

Vereenvoudiging van bow-tie voor chemische industrie

Dr.ir. Coen van Gulijk, TU Delft, e-mail: c.vangulijk@tudelft.nl
Daniëla Hanea, Ben Ale, TU Delft

Samenvatting

Dit artikel beschrijft een methode om de foutenbomen en Bayesian Belief Nets (BBN's) te genereren voor de chemische industrie. Hierbij wordt gebruik gemaakt van geavanceerde modelleer technieken, waarmee de beschikbare gegevens omtrent de apparatuur en de procedures kunnen worden omgezet in foutenbomen en BBN's. Met deze methode wordt veel mogelijk recht gedaan aan de complexiteit van de werkelijkheid. Dankzij deze techniek kan in een beperkte tijd en met beperkte middelen een vrijwel volledig beeld van de faaloorzaken en faalfrequenties van een chemiebedrijf worden gemodelleerd. In deze methode worden menselijke factoren volledig geïntegreerd met technische factoren. De methode maakt het mogelijk om keer op keer gebruik te maken van vergelijkbare, relatief kleine, BBN rekenmodules wat het model beheersbaar maakt, ook wanneer deze installaties zeer groot worden. Dit artikel beschrijft de rationale van de methode en rapporteert een van de eerste vingeroefeningen.

Sleutelbegrippen

Chemische procesindustrie, modelleren van faalfrequenties, qra, bayesian belief nets

Inleiding

Volgens Gupta [Gup02] heeft Bhopal de attitude van managers en werknemers in de chemische industrie zo veranderd dat er nu minder ongevallen zijn. De noodzaak om de chemische industrie veiliger te maken is echter nog niet voorbij. Analyses van de MARS database laten zien dat er nog te vaak grote incidenten plaatsvinden [Liv06]. En toch werd de wereld weer geschokt door de 'Deepwater Horizon' [Gra11]. Dit heeft in sommige gevallen tot gevolg dat chemische bedrijven als criminele organisaties worden gezien. Een exponent van die beweging is duidelijk te vinden in het boek 'Drowning in Oil' van Steffy [Ste11].

In het verleden is met name in Nederland veel energie gestoken in algemene QRA-scenario's en consequentie-modellering voor incidenten in de chemische- en procesindustrie. Een belangrijke bijdrage was het 'paarse boek' [Ale99] en de ontwikkeling van het rekenprogramma Safeti-N welke een rol spelen in het Nederlandse EV-beleid. Deze methoden werken met standaard faalfrequenties welke gebaseerd zijn op industrie-gemiddelden en/of historische gegevens. Deze gegevens zijn onderdeel van de programmatuur of zijn te vinden in handleidingen voor de industrie [Hem12, Vla09]. Deze faalfrequenties hebben een constante waarde terwijl deze in werkelijkheid kunnen verschillen per bedrijf en installatie. Door BBN modellering toe te passen kunnen plaatselijke verschillen gemakkelijker worden gemodelleerd en personeels- en managementinvloeden worden meegenomen in de analyse.

Ongeval frequentiemodellering op basis van BBN (Bayesian Belief Nets) is in het CATS project ontwikkeld tot een bruikbaar instrument in de luchtvaartindustrie [Ale09]. In dit project wordt die methode toegepast in de chemische industrie. In dit project wordt de integratie van technische modellen, menselijk handelen en management verder uitgewerkt. Chemische techniek is echter zeer verschillend van vliegtuigtechniek. In de luchtvaart is er sprake van een relatief gestructureerd (vlieg)proces: parkeren, taxiën, starten, vliegen, landen, taxiën en parkeren. Dat leverde een BBN op van rond de 5000 nodes. In de chemische industrie bestaat echter een breed spectrum van verschillende activiteiten. Kan er een werkbare methode gevonden worden om dat brede palet in één model te vangen?

Het doel van dit onderzoek is om een schatting te maken van de frequentie van lekkages in chemische fabrieken. Lekkages zijn de startpunten voor consequentie analyses in moderne QRA methoden. Het probleem is dat de omvang en complexiteit van procestechnologische installaties zo groot is dat het ondoenlijk is om een complete foutenboom te construeren die een hele fabriek zou kunnen modelleren.

De onderzoeksvraag is daarom of een werkbare methode kan worden ontwikkeld om de hele fabriek te modelleren. Dit artikel behandelt de ontwikkeling van die methode.

Methoden en technieken

BBN

Een Bayesian Belief Net of BBN is een modelleertechniek die, onder anderen, gebruikt kan worden om foutenbomen te modelleren. Echter laat een BBN meer modelleervrijheid toe dan een traditionele foutenboom. Ten eerste staat het berekeningen met kansverdelingen toe in non-parametrische BBN's. Dat betekent dat zowel de input parameters als ook de resultaten als kansverdeling worden gemodelleerd. Dit heeft met name als voordeel dat onzekerheden in frequentieschattingen automatisch worden gemodelleerd. Ten tweede staat een BBN toe dat *elke* node (dus ook die in de top van het model) kunnen worden geconditioneerd/vastgelegd. De rest van het model past zich dan aan op die geconditioneerde waarde zodat gevoeligheidsanalyse vergemakkelijkt wordt. Ten derde kunnen nodes door het hele model met elkaar verbonden worden zodat ook indirecte invloeden gemodelleerd kunnen worden. Meer gedetailleerde beschrijvingen zijn te vinden in het CATS rapport [Ale09].

Methodeontwikkeling

Voor het bepalen van faalfrequenties zijn in het CATS project foutenbomen ontwikkeld voor 37 ongevalsclassen. In de BBN zijn deze gekoppeld aan Event Sequence Diagrams (ESD's), menselijke factoren, management factoren en deze koppelingen leverden uiteindelijk een BBN van 5000 nodes op. Een soortgelijke aanpak zou in een chemische fabriek tot een extreem groot aantal foutenbomen leiden daar er letterlijk duizenden onderdelen te vinden zijn in chemische fabrieken. Nog daargelaten dat er heel veel verschillende fabrieken bestaan. In dit artikel wordt een werkwijze voorgesteld die, net als in het CATS project tot een beperkt aantal ongevalsclassen leidt.

Het startpunt van deze afleiding is dat lekkages van chemische producten procesincidenten opleveren. Deze incidenten worden veroorzaakt doordat condities in het chemische proces buiten de ontwerpparameters van de installatie migreren. Deze migratie noemen we excursie. Deze excursies moeten worden gestopt en/of beheerst. Het beschrijven van die beheersingspaden is de inzet van deze methode.

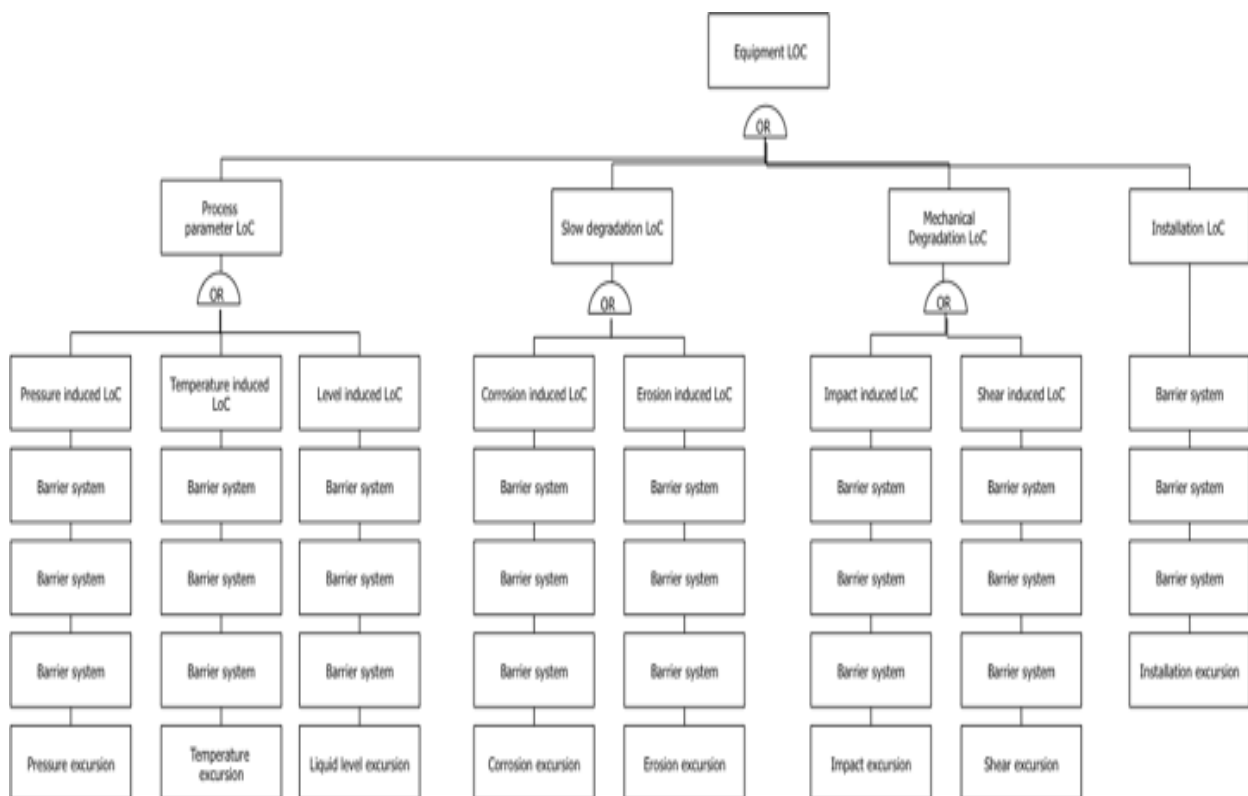
De eerste stap in de methodeontwikkeling is gebaseerd op QRA methoden. Hierbij wordt de technische installatie van een fabriek verdeeld in kleinere bouwstenen. In dit werk wordt de methode volgens het Technika rapport gevolgd [Tec84]. Dit werkt als volgt. Een 'plant' (fabriek) is een volledige functionele chemische fabriek. Merk op dat dit niet hetzelfde is als een locatie (site) waar meerdere fabrieken kunnen staan. Een 'plant' is opgedeeld in functionele eenheden die 'units' worden genoemd. Een unit bevat typisch één of meer functionele vaten met bijbehorende apparatuur zoals leidingwerk en pompen. Voorbeelden van 'units' zijn een distillatietrein, een reactor of een groep warmtewisselaars. 'Units' worden verder onderverdeeld in 'parts' ofwel onderdelen. Dit zijn de individuele functionele onderdelen in de fabriek, bijvoorbeeld: leidingen, vaten en pompen. Op dit niveau worden faalfrequenties en lekfrequenties in de literatuur gerapporteerd.

De tweede stap is gebaseerd op het feit dat faalscenario's die lekkage opleveren vergelijkbare oorzaken hebben. Deze lekkages worden LoC genoemd: Loss of Control omdat de beheersing van chemische producten die zich buiten de installatie bevinden ingewikkeld is, zo niet een direct risico opleveren. In deze studie is een set schadetrajecten ontwikkeld welke gebaseerd is op de STATAS studie (gerapporteerd in [Man05]). De STATAS studie onderscheidt twaalf oorzaken van procesincidenten: corrosie; erosie; externe belasting; botsen; overdruk; vibratie; extreme temperaturen; verkeerde installatie; kapotte installatie; menselijke fout; overig; en onbekend. De oorzaken in dit onderzoek zijn geïnspireerd door de STATAS studie maar niet hetzelfde. In deze studie worden vier groepen geïdentificeerd. De eerste bestaat uit trage degradatie processen: erosie en corrosie. Een stuk pijp corrodeert gedurende enkele jaren. Na verloop van tijd is de pijp zo sterk aangetast dat deze niet meer voldoet aan de oorspronkelijke ontwerpeisen. Inspectie van de pijpen, een procesmatige barrière, moet dan aantonen dat de pijp niet meer voldoet en moet worden vervangen. De tweede groep is excursie van procesparameters: druk, temperatuur en (vloeistof)niveau. De derde groep is mechanische degradatie: botsing, mechanische belasting en vibratie. De vierde groep is foutieve installatie: fouten in het ontwerp, verkeerd materiaal, verkeerde installatiehandelingen.

De derde stap vindt plaats op barrière-niveau. Om een barrière effectief te laten zijn moet ze deze drie functies vervullen [Dow01; Hem12]. Ten eerste moet de excursie worden gedetecteerd door een instrument of persoon (detector functie). Ten tweede moet op basis van de gedetecteerde excursie een besluit worden genomen door een instrument of persoon (logic operator functie). Ten derde moet een fysieke ingreep volgen wanneer daartoe besloten is (actuator functie). Dit laatste kan ook weer door instrumenten of een persoon gedaan worden. Deze vereenvoudiging zorgt ervoor dat er nooit meer dan vier elementen in een barrière te vinden zijn. Dat maakt de informatiebehoefte kleiner en er kan duidelijker aangegeven worden waar menselijk handelen de barrière versterkt of verzwakt.

Deze drie inzichten leveren de volgende werkmethode op. Een excursie (waarbij een parameter buiten het ontworpen kader migreert) mag niet leiden tot lekkage en daarom worden conform LOPA methodologie onafhankelijke barrières geïnstalleerd om de excursies te beheersen of te stoppen. De keten van initiële excursie met een bijpassende serie barrières noemen we excursie beheersingspad. Excursie beheersingspaden zijn voor de meeste instrumenten in de procesindustrie vergelijkbaar; dit maakt het mogelijk om standaard beheersingspaden te ontwerpen op basis van specifieke oorzaken.

Voor elke excursie kan een excursie beheersingspad worden ontworpen met behulp van een barrière model voor 'parts' in een chemische fabriek. Van deze excursie beheersingspaden worden BBN's gemaakt die de integratie met menselijke factoren en management factoren op barrière niveau mogelijk maakt. Een BBN van een excursie beheersingspad is relatief beperkt van formaat en kan keer op keer opnieuw worden gebruikt voor andere excursie beheersingspaden en andere onderdelen van de fabriek. Figuur 1 demonstreert op schematische wijze hoe excursie beheerspaden kunnen worden gecombineerd om een 'part' in een fabriek te modelleren. De samenknoping vindt plaats via logische OR operatoren. In dit voorbeeld zijn zeven excursie beheerspaden van vier typen aangegeven. Deze onderdelen kunnen, op hun beurt, vrij gemakkelijk gecombineerd worden tot units en plants. Het eindresultaat is dat het niet