderhoud, inspectie en testen hebben, zijn er bijkomende aspecten die de betrouwbaarheid/beschikbaarheid en effectiviteit kunnen beïnvloeden. Een barrière kan om verschillende redenen (conform specificaties) niet betrouwbaar/beschikbaar en/of niet effectief zijn: door een defect of door het (bewust) buiten werking te stellen. Een defecte barrière zal niet functioneren op het moment dat het nodig is en/of de beoogde functie niet correct uitvoeren en is daarom per definitie niet betrouwbaar/beschikbaar en/of niet effectief. Bij SIL-gekwalficeerde instrumentele barrières zit een zekere mate van zelfmeldendheid in het ontwerp ingebouwd, d.w.z. dat een deel van de defecten automatisch opgemerkt en gemeld wordt. In SIL-gekwalficeerde beveiligingsloops worden namelijk bij voorkeur type B instrumenten toegepast. Zij beschikken over diagnostiek omdat ze zijn gebaseerd op (programmeerbare) elektronische technologie. Vanwege deze diagnostiek kunnen fouten gedetecteerd worden die anders latent zouden blijven (Houtermans, 2014). Mechanische beveiligingen daarentegen beschikken doorgaans niet over zelfdiagnostiek. Een defecte mechanische beveiliging wordt pas opgemerkt bij de eerstvolgende inspectie of test of wanneer een incident plaatsvindt die door de beveiliging voorkomen had moeten worden.

Een barrière die bewust buiten werking gesteld is, is niet betrouwbaar/beschikbaar. Dit wordt bijvoorbeeld gedaan voor het uitvoeren van onderhoud, een inspectie of een test. Bij instrumentele beveiligingen wordt dit veelal aangeduid met de term 'overbruggen'. 'Overbruggen' kan op verschillende manieren, maar in alle gevallen voert een overbrugde barrière zijn functie niet meer uit.

Samengevat schetsen de parameters betrouwbaarheid/beschikbaarheid en effectiviteit een beeld van de momentane kwaliteit van een barrière en de kans dat een scenario zich kan ontwikkelen tot een centrale gebeurtenis. Daarbij is het volgende aangenomen:

- Een barrière die na goed en tijdig onderhoud, inspectie en testen in bedrijf wordt genomen, is betrouwbaar/beschikbaar en effectief.
- Een niet goede of niet-tijdige uitvoering van het onderhouds-, inspectie- en testprogramma beïnvloedt de betrouwbaarheid/beschikbaarheid en de effectiviteit nadelig, waardoor de werking van de barrière niet meer gegarandeerd is. Het onderhouds-, inspectie- en testprogramma van technische barrières wordt kwalitatief goed uitgevoerd. De garantie dat dit gebeurt, vindt plaats via de niet-technische barrières of management factoren van het management delivery systeem.
- Een barrière die overbrugd of defect is, is niet betrouwbaar/beschikbaar en/of niet effectief en dus niet meer in staat een ongevalsscenario te onderbreken.

2. Methode en techniek

2.1 Preventieve barrière indicatoren

Op basis van de bovenstaande kwaliteitsparameters betrouwbaarheid/beschikbaarheid en effectiviteit kan een barrière de status aannemen van (1) betrouwbaar/beschikbaar en effectief, (2) mogelijk niet betrouwbaar/beschikbaar en/of niet effectief en (3) niet betrouwbaar/beschikbaar en/of niet effectief. De barrièrestatus geeft in dit geval respectievelijk aan dat (1) de barrière werkt, (2) misschien werkt of (3) zeker niet werkt. De barrièrestatus geeft op die manier informatie over de waarschijnlijkheid dat het scenario zich kan ontwikkelen tot een centrale gebeurtenis.

Betrouwbare/beschikbare en effectieve barrières zullen, wanneer een scenario in gang is gezet, in werking treden en het scenario stoppen voordat de centrale gebeurtenis plaatsvindt. Het scenario heeft zich ontwikkeld tot aan de aangesproken barrière(s) en niet verder. Op basis van de aangesproken barrière(s) kan de positie bepaald worden waarin het scenario zich momentaan bevindt. De positie in het scenario geeft een beeld van de resterende barrières die bescherming bieden tegen de centrale gebeurtenis. De status van de resterende barrières kan – op basis van de kwaliteitsparameters betrouwbaarheid/beschikbaarheid en effectiviteit – informatie geven over de waarschijnlijkheid, dat het scenario zich had kunnen ontwikkelen tot de centrale gebeurtenis.

Een barrière kan naast 'betrouwbaar/beschikbaar en effectief', 'mogelijk niet betrouwbaar/beschikbaar en/of niet effectief', en 'niet betrouwbaar/beschikbaar en/of niet effectief' bijkomend de status van 'aangesproken' of 'niet aangesproken' aannemen. In dit manuscript is daarbij aangenomen dat een aangesproken barrière niet alleen op het juiste moment aanspreekt (betrouwbaar/beschikbaar), maar ook de vooraf gedefinieerde functie uitvoert binnen de vereiste responstijd (effectief). Als een beschikbare/betrouwbare barrière aangesproken wordt, maar niet effectief blijkt te zijn, zal het scenario zich verder ontwikkelen. Bij een aangesproken barrière, die naast beschikbaar/betrouwbaar ook effectief is, is het ongevalsscenario weliswaar gestopt, maar is aandacht vereist omdat het scenario in gang gezet is.

De status van de barrières kan worden gebruikt om de waarschijnlijkheid van de centrale gebeurtenis waarvoor de barrières worden ingezet, te bepalen. Van de waarschijnlijkheid kan vervolgens een indicator worden afgeleid. De indicator, die vanaf hier 'preventieve barrière indicator' genoemd wordt, geeft de waarschijnlijkheid weer van het optreden van de centrale gebeurtenis. De preventieve barrière indicator is een maat voor:

- De kwaliteit van alle (preventieve) barrières van het barrièresysteem (mate van betrouwbaarheid/beschikbaarheid en effectiviteit);
- Het al dan niet aangesproken zijn één of meerdere barrières van het (preventieve) barrièresysteem;
- De ontwikkeling van het (linkerdeel van het) ongevalsscenario.

De uitkomst van de preventieve barrière indicator wordt weergegeven in vier kleuren: groen (zeer onwaarschijnlijk), geel (niet onwaarschijnlijk), oranje (waarschijnlijk) en rood (zeer waarschijnlijk). Het management dient voor elk van deze categorieën te bepalen hoe en door wie hierop geacteerd moet worden. Dit valt buiten de scope van het manuscript.

In Tabel 1 zijn de mogelijke (preventieve) barrière statussen weergegeven en gekoppeld aan symbolen. Deze symbolen worden als afkortingen in dit manuscript verder toegepast.

2.2 Relatieve risicoreductie

In paragraaf 1.3 is geconcludeerd dat een niet goede of niet tijdige uitvoering van het onderhouds-, inspectie- en testprogramma de betrouwbaarheid/beschikbaarheid en effectiviteit nadelig kan beïnvloeden en een 100% betrouwbaarheid/beschikbaarheid en effectiviteit niet meer gegarandeerd zijn. Aangenomen dat het onderhouds-, inspectie- en testprogramma kwalitatief goed wordt uitgevoerd, roept dit twee vragen op: Wat is niet-tijdig en in hoeverre worden betrouwbaarheid/beschikbaarheid en effectiviteit hierdoor nadelig beïnvloed?

Tabel 1 Mogelijke barrière statussen en bijbehorende symbolen

Barrière status		Barrière symbool
Betrouwbaar/beschikbaar, effectief, en niet aangesproken		V
Mogelijk niet betrouwbaar/beschikbaar en/of niet effectief	Niet op tijd onderhouden, geïnspecteerd of getest	?
Niet betrouwbaar/beschikbaar en/of niet effectief	Overbrugd of defect	⊖
Betrouwbaar/beschikbaar, effectief en aangesproken		!

IEC (2016) heeft de onbeschikbaarheid van een barrière uitgedrukt als functie van de tijd: $U(t) = 1 - e^{-\lambda t}$, waarbij λ de faalfrequentie van de barrière is en t elk willekeurig moment in de tijd. In dit manuscript wordt onder $U(t)$ het tegengestelde verstaan van betrouwbaarheid/beschikbaarheid en effectiviteit. $U(t)$ is daarbij een dimensieloos getal tussen 0 en 1, soms ook uitgedrukt als een percentage tussen 0 en 100%. Uit de formule blijkt dat $U(t)$ toeneemt naarmate de tijd vordert. Als een barrière nooit onderhouden, geïnspecteerd en getest wordt, en de tijd t naar oneindig loopt, zal $U(t)$ naar 1 gaan. Met andere woorden, de barrière zal met 100% zekerheid het niet doen op het moment dat het nodig is (niet betrouwbaar/beschikbaar) en/of zijn noodzakelijke functie niet (goed) uitvoeren (niet effectief). Om de betrouwbaarheid/beschikbaarheid en de effectiviteit van een barrière te garanderen, dient een barrière dus tijdig te worden gecontroleerd, d.w.z. onderhouden, geïnspecteerd en getest. De frequentie waarmee de controle dient te gebeuren, kan zoals in de formule aangegeven, worden berekend om de volgens ontwerp gewenste betrouwbaarheid/beschikbaarheid en effectiviteit te bereiken. De risicoreductie RR die met de barrière bereikt kan worden, is de reciproke waarde van $U(t)$: $(1 - e^{-\lambda t})^{-1}$. De risicoreductie wordt veelal uitgedrukt in decaden, d.w.z. als exponent van een macht van 10 ofwel een orde van grootte. In dit manuscript wordt de risicoreductie in decaden afgekort met RRD, waarbij de RRD gelijk is aan $^{10}\log(1 - e^{-\lambda t})^{-1}$.

Als de controle met het (gewenste) tijdsinterval T gebeurt, is de maximale $U(t)$ van de barrière in overeenstemming met het ontwerp en gelijk aan $1 - e^{-\lambda T}$. De minimale risicoreductie RR van de barrière is dan $(1 - e^{-\lambda T})^{-1}$ en de mini-

male RRD $^{10}\log(1 - e^{-\lambda T})^{-1}$. De barrière is als betrouwbaar/beschikbaar en effectief te kwalificeren. Als een barrière later gecontroleerd wordt dan de gewenste periode T , zal de RRD kleiner worden en mogelijk niet aan de RR voldoen die voor de barrière vereist is. In Tabel 2 is weergegeven wat uitstel van het onderhoud, inspectie en testen voor effect heeft op de risicoreductie RR en de risicoreductie in decaden RRD. Hierbij is voor $U(t)$ een basis van resp. 0.1, 0.01 en 0.001 gekozen, die bij een controleperiode ter grootte van T bereikt kan worden. Uit Tabel 2 blijkt dat als de controle bijvoorbeeld met een halve periode wordt uitgesteld tot het tijdstip $1.5T$, $U(t)$ met een factor 1.5 toeneemt tot resp. 0.15, 0.015 en 0.0015 en de RR met 33% afneemt.

Voor dit manuscript is aangenomen dat een barrière mogelijk niet betrouwbaar/beschikbaar en/of niet effectief is als de RR met 50% gedaald is t.o.v. de gewenste waarde volgens het ontwerp. Uit Tabel 2 blijkt dat dit het geval is als een barrière gedurende meer dan een dubbele periode T niet gecontroleerd (onderhouden, geïnspecteerd en getest) is.

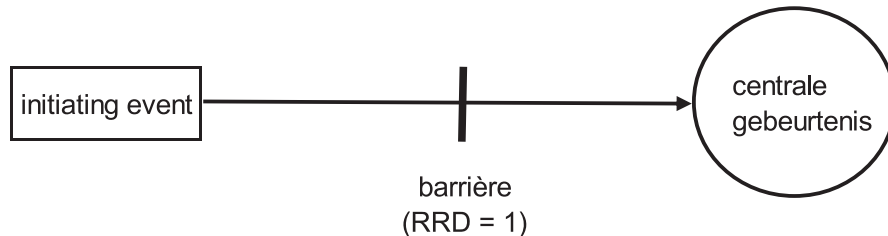
Op basis van de RRD van het barrièresysteem is een indicator ontwikkeld, de preventieve barrière indicator. De preventieve barrière indicator geeft de status van het barrièresysteem weer en is het quotiënt van de momentane RRD en de volgens het ontwerp gewenste RRD. Dit wordt ook relatieve risicoreductie in decaden genoemd: RRRD. $RRRD(t) = [RRD(t) / RRD(t_{ontwerp})] \times 100\%$. De RRRD of preventieve barrière indicator kan op basis van de berekening vier kleuren aannemen, zoals in Tabel 3 is te zien. De grenzen bepalen de urgentie van de

Tabel 2 De invloed van de controleperiode T op $U(t)$, RR en RRD

Controleperiode T	$U(t) = 1 - e^{-\lambda t}$	$RR = (1 - e^{-\lambda t})^{-1}$	$RRD = ^{10}\log(1 - e^{-\lambda t})^{-1}$
T	0.10 / 0.010 / 0.0010	10 / 100 / 1000	1 / 2 / 3
1.5T	0.15 / 0.015 / 0.0015	6.67 / 66.7 / 667	0.82 / 1.82 / 2.82
2T	0.19 / 0.019 / 0.0019	5.25 / 52.5 / 525	0.72 / 1.72 / 2.72
2.12T	0.20 / 0.020 / 0.0020	5.01 / 50.1 / 501	0.70 / 1.70 / 2.70
3T	0.27 / 0.027 / 0.0027	3.69 / 36.9 / 369	0.57 / 1.57 / 2.57
3.66T	0.32 / 0.032 / 0.0032	3.16 / 31.6 / 316	0.50 / 1.50 / 2.50
6.58T	0.50 / 0.050 / 0.0050	2.00 / 20.0 / 200	0.30 / 1.30 / 2.30
Geen controle	1	1	0

Tabel 3 De kleur van de preventieve barrière indicator t.o.v. RRRD

RRRD	RRRD > 75%	50% < RRRD ≤ 75%	25% < RRRD ≤ 50%	RRRD ≤ 25%
Prev. barrière indicator	groen	geel	oranje	rood



Figuur 2 Een scenario met één barrière van 1 decade

preventieve barrière indicator. Ze zijn in dit manuscript gelijkmatig verdeeld en vastgesteld op 25%, 50% en 75%.

De preventieve barrière indicator, RRRD, kan niet alleen bepaald worden uit de kwaliteitsparameters, maar ook uit de activering van het barrièresysteem. Als het barrièresysteem is aangesproken, kan op basis van de aangesproken barrière(s) gekeken worden hoeveel barrières nog bescherming bieden tegen de centrale gebeurtenis. De berekening van de RRRD kan hier op gelijke wijze worden toegepast: $RRRD(t) = [RRD(t) / RRD(t_{ontwerp})] \times 100\%$, waarbij $RRD(t)$ de risicoreductie in decaden is van het (resterende) barrièresysteem tot aan de centrale gebeurtenis. De RRRD is daarmee een maat geworden voor het kwaliteitsverlies van het barrièresysteem. De kleuren in Tabel 3 geven de waarschijnlijkheid weer van het optreden van de centrale gebeurtenis. Naarmate de kleur van groen naar rood opschuift, wordt de kans op de centrale gebeurtenis groter. Als één van de barrières aangesproken is, maar wel betrouwbaar/beschikbaar en effectief is, wordt in aanvulling op de kleur de preventieve barrière indicator voorzien van een uitroepteken om aan te geven dat het scenario zich aan het ontwikkelen is en dat aandacht vereist is.

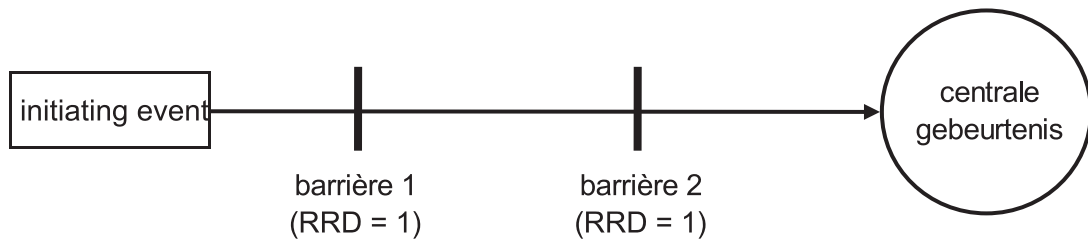
Hieronder zijn drie scenario's uitgewerkt van een 1, 2 en 3 decaden barrièresysteem. Het barrièresysteem bevindt zich telkens in het linkerdeel van de bowtie. In het eerste voorbeeld is een scenario beveiligd door een barrièresysteem dat bestaat uit één barrière van 1 decade, zie Figuur 2.

Tabel 4 laat de preventieve barrière indicator zien t.o.v. de barrièrestatus. Bij een mogelijk niet betrouwbare/beschikbare en/of niet effectieve barrière is de RR van 10 teruggevallen naar 5. De RRD is nog maar 0.70 waardoor de RRRD op 70% staat. De preventieve barrière indicator kleurt geel. Als de barrière niet betrouwbaar/beschikbaar en/of niet effectief is, kleurt de preventieve barrière indicator rood omdat de RRD tot 0 is gereduceerd en daarmee ook de RRRD. In het geval dat de barrière betrouwbaar/beschikbaar, effectief en aangesproken is en het scenario zich niet verder ontwikkelt, is de RRD 1 (de barrière heeft immers gewerkt en is dus nog intact) en de RRRD gelijk aan 100%. De preventieve barrière indicator kleurt groen. Daar de barrière is aangesproken en het scenario geïnitieerd is, lijkt het evident dat er gerichte actie wordt ondernomen. Dit wordt gevisualiseerd door een uitroepteken in het groene veld te plaatsen. Het barrièresysteem is weliswaar betrouwbaar/beschikbaar en effectief waardoor het scenario zich niet verder kan ontwikkelen, maar het scenario is wel geactiveerd.

In Figuur 3 is een scenario beveiligd door een barrièresysteem dat bestaat uit twee onafhankelijke barrières van elk 1 decade. De RRD van het barrièresysteem is de som van elk van de RRD's ($RRD = RRD_1 + RRD_2 = 1 + 1 = 2$). In Tabel 5 is aangegeven wat de preventieve barrière indicator is t.o.v. de status van de barrières. Als één van de barrières mogelijk niet betrouwbaar/beschikbaar en/of niet effectief is, is de RRD van 2 naar 1.70 gereduceerd ($RRD = 0.70 + 1$). De RRRD is gelijk aan 85% ($(1.70/2) \times 100\%$). De preventieve barrière indicator staat in dit geval

Tabel 4 Uitkomst van de preventieve barrière indicator van een 1-decade-barrièresysteem bestaande uit 1 barrière

Barrière	RRD	RRRD	Prev. barrière indicator
V	1	100%	Groen
?	0.70	70%	Geel
∅	0	0%	Rood
!	1	100%	!Groen!



Figuur 3 Een scenario met twee onafhankelijke barrières van elk 1 decade

op groen. Als beide barrières mogelijk niet betrouwbaar/beschikbaar en/of niet effectief zijn geworden, is de RRD naar 1.40 gereduceerd ($RRD = 0.70 + 0.70$) en kleurt de preventieve barrière indicator geel ($RRRD = (1.40/2) \times 100\% = 70\%$). Als één van de barrières niet betrouwbaar/beschikbaar is, wordt de RRD van 2 naar 1 gereduceerd ($RRD = 0 + 1$) en bedraagt de RRRD 50% ($(1/2) \times 100\%$). De preventieve barrière indicator kleurt oranje. Bij twee niet betrouwbare/beschikbare barrières kleurt de preventieve barrière indicator rood.

In Tabel 5 is ook te zien hoe de preventieve barrière indicator kleurt bij het aanspreken en naar behoren werken van barrière 1 en barrière 2. Bij het aanspreken van barrière 1 is de RRD minimaal 1 ($RRD = 1 + RRD_2$). De preventieve barrière indicator kleurt afhankelijk van de status van de tweede barrière. Bij het aanspreken van barrière 2 is de RRD van het barrièresysteem gelijk aan 1. Barrière 2 kan alleen aanspreken als de eerste barrière niet betrouwbaar/beschikbaar en/of niet effectief is. Het scenario heeft zich tot aan de tweede barrière ontwikkeld. De RRRD is gereduceerd tot 50% ($(1/2) \times 100\%$) en de preventieve barrière indicator kleurt oranje.

Het derde voorbeeld is uitgewerkt in Figuur 4 en laat een scenario zien van een 3-decade-barrièresysteem bestaande uit twee barrières: één van 1 decade en één

van twee decaden. Dit voorbeeld vertegenwoordigt bijvoorbeeld een hogedruk scenario, dat voorzien is van een SIL 1 gekwalificeerde, instrumentele beveiliging en een (mechanische) veerveiligheid.

In Tabel 6 is de RRD, de RRRD en de preventieve barrière indicator weergegeven t.o.v. de status van de twee barrières. Er kan eenzelfde redenering worden gevolgd als bij het tweede voorbeeld met twee identieke barrières. De barrières verschillen echter van elkaar in betrouwbaarheid/beschikbaarheid en effectiviteit en dat resulteert in verschillende RRD's, RRRD's en preventieve barrière indicator kleuren.

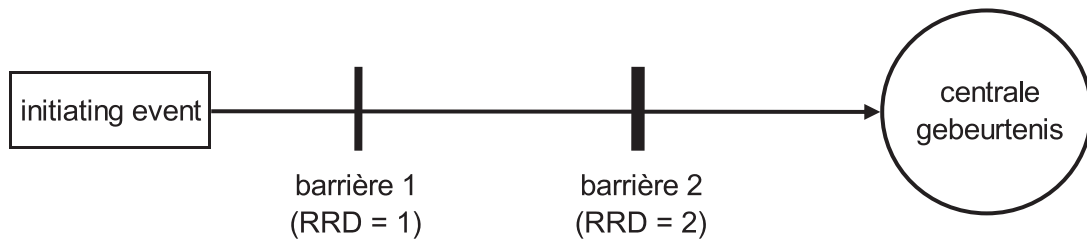
2.3 Speciale gevallen

2.3.1 M-uit-n barrièresystemen

M-uit-n barrièresystemen worden veelvuldig toegepast in de procesindustrie. Ze hebben door de meervoudige uitvoering een grotere betrouwbaarheid/beschikbaarheid en effectiviteit en zijn bij uitstek geschikt voor toepassing in scenario's met een hoog risico. Een m-uit-n barrièresysteem bestaat uit n seriële, identieke barrières waarbij de sensoren dezelfde instelwaarde hebben en waarbij dezelfde uitvoerende organen worden aangestuurd. Een m-uit-n barrièresysteem wordt geactiveerd als minimaal m barrières zijn aangesproken. De meest voorkomende uitvoeringsvormen zijn het 1-uit-2, 1-uit-3 en 2-uit-3 systeem.

Tabel 5 Preventieve barrière indicator van een 2-decaden-barrièresysteem bestaande uit 2 onafhankelijke barrières van elk 1 decade

Barrière 1	Barrière 2	RRD	RRRD	Prev. barrière indicator
V	V	2	100%	Groen
V	?	1.70	85%	Groen
V	Ø	1	50%	Oranje
?	V	1.70	85%	Groen
?	?	1.40	70%	Geel
?	Ø	0.70	35%	Oranje
Ø	V	1	50%	Oranje
Ø	?	0.70	35%	Oranje
Ø	Ø	0	0%	Rood
Ø	!	1	50%	!Oranje!
!	V	2	100%	!Groen!
!	?	1.70	85%	!Groen!
!	Ø	1	50%	!Oranje!



Figuur 4 Een scenario met twee onafhankelijke barrières van resp. 1 en 2 decaden

Bij een mogelijk niet betrouwbaar/beschikbaar en/of niet effectief m-uit-n barrièresysteem is, net zoals bij een enkelvoudige barrière, de RR met 50% gedaald. Een niet betrouwbaar/beschikbaar en/of niet effectief m-uit-n barrièresysteem heeft een RR van nul. Daar het niet altijd gemakkelijk is om de status af te leiden van een m-uit-n barrièresysteem op basis van de status van de enkelvoudige barrières, volgt hieronder een aantal regels:

- Als een mogelijk niet betrouwbaar/beschikbaar en/of niet effectief m-uit-n barrièresysteem is aangesproken, is ten minste één van de aangesproken barrières mogelijk niet betrouwbaar/beschikbaar en/of niet effectief. Dat betekent dat een m-uit-n barrièresysteem mogelijk niet betrouwbaar/beschikbaar en/of niet effectief is als minstens $(n-m+1)$ barrières mogelijk niet betrouwbaar/beschikbaar en/of niet effectief zijn. Voor elk tweetal mogelijk niet betrouwbare/beschikbare en/of niet effectieve barrières kan daarbij één niet betrouwbare/beschikbare en/of niet effectieve barrière in de plaats komen. Voor een 1-uit-2 systeem betekent dit dat het barrièresysteem mogelijk niet betrouwbaar/beschikbaar en/of niet effectief is als beide barrières mogelijk niet betrouwbaar/beschikbaar en/of niet effectief zijn of als één van beide barrières niet betrouwbaar/beschikbaar en/of niet effectief is;
- Bij een niet betrouwbaar/beschikbaar en/of niet effectief m-uit-n barrièresysteem zijn er minstens zo veel barrières niet betrouwbaar/beschikbaar en/of niet

effectief dat het systeem niet geactiveerd kan worden. Een m-uit-n barrièresysteem is niet betrouwbaar/beschikbaar en/of niet effectief als er ten minste $(n-m+1)$ barrières niet betrouwbaar/beschikbaar en/of niet effectief zijn. Een 2-uit-3 systeem is niet betrouwbaar/beschikbaar en/of niet effectief als 2 of alle drie de barrières niet betrouwbaar/beschikbaar en/of niet effectief zijn. Het barrièresysteem kan immers met 2 of 3 niet betrouwbare/beschikbare en/of niet effectieve barrières niet geactiveerd worden;

- Een m-uit-n barrièresysteem is aangesproken als minstens m barrières geactiveerd zijn, want dat is de voorwaarde voor het activeren van het m-uit-n barrièresysteem. Bij een 1-uit-3 barrièresysteem is dat ten minste één barrière.

In Tabel 7 is aan de hand van een 1-uit-2, 1-uit-3 en een 2-uit-3 systeem aangegeven wanneer deze barrièresystemen mogelijk niet betrouwbaar/beschikbaar en/of niet effectief, niet betrouwbaar/beschikbaar en/of niet effectief dan wel betrouwbaar/beschikbaar, effectief en aangesproken zijn op basis van de status van de individuele barrières.

2.3.2 Slapende regelingen

Een slapende regeling, ook passieve regeling genoemd, is een regeling die pas begint te regelen vanaf een bepaalde proceswaarde. Een voorbeeld van een slapende regeling

Tabel 6 Preventieve barrière indicator van een 3-decaden-barrièresysteem bestaande uit een 1 en 2 decaden barrière

Barrière 1	Barrière 2	RRD	RRRD	Prev. barrière indicator
V	V	3	100%	Groen
V	?	2.70	90%	Groen
V	∅	1	33%	Oranje
?	V	2.70	90%	Groen
?	?	2.40	80%	Groen
?	∅	0.70	23%	Rood
∅	V	2	67%	Geel
∅	?	1.70	57%	Geel
∅	∅	0	0%	Rood
∅	!	2	67%	!Geel!
!	V	3	100%	!Groen!
!	?	2.70	90%	!Groen!
!	∅	1	33%	!Oranje!

Tabel 7 Uitgewerkte status van 1-uit-2, 1-uit-3 en 2-uit-3 barrièresystemen

Status van een m-uit-n systeem	1-uit-2 systeem	1-uit-3 systeem	2-uit-3 systeem
Mogelijk niet betrouwbaar/ beschikbaar en/of niet effectief	Beide barrières zijn mogelijk niet betrouwbaar/beschikbaar en/of niet effectief	Alle drie de barrières zijn mogelijk niet betrouwbaar/beschikbaar en/of niet effectief	Twee of drie barrières zijn mogelijk niet betrouwbaar/ beschikbaar en/of niet effectief
	Eén barrière is niet betrouwbaar/ beschikbaar en/of niet effectief	Eén barrière is mogelijk niet betrouwbaar/beschikbaar en/of niet effectief en één van de twee andere barrières is zeker niet betrouwbaar/beschikbaar en/of niet effectief	Eén barrière is niet betrouwbaar/ beschikbaar en/of niet effectief
Niet betrouwbaar/beschikbaar en/of niet effectief	Beide barrières zijn niet betrouwbaar/beschikbaar en/of niet effectief	Alle drie de barrières zijn niet betrouwbaar/beschikbaar en/of niet effectief	Twee of drie barrières zijn niet betrouwbaar/beschikbaar en/of niet effectief
Betrouwbaar, beschikbaar en aangesproken	Tenminste één barrière is geactiveerd	Tenminste één barrière is geactiveerd	Tenminste twee barrières zijn geactiveerd

is een afblaasregeling die open dient te gaan vanaf een bepaalde druk van het proces. De afblaasklep zal dan open regelen naar een positie zodat de gewenste proceswaarde wordt bereikt. Een slapende regeling heeft als doel de verdere ontwikkeling van het scenario tegen te houden en kan beschouwd worden als een barrière. In Tabel 8 is een (regeling) symbool gekoppeld aan de status van een slapende regeling.

2.3.3 Overbeveiligde scenario's

Het kan voorkomen dat scenario's 'overbeveiligd' zijn, d.w.z. dat ze zijn voorzien van een beter barrièresysteem dan dat uit een risicobeoordeling nodig blijkt. Als alle barrières worden meegenomen, zal de geïnstalleerde RR groter zijn dan de vereiste RR. Afhankelijk van de status van het barrièresysteem, zou de RRRD groter dan 100% kunnen zijn. Tabel 3, die de kleur van de preventieve barrière indicator weergeeft t.o.v. de RRRD, blijft ook in zo'n geval onverminderd van kracht.

2.3.4 SIL a gekwalificeerde SIF's

In de procesindustrie worden behalve SIL-gekwalficeerde, instrumentele beveiligingen ook instrumentele beveiligingen gebruikt die geen SIL-kwalificatie hebben zoals omschreven in IEC 61511 (IEC, 2016). In deze Europese norm staan vier SIL's gespecificeerd, met SIL 4 als hoogste en SIL 1 als laagste niveau. SIL a gekwalificeerde SIF's (Safety Instrumented Function) maken echter ook vaak deel uit van een barrièresysteem, maar voldoen niet aan een SIL-niveau zoals gedefinieerd in IEC 61511. Volgens

deze richtlijn zijn aan SIL a gekwalificeerde SIF's geen speciale veiligheidseisen gekoppeld. In dit manuscript wordt aangenomen dat een SIF met een SIL a kwalificatie een RRD van (minimaal) 0,5 heeft. Dat betekent bijvoorbeeld dat twee onafhankelijke SIL a SIF's een totale RRD van 1 hebben en gelijkgesteld kunnen worden aan een SIL 1 SIF.

3. Resultaten

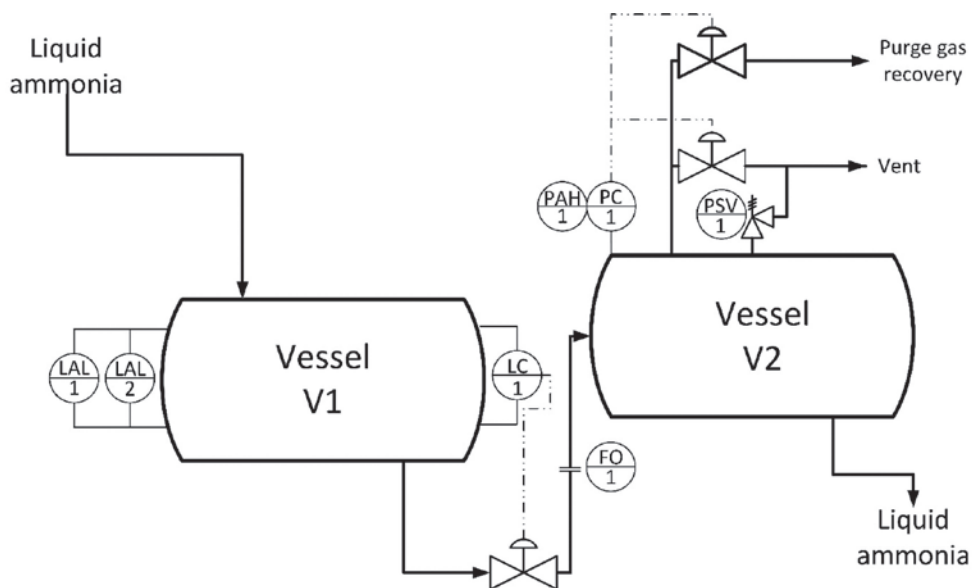
Van een drietal procesapparaten is hieronder een geloofwaardig ongevalsscenario uitgewerkt. De functie van elk procesdeel wordt telkens kort beschreven. Vervolgens is het scenario uitgelegd en het huidig geïmplementeerde barrièresysteem dat de ontwikkeling ervan moet voorkomen. Tot slot is aan de hand van de status van de individuele barrières van het barrièresysteem een inschatting gemaakt van de waarschijnlijkheid van het scenario.

3.1 Hoge druk in het ammoniak expansievat (V2)

Vloeibare ammoniak uit ammoniakafscheider V1 wordt voor intrede in expansievat V2 d.m.v. een smoorpijp (FO1) in druk gereduceerd van ca. 200 bar tot ca. 18 bar bij een temperatuur van ca. -25 °C. Bij dit expanderen komen H₂, N₂, CH₄ en Ar in gasvorm vrij, die opgelost waren in de vloeibare ammoniak. Deze expansiegassen worden onder normale bedrijfsomstandigheden uit het expansievat afgevoerd naar de lagedruk spuigaswasser (aangeduid als 'purge gas recovery') via drukregeling PC1. De vloeibare ammoniak gaat vervolgens naar het ammoniak koel-systeem.

Tabel 8 Slapende regeling indicator

Slapende regeling status	Regeling symbool
Betrouwbaar en beschikbaar en niet aangesproken	V
Mogelijk niet betrouwbaar/ beschikbaar en/of niet effectief	Niet op tijd onderhouden, geïnspecteerd en getest ?
Niet betrouwbaar/beschikbaar en/of niet effectief	Op handbediening of defect ⊖
Betrouwbaar, beschikbaar en aangesproken	!



Figuur 5 Ammoniak afscheider V1 en ammoniak expansievat V2

De afvoer naar het expansievat wordt bepaald door de niveauregeling van de ammoniakafscheider, LC1. Als het niveau in de ammoniakafscheider te laag wordt, zal ammoniakgas i.p.v. vloeibare ammoniak afgevoerd worden. De drukreductie over de smoorpijp die alleen goed werkt bij vloeibare ammoniak, zal dan nauwelijks plaatsvinden. De gasvormige ammoniak vanuit de ammoniakafscheider zal voor een snelle drukopbouw zorgen in het expansievat. Het expansievat zal falen als gevolg van een te grote overdruk.

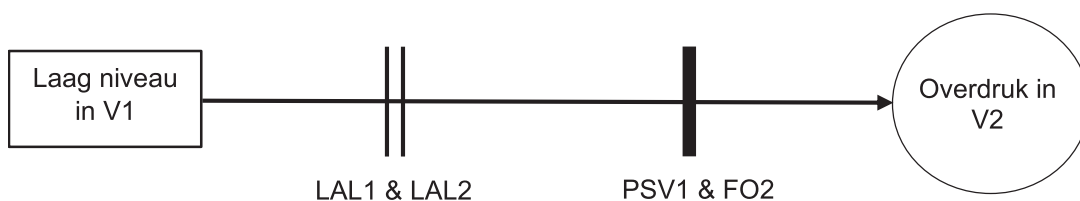
Om bovengenoemd scenario te voorkomen is de ammoniakafscheider voorzien van twee identieke laag niveau alarmen (LAL1 en LAL2). De alarmen zijn te beschouwen als een 1-uit-2 alarmsysteem. Bij een laag niveau alarm dient de operator de afvoer van de ammoniakafscheider te minderen om gasdoorslag naar het expansievat te voorkomen. In dat geval zal de drukregeling van het expansievat niet in staat zijn om het aangevoerde ammoniakgas tijdig af te voeren richting 'vent'. Aangezien de drukopbouw nagenoeg instantaan is, biedt het van de drukregeling afgeleide, hogedruk alarm de operator geen mogelijkheid om op tijd in te grijpen. Zowel de drukregeling als het hogedruk alarm kunnen niet als barrières worden meegenomen. Het expansievat is tot slot voorzien van een (mechanische) veerveiligheid (PSV1). De veerveiligheid is qua capaciteit afgestemd op de smoorpijp. Bij gasdoorslag zal de veerveiligheid aanspreken en falen van V2 voorkomen.

Het 1-uit-2 laag niveau alarmsysteem heeft een gezamenlijke RRD van 1, opgebouwd uit twee RRD's van 0,5. De veerveiligheid-smoorpijp combinatie heeft een RRD van 2. Het scenario is volgens specificatie beveiligd door een barrièresysteem met een totale RRD van 3. In Figuur 5 zijn de twee vaten getekend met de aanwezige beveiligingen. Figuur 6 laat de bowtie zien met daarin de barrières die een overdruk in het expansievat moeten voorkomen. De twee laag niveau alarmen zijn met dünnere lijnen aangegeven dan de veerveiligheid-smoorpijp combinatie om het verschil in RR te duiden.

In Tabel 9 is de kleur van de preventieve barrière indicator van het scenario 'overdruk in V2' weergegeven afhankelijk van de status van de individuele barrières van het barrièresysteem. Het 1-uit-2 laag niveau alarmsysteem heeft een gezamenlijke RRD van 1. De alarmen zijn separaat in de tabel weergegeven.

3.2 Uitval van de mantelkoeling van de naverbrander (R1)

Naverbrander R1 maakt deel uit van het kraakproces en bevindt zich na de reformer waar het grootste deel van het aardgas gekraakt wordt. In de naverbrander wordt het niet gekraakte aardgas uit de reformer gekraakt onder zeer hoge temperaturen, tot wel 1400 °C. Deze temperatuur wordt bereikt door het toevoeren van lucht, waardoor een gedeelte van de waterstof uit het procesgas wordt verbrand. De lucht wordt geleverd door de proces-



Figuur 6 Scenario 'overdruk in ammoniak expansievat V2' door laag niveau in de ammoniakafscheider V1

Tabel 9 Preventieve barrière indicator van het scenario 'overdruk in V2'

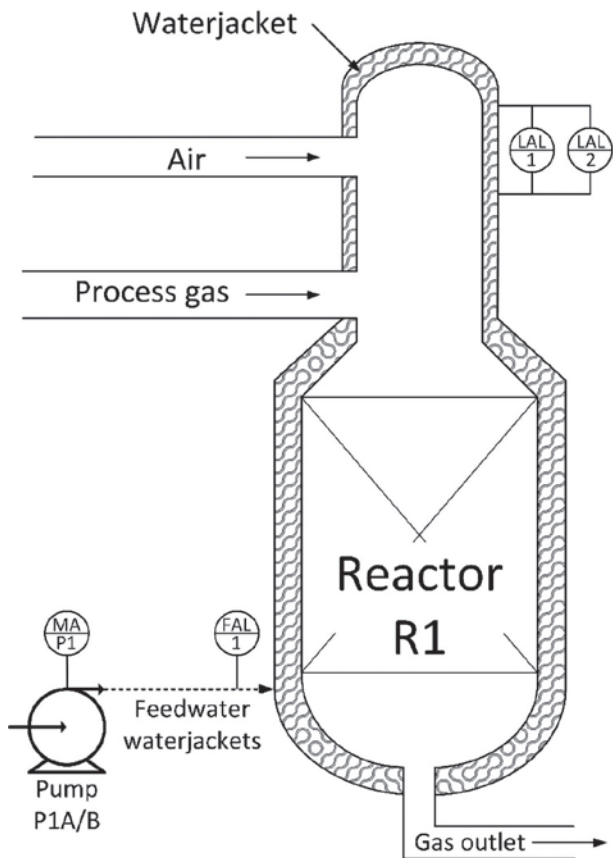
LAL1	LAL2	PSV1 & FO1	RRD	RRRD	Prev. barrière indicator
V	V	V	3	100%	Groen
V	V	?	2	67%	Geel
V	V	⊖	1	33%	Oranje
V	?	V	3	100%	Groen
V	?	?	2	67%	Geel
V	?	⊖	1	33%	Oranje
V	⊖	V	2,5	83%	Groen
V	⊖	?	1,5	50%	Oranje
V	⊖	⊖	0,5	17%	Rood
?	V	V	3	100%	Groen
?	V	?	2	67%	Geel
?	V	⊖	1	33%	Oranje
?	?	V	2,5	83%	Groen
?	?	?	1,5	50%	Oranje
?	?	⊖	0,5	17%	Rood
?	⊖	V	2,5	83%	Groen
?	⊖	?	1,5	50%	Oranje
?	⊖	⊖	0,5	17%	Rood
⊖	V	V	2,5	83%	Groen
⊖	V	?	2,5	83%	Groen
⊖	V	⊖	0,5	17%	Rood
⊖	?	V	2,5	83%	Groen
⊖	?	?	1,5	50%	Oranje
⊖	?	⊖	0,5	17%	Rood
⊖	⊖	V	2	67%	Geel
⊖	⊖	?	1	33%	Oranje
⊖	⊖	⊖	0	0%	Rood
!	⊖	V	2,5	83%	!Groen!
!	⊖	?	1,5	50%	!Oranje!
!	⊖	⊖	0,5	17%	!Rood!
!	!	V	3	100%	!Groen!
!	!	?	2	67%	!Geel!
!	!	⊖	1	33%	!Oranje!
⊖	!	V	2,5	83%	!Groen!
⊖	!	?	1,5	50%	!Oranje!
⊖	!	⊖	0,5	17%	!Rood!
⊖	⊖	!	2	67%	!Geel!

luchtcompressor met een druk van ca. 38 bar, iets hoger dan de druk in de naverbrander.

De naverbrander is voorzien van een watermantel die de wand moet beschermen tegen een te hoge temperatuur. Bij een te hoge temperatuur zal de wand onder de heersende procesdruk van ca. 37 bar bezwijken en het procesgas naar buiten treden met een brand of explosie tot gevolg. Het water van de watermantel is afkomstig van de voedingswaterpompen P1A/B, waarvan er één loopt

en één paraat staat. Bij uitval van de een, zal de andere pomp automatisch starten. Bij uitval van beide pompen volgt een alarm (MA P1), waarna de operator één van de voedingswaterpompen alsnog kan proberen te starten, één van de condensaatpompen kan bijzetten of kanaalwater kan intrekken.

In de watertoevoer naar de mantel zit een lageflow alarm (FAL1) dat de operator genoeg tijd geeft om actie te ondernemen voor voldoende watertoevoer naar de



Figuur 7 Naverbrander R1

mantel. Deze actie is identiek aan die van het alarm MA P1: het handmatig bijzetten van de voedingswater- of condensaatpompen of het intrekken van kanaalwater. Als het waterniveau van de mantel te laag wordt, zullen de laagniveau alarmen op de mantel aanspreken. Deze twee identieke alarmen zijn te beschouwen als een 1-uit-2 systeem. In geval de laagniveau alarmen aanspreken, heeft de operator beperkte tijd om de oorzaak op te sporen en te verhelpen. In het uiterste geval kan besloten worden om de plant te stoppen. Alle voorgenoemde operatoracties zijn relatief eenvoudig en zonder veel tijdsdruk uit te voeren.

Zowel het motoralarm MA P1 als het lageflow alarm FAL1 hebben een RRD van 0,5. Het 1-uit-2 laag niveau alarm-systeem heeft een gezamenlijke RRD van 1, opgebouwd uit twee RRD's van 0,5. Het scenario is volgens specificatie beveiligd door een barrièresysteem met een totale RRD van 2. Figuur 7 laat de naverbrander met zijn alarmen

zien. In Figuur 8 zijn de barrières in een bowtie getekend die een te hoge wandtemperatuur van de naverbrander moeten voorkomen.

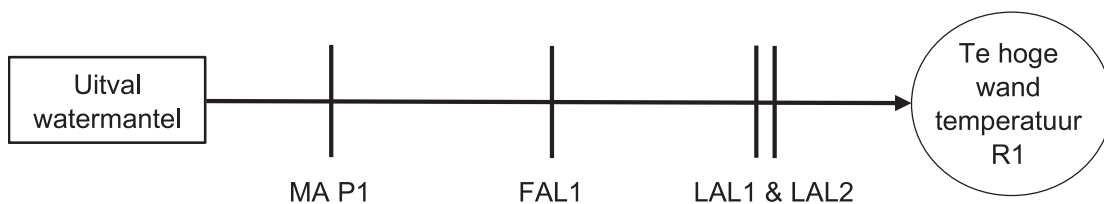
In Tabel 10 is de kleur van de preventieve barrière indicator van het scenario 'te hoge wandtemperatuur R3102' weergegeven afhankelijk van de status van het barrière-systeem.

3.3 Hoge druk in de moleculaire zeven (V3A/B)

De moleculaire zeven zijn opgesteld in de persleiding van de eerste trap van de synthesegas compressor. De druk is ca. 72 bar en 5 °C. De twee vaten worden alternerend bedreven, waarbij het vat dat niet in de lijn geschakeld is, geregenereerd wordt en daarna paraat wordt gezet. Het vat dat in bedrijf is, haalt de in het synthesegas aanwezige sporen water, CO en CO₂ eruit, die de katalysator in de synthesereactor onwerkzaam maken.

Bij uitval van de synthesegas compressor zal de druk voor en achter de compressor egaliseren. Bij deze drukegalisatie kan de druk in de inbedrijfszijnde moleculaire zeef oplopen tot ca. 200 bar, drie keer de ontwerpgrens, waardoor dit vat kan falen. Om dit tegen te gaan, zal bij uitval van de compressor de persklep na de compressor automatisch sluiten. Daarnaast zijn drie terugslagkleppen (TSK's) in de perstrappen van de compressor voorzien. Tot slot is in de eerste perstrap van de compressor een (mechanische) veerveiligheid (PSV2) van voldoende capaciteit geplaatst.

De automatische trippactie heeft een RRD van 0,5. De drie terugslagkleppen vormen gezamenlijk een 1-uit-3 systeem. Ze zijn om redenen van eenvoud als één systeem beschouwd (en in Tabel 11 in één kolom geplaatst). Terugslagkleppen hebben doorgaans een lage betrouwbaarheid/beschikbaarheid en effectiviteit. Aangezien ze doorstroomd worden door een niet-corrosief gasmengsel, is hun totale RRD geschat op 0,5. De veerveiligheid heeft een RRD van 2. Het scenario is beveiligd door een barrièresysteem met een totale RRD van 3, terwijl volgens specificatie een RRD van 2 voldoende is. Het scenario is in tegenstelling tot de twee vorige 'overbeveiligd'. Figuur 9 laat de opstelling van de molzeven zien in de eerste perstrap van de compressor. In Figuur 10 zijn de barrières in een bowtie getekend die een te hoge druk in de moleculaire zeven dienen te voorkomen. De trippactie en de terugslagkleppen zijn met dunnere lijnen aangegeven dan de veerveiligheid om het verschil in RR te duiden.



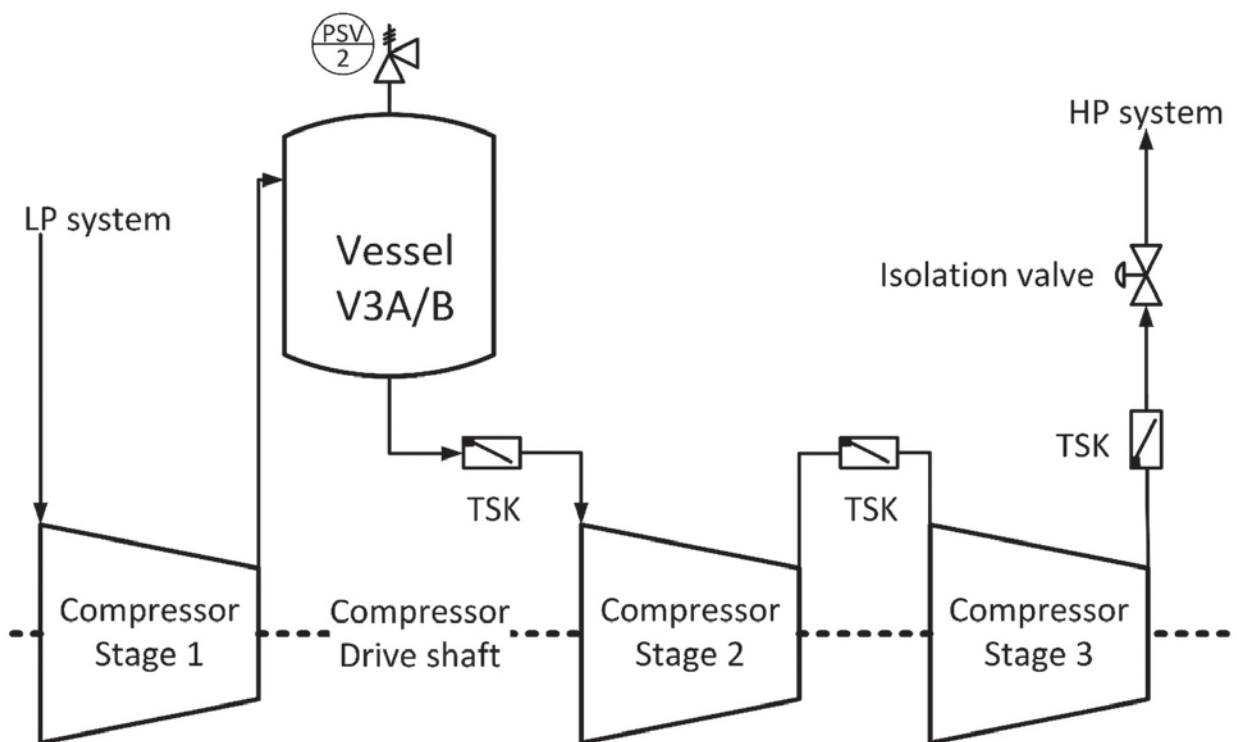
Figuur 8 Scenario 'te hoge wandtemperatuur R1' door uitval watermantel

Tabel 10 Preventieve barrière indicator van het scenario 'te hoge wandtemperatuur R1'

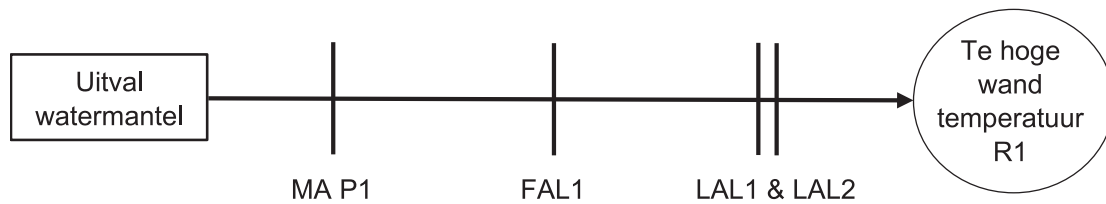
MA P1	FAL 1	LAL 1	LAL 2	RRD	RRRD	Prev. barrière indicator
V	V	V	V	2	100%	Groen
V	V	V	?	2	100%	Groen
V	V	V	Ø	1,5	75%	Geel
V	V	?	V	2	100%	Groen
V	V	?	?	1,5	75%	Geel
V	V	?	Ø	1,5	75%	Geel
V	V	Ø	V	1,5	75%	Geel
V	V	Ø	?	1,5	75%	Geel
V	V	Ø	Ø	1	50%	Oranje
V	?	V	V	1,75	88%	Groen
V	?	V	?	1,75	88%	Groen
V	?	V	Ø	1,25	63%	Geel
V	?	?	V	1,75	88%	Groen
V	?	?	?	1,25	63%	Geel
V	?	?	Ø	1,25	63%	Geel
V	?	Ø	V	1,25	63%	Geel
V	?	Ø	?	1,25	63%	Geel
V	?	Ø	Ø	0,75	38%	Oranje
V	Ø	V	V	1,5	75%	Geel
V	Ø	V	?	1,5	75%	Geel
V	Ø	V	Ø	1	50%	Oranje
V	Ø	?	V	1,5	75%	Geel
V	Ø	?	?	1	50%	Oranje
V	Ø	?	Ø	1	50%	Oranje
V	Ø	Ø	V	1	50%	Oranje
V	Ø	Ø	?	1	50%	Oranje
V	Ø	Ø	Ø	0,5	25%	Rood
?	V	V	V	1,75	88%	Groen
?	V	V	?	1,75	88%	Groen
?	V	V	Ø	1,25	63%	Geel
?	V	?	V	1,75	88%	Groen
?	V	?	?	1,25	63%	Geel
?	V	?	Ø	1,25	63%	Geel
?	V	Ø	V	1,25	63%	Geel
?	V	Ø	?	1,25	63%	Geel
?	V	Ø	Ø	0,75	38%	Oranje
?	?	V	V	1,5	75%	Geel
?	?	V	?	1,5	75%	Geel
?	?	V	Ø	1	50%	Oranje
?	?	?	V	1,5	75%	Geel
?	?	?	?	1	50%	Oranje
?	?	?	Ø	1	50%	Oranje
?	?	Ø	V	1	50%	Oranje
?	?	Ø	?	1	50%	Oranje
?	?	Ø	Ø	0,5	25%	Rood
?	Ø	V	V	1,25	63%	Geel
?	Ø	V	?	1,25	63%	Geel

MA P1	FAL 1	LAL 1	LAL 2	RRD	RRRD	Prev. barrière indicator
?	Ø	V	Ø	0,75	38%	Oranje
?	Ø	?	V	1,25	63%	Geel
?	Ø	?	?	0,75	38%	Oranje
?	Ø	?	Ø	0,75	38%	Oranje
?	Ø	Ø	V	0,75	38%	Oranje
?	Ø	Ø	?	0,75	38%	Oranje
?	Ø	Ø	Ø	0,25	13%	Rood
Ø	V	V	V	1,5	75%	Geel
Ø	V	V	?	1,5	75%	Geel
Ø	V	V	Ø	1	50%	Oranje
Ø	V	?	V	1,5	75%	Geel
Ø	V	?	?	1	50%	Oranje
Ø	V	?	Ø	1	50%	Oranje
Ø	V	Ø	V	1	50%	Oranje
Ø	V	Ø	?	1	50%	Oranje
Ø	V	Ø	Ø	0,5	25%	Rood
Ø	?	V	V	1,25	63%	Geel
Ø	?	V	?	1,25	63%	Geel
Ø	?	V	Ø	0,75	38%	Oranje
Ø	?	?	V	1,25	63%	Geel
Ø	?	?	?	0,75	38%	Oranje
Ø	?	?	Ø	0,75	38%	Oranje
Ø	?	Ø	V	0,75	38%	Oranje
Ø	?	Ø	?	0,75	38%	Oranje
Ø	?	Ø	Ø	0,25	13%	Rood
Ø	Ø	V	V	1	50%	Oranje
Ø	Ø	V	?	1	50%	Oranje
Ø	Ø	V	Ø	0,5	25%	Rood
Ø	Ø	?	V	1	50%	Oranje
Ø	Ø	?	?	0,5	25%	Rood
Ø	Ø	?	Ø	0,5	25%	Rood
Ø	Ø	Ø	V	0,5	25%	Rood
Ø	Ø	Ø	?	0,5	25%	Rood
Ø	Ø	Ø	Ø	0	0%	Rood
!	V	V	V	2	100%	!Groen!
!	V	V	?	2	100%	!Groen!
!	V	V	Ø	1,5	75%	!Geel!
!	V	?	V	2	100%	!Groen!
!	V	?	?	1,5	75%	!Geel!
!	V	?	Ø	1,5	75%	!Geel!
!	V	Ø	V	1,5	75%	!Geel!
!	V	Ø	?	1,5	75%	!Geel!
!	V	Ø	Ø	1	50%	!Oranje!
!	?	V	V	1,75	88%	!Groen!
!	?	V	?	1,75	88%	!Groen!
!	?	V	Ø	1,25	63%	!Geel!
!	?	?	V	1,75	88%	!Groen!

MA P1	FAL 1	LAL 1	LAL 2	RRD	RRRD	Prev. barrière indicator
!	?	?	?	1,25	63%	!Geel!
!	?	?	⊖	1,25	63%	!Geel!
!	?	⊖	V	1,25	63%	!Geel!
!	?	⊖	?	1,25	63%	!Geel!
!	?	⊖	⊖	0,75	38%	!Oranje!
!	⊖	V	V	1,5	75%	!Geel!
!	⊖	V	?	1,5	75%	!Geel!
!	⊖	V	⊖	1	50%	!Oranje!
!	⊖	?	V	1,5	75%	!Geel!
!	⊖	?	?	1	50%	!Oranje!
!	⊖	?	⊖	1	50%	!Oranje!
!	⊖	⊖	V	1	50%	!Oranje!
!	⊖	⊖	?	1	50%	!Oranje!
!	⊖	⊖	⊖	0,5	25%	!Rood!
⊖	!	V	V	1,5	75%	!Geel!
⊖	!	V	?	1,5	75%	!Geel!
⊖	!	V	⊖	1	50%	!Oranje!
⊖	!	?	V	1,5	75%	!Geel!
⊖	!	?	?	1	50%	!Oranje!
⊖	!	?	⊖	1	50%	!Oranje!
⊖	!	⊖	V	1	50%	!Oranje!
⊖	!	⊖	?	1	50%	!Oranje!
⊖	!	⊖	⊖	0,5	25%	!Rood!
⊖	⊖	!	⊖	0,5	25%	!Rood!
⊖	⊖	!	!	1	50%	!Oranje!
⊖	⊖	⊖	!	0,5	25%	!Rood!



Figuur 9 Moleculair zeef V3 in de pers van de eerste trap van de compressor



Figuur 10 Scenario 'overdruk in moleculair zeef V3A/B' door uitval van de compressor

In Tabel 11 is de kleur van de preventieve barrière indicator van het scenario 'overdruk in V3A/B' weergegeven afhankelijk van de status van het barrièresysteem.

4. Discussie

Dit deelonderzoek laat zien dat het mogelijk is om op basis van de barrièrestatus een kwalitatieve inschatting te geven van de waarschijnlijkheid van de centrale gebeurtenis. Daarbij is echter een aantal kanttekeningen te plaatsen. Barrières bestaan doorgaans uit 3 elementen: een sensor, een beslisser en een uitvoerend orgaan. Ze dienen alle drie gemonitord te worden voor het bepalen van de status van de (preventieve) barrière. Met name het uitvoerend orgaan van barrières beschikt niet altijd over zelfmeldendheid, waardoor niet kan worden voorzien of dit barrière element overbrugd of defect is.

Als een barrière bestaat uit een alarm, een (veiligheidskritische) instructie en het ingrijpen van een operator, schuilt een soortgelijk probleem om de hoek. De betrouwbaarheid/beschikbaarheid en effectiviteit van de operator zijn namelijk moeilijk te meten. Heeft de operator het alarm gezien, begrepen? Weet hij hoe te handelen? Is hij niet te druk met andere taken?

Mechanische beveiligingen zoals veerveiligingen of terugslagkleppen worden niet vaak getest, bijvoorbeeld één keer per 2, 4 of 6 jaar. Tevens geven deze barrières geen terugkoppeling als ze defect zijn. Dat betekent dat de barrièrestatus van mechanische beveiligingen lange tijd niet zal wijzigen. Ondanks deze beperking is het zinvol mechanische beveiligingen op te nemen in de bepaling van de preventieve barrière indicator van de scenario's waarin ze van toepassing zijn.

Onderhoud, inspectie en testen garanderen de betrouwbaarheid/beschikbaarheid en effectiviteit van barrières. Een inspectie en/of test moet uitwijzen of de barrière niet alleen betrouwbaar/beschikbaar is, maar ook effectief, d.w.z. geschikt is om het volgens ontwerp voorziene doel binnen een bepaalde tijd te bereiken. Een barrière kan immers aan slijtage of degradatie onderhevig zijn. Het is van groot belang dat dit in de testprocedure tot uiting komt. Gaan kleppen wel helemaal dicht? Schakelt de instrumentele beveiliging wel op de juiste waarde? Is de brandwerende coating niet te veel gedegradeerd? En is de antislip vloer niet te ver versleten? Is de barrière nog steeds deugdelijk? Wanneer een barrière na onderhoud, inspectie en testen weer in bedrijf wordt genomen en er

twijfels bestaan over de betrouwbaarheid/beschikbaarheid en/of effectiviteit van de barrière, zou gekozen kunnen worden om de barrièrestatus als 'mogelijk niet betrouwbaar/beschikbaar en/of niet effectief' te classificeren. Deze optie dient ook overwogen te worden als er tijdens bedrijf twijfels over de kwaliteit van de barrière bestaan, die niet meteen kunnen worden geverifieerd en opgelost en waarvoor bijvoorbeeld correctief onderhoud is ingepland.

In IEC 61511 staan vier SIL-niveaus gespecificeerd, met SIL 4 als hoogste en SIL 1 als laagste niveau. Daarbij specificeert de norm dat de RR van een SIL 1 barrière tussen 10 en 100 ligt, exclusief 10 en met inbegrip van 100 (en voor een SIL 2 barrière tussen 100 en 1000, exclusief 100 en met inbegrip van 1000, etc.). In dit manuscript is aangenomen dat de RR van een SIL 1 barrière ook ligt tussen 10 en 100 maar met inbegrip van 10 en exclusief 100. In de berekeningen wordt voor een SIL 1 barrière een RR van 10 toegepast, voor SIL 2 een RR van 100 en voor SIL 3 een RR van 1000. Deze conservatieve benadering is in lijn met CCPS (2015), die voor een SIL 1, SIL 2 en SIL 3 barrière een RR voorstelt van resp. 10, 100 en 1000.

In de berekening van de preventieve barrière indicator is geen rekening gehouden met gelijktijdig testen, de MTTR en MRT, common cause fouten en andere factoren waardoor de verschillende (seriële) SIF's in een barrièresysteem op elkaar kunnen inwerken. Hierdoor kan de uiteindelijke RR iets lager uitvallen dan berekend. Het gaat in dit manuscript echter om een indicatie van de waarschijnlijkheid van het scenario en daarbij speelt een relatieve verandering een belangrijkere rol dan een absolute waarde.

Bij m-uit-n systemen is de numerieke waarde van m en n gebaseerd op het aantal sensoren en niet op het aantal beslissers en uitvoerende organen. Het aantal sensoren kan verschillen van het aantal beslissers en uitvoerende organen. Voor het bepalen van de status van het barrièresysteem dient naar alle barrière elementen gekeken te worden.

Bij de toepassing van LOPA wordt vaak m.b.t. het mitigeren of reduceren van risico's gerekend in factoren van 10, 100 en 1000. Het lijkt daarom bij het ontwikkelen van een preventieve barrière indicator voor de hand te liggen om een systeem in decaden te bouwen dat is omgewerkt naar een logaritmische schaal. De RR's van de verschillende

Tabel 11 Preventieve barrière indicator van het scenario 'overdruk in V3A/B'

Tripactie compressor	3 TSK's	PSV2	RRD	RRRD	Prev. barrière indicator
V	V	V	3	150%	Groen
V	V	?	2	100%	Groen
V	V	⊖	1	50%	Oranje
V	?	V	2,75	138%	Groen
V	?	?	1,75	88%	Groen
V	?	⊖	0,75	38%	Oranje
V	⊖	V	2,5	125%	Groen
V	⊖	?	1,5	75%	Geel
V	⊖	⊖	0,5	25%	Rood
?	V	V	2,75	138%	Groen
?	V	?	1,75	88%	Groen
?	V	⊖	0,75	38%	Oranje
?	?	V	2,5	125%	Groen
?	?	?	1,5	75%	Geel
?	?	⊖	0,5	25%	Rood
?	⊖	V	2,25	113%	Groen
?	⊖	?	1,25	63%	Geel
?	⊖	⊖	0,25	13%	Rood
⊖	V	V	2,5	125%	Groen
⊖	V	?	1,5	75%	Geel
⊖	V	⊖	0,5	25%	Rood
⊖	?	V	2,25	113%	Groen
⊖	?	?	1,25	63%	Geel
⊖	?	⊖	0,25	13%	Rood
⊖	⊖	V	2	100%	Groen
⊖	⊖	?	1	50%	Oranje
⊖	⊖	⊖	0	0%	Rood
!	V	V	3	150%	!Groen!
!	V	?	2	100%	!Groen!
!	V	⊖	1	50%	!Oranje!
!	?	V	2,75	138%	!Groen!
!	?	?	1,75	88%	!Groen!
!	?	⊖	0,75	38%	!Oranje!
!	⊖	V	2,5	125%	!Groen!
!	⊖	?	1,5	75%	!Geel!
!	⊖	⊖	0,5	25%	!Rood!
⊖	!	V	2,5	125%	!Groen!
⊖	!	?	1,5	75%	!Geel!
⊖	!	⊖	0,5	25%	!Rood!
⊖	⊖	!	2	100%	!Groen!

barrières zijn zodoende gemakkelijk te sommeren. Als Tabel 3 niet vanuit de RRD maar vanuit de RR zou worden opgesteld, ziet niet alleen de verdeling er anders uit, maar wordt ook de bepaling van de preventieve barrière indicator wat moeilijker. In dit manuscript is gekozen voor een benadering vanuit de decaden omgewerkt in een logaritmische schaal.

Dit concept kent een aantal keuzes die de gevoeligheid van de preventieve barrière indicator bepalen. In dit manuscript is een barrière mogelijk niet betrouwbaar/beschikbaar en/of niet effectief bij een halvering van de RR. Tabel 2 toont echter dat er ook voor een andere verandering van de RR gekozen kan worden om een barrière als mogelijk niet betrouwbaar/beschikbaar en/of niet

effectief te bestempelen. En ook de grenzen van Tabel 3 waarbij de preventieve barrière indicator kleurt, zijn vrij te kiezen en bieden de mogelijkheid om de preventieve barrière indicator eerder of later te laten kleuren. Beide keuzes zijn aan elk bedrijf om zelf te bepalen en worden mede ingegeven door hun beleid.

Tot slot dient benadrukt te worden dat een scenario zich alleen ontwikkelt als het ook daadwerkelijk gestart is. De kans op een centrale gebeurtenis is niet alleen afhankelijk de barrièrestatus maar ook van de kans dat het 'initiating event' zich voordoet. Dit manuscript richt zich op het barrière systeem, maar zou uitgebreid kunnen worden met indicatoren op de 'initiating events'. Met name voor barrièresystemen die uit weinig barrières bestaan, zou dit uitkomst bieden.

5. Conclusies

De hoofdvraag van dit (derde) deelonderzoek is of er – op basis van de status van het barrière systeem – indicatoren kunnen worden afgeleid, die op voorhand informatie geven over de ontwikkeling en waarschijnlijkheid van de majeure ongevalsprocessen bij het ammoniak productieproces.

De hier uitgewerkte voorbeelden laten zien dat op basis van het barrièresysteem een inschatting van de waarschijnlijkheid van het scenario kan worden gemaakt. Dit is geen absolute waarde, maar eerder een indicatie van de verandering van de status quo die aanleiding moet zijn om verdere actie te ondernemen. Dit manuscript laat zien wat deze actie moet zijn en wat de urgentie van de actie is.

Veel incidenten zijn niet gebeurd doordat een procesvariabele extreem buiten zijn bereik lag, maar eerder door een zeldzame combinatie van afwijkende waarden (Ale, 2009). Dat is wellicht een van de redenen dat het aantal grote procesveiligheid incidenten in de procesindustrie gering is. Volgens Hopkins (2009) is het beter om naar de meer frequente 'precursor' incidenten te kijken om veiligheid te meten. Het hier uitgewerkte concept lijkt daaraan te voldoen: iedere technische verandering van het barrièresysteem wordt gebruikt om de momentane ontwikkeling en waarschijnlijkheid van het scenario te bepalen. Als de kwaliteitsparameters van de barrières in een geautomatiseerd systeem zijn ondergebracht, kan de preventieve barrière indicator real time worden berekend en weergegeven. Voor niet-technische veranderingen ligt dat anders: ze zullen handmatig moeten worden ingevoerd en verwerkt. Een toekomstige validatie, uitgevoerd door middel van retrospectief onderzoek op basis van een aantal (bijna) incidenten, zal moeten uitwijzen in hoeverre de preventieve barrière indicatoren tijdig inzicht verschaffen in de waarschijnlijkheid en ontwikkeling van de ongevalsscenario's.

Dit deelonderzoek richt zich op het barrièresysteem, maar duidelijk is dat op meerdere niveaus naar indicatoren kan

worden gekeken. Sonnemans, Körvers en Pasman (2010) kijken bijvoorbeeld naar de kleinere signalen, d.w.z. veel voorkomende precursors en naar latente condities. De latente condities laten de aanwezigheid van precursors voortbestaan en ondermijnen de effectiviteit van het barrièresysteem. Hassan en Khan (2012) geven verschillende niveaus van waaruit indicatoren kunnen worden afgeleid en Bellamy et al. (2007) maken onderscheid tussen primaire barrières en het ondersteunen van barrières. Op elk niveau kunnen indicatoren informatie geven over de verschillende scenario's. De beïnvloeding ervan loopt via barrières en management factoren (het management delivery systeem) als belangrijkste vectoren. Verder onderzoek is nodig om ook op andere niveaus indicatoren te ontwerpen, die op voorhand informatie kunnen geven over majeure ongevalsprocessen, te beginnen bij het management delivery systeem als het eerst hogere aggregatieniveau.

Literatuur

- Ale, B. (2009). More thinking about process safety indicators. *Safety Science*, 47, 470-471.
- ANSI/API. (2010). *Process Safety Performance Indicators for the Refining and Petrochemical Industries*. ANSI/API RP 754, first edition. Geraadpleegd van <http://www.carec.com.pe/biblioteca/biblio/4/81/Info-ANSI%20API%20RP%20754.pdf>
- Badreddine, A., Romdhane, T.B., HajKacem, M.A.B. & Amor, N.B. (2014). A new multi-objectives approach to implement preventive and protective barriers in bow tie diagram. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 32, 238-253.
- 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.
- CCPS. (2011). *Process Safety Leading and Lagging Metrics*. Geraadpleegd van https://www.aiche.org/sites/default/files/docs/pages/CCPS_ProcessSafety_Lagging_2011_2-24.pdf
- CCPS. (2015). *Guidelines for initiating events and independent protection layers in layer of protection analysis*. New York, U.S.: Wiley.
- Cefic. (2011). *Guidance on Process Safety Performance Indicators*. Brussel, België: Cefic.
- Cefic. (2016). *Guidance for reporting on the ICCA globally harmonised process safety metric*. Geraadpleegd van <https://cefic.org/app/uploads/2019/02/Cefic-ICCA-Guidance-on-Process-Safety-Performance-Indicators.pdf>
- Crisislab. (2016). *Toeval 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>
- Dokas, M., Feehan, J. & Syed, I. (2013). EWaSAP: An early warning sign identification approach based on a systemic hazard analysis. *Safety Science*, 58, 11-26.
- Goldenmund, 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. (2009). Why safety performance indicators?. *Safety Science*, 47, 479-480.
- Hassan, J. & Khan, F. (2012). Risk-based asset integrity indicators. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 25, 544-554.

- Hollnagel, E. (2008). Risk + barriers = safety?. *Safety Science*, 46, 221-229.
- Hopkins, A. (2009). Thinking about process safety indicators. *Safety Science*, 47, 460-465.
- Houtermans, M. (2014). *SIL and Functional Safety in a NUTSHELL* (First edition). Zug, Zwitserland: Risknowlogy.
- HSE. (2006). *Process safety indicators, a step-by-step guide for the chemical and major hazards industries*, HSG 254. Richmond, Surrey, UK: The Office of Public Sector Information, Information Policy Team. Geraadpleegd van <http://www.hse.gov.uk/pUbns/priced/hsg254.pdf>
- IEC. (2016). *Functional safety – Safety instrumented systems for the process industry sector*. Genève, Zwitserland: IEC.
- Knegtering, B. & Pasma, H. (2013). The safety barometer. How safe is my plant today? Is instantaneously measuring safety level utopia or realizable?. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 26, 821-829.
- Mannan, S. (2005). *Lees' Loss Prevention in the Process Industries*. Oxford, U.K.: Elsevier Butterworth-Heinemann.
- OGP. (2011). *Process safety, recommended practice on key performance indicators*. Report nr 456. Geraadpleegd van http://www.learnfromaccidents.com.gridhosted.co.uk/images/uploads/OGP_456_KPis_for_Process_safety.pdf.
- Øien, K., Utne, I. & Herrera, I. (2011). Building safety indicators I theoretical foundations. *Safety Science*, 49, 148-161.
- Øien, K., Utne, I., Tinmannsvik, R. & Massau, S. (2011). Building safety indicators II applications. *Safety Science*, 49, 162-171.
- 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>.
- 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 Arbowetenschap*, 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.
- 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 Arbowetenschap*, 2018(2), 34-54.
- Sinelnikov, S., Inouye, J. & Kerper, S. (2015). Using leading indicators to measure occupational health and safety performance. *Safety Science*, 72, 240-248.
- Sklet, S. (2006). Safety barriers: Definition, classification, and performance. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 19, 494-506.
- Sonnemans, P.J.M., Körvers, P.M.W. & Pasma, H.J. (2010). Accidents in "normal" operation – Can you see them coming?. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 23, 351-366.
- 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.
- Vinnem, J.E., Aven, T., Husebø, T., Seljelid, J. & Tveit, O.J. (2006). Major hazard risk indicators for monitoring of trends in the Norwegian offshore petroleum sector. *Reliability Engineering and System Safety*, 91, 778-791.
- Vinnem, J.E. (2010). Risk indicators for major hazards on offshore installations. *Safety Science*, 48, 770-787.

Bijlage – lijst met afkortingen

Afkorting	Betekenis
ANSI	American National Standards Institute
API	American Petroleum Institute
CCPS	Centre for Chemical Process Safety
Cefic	Conseil Européen des Federations de l'Industrie Chimique
ESD	Emergency shutdown
FAL	Flow alarm low
FO	Flow orifice
HSE	Health and Safety Executive
IEC	International Electrotechnical Commission
LAL	Level alarm low
LC	Level controller
LOPA	Layer of protection assessment
MA	Motor alarm
MTTR	Mean time to repair
MRT	Mean repair time
OCI	Orascom Construction Industries
OGP	International Association of Oil and Gas Producers
OVV	Onderzoeksraad voor Veiligheid
PAH	Pressure alarm high
PC	Pressure controller
PSV	Pressure safety valve
RR	Risico reductie
RRD	Risico reductie in decaden
RRRD	Relatieve risico reductie in decaden
SIF	Safety instrumented function
SIL	Safety integrity level
SIS	Safety instrumented system
TSK	Terugslagklep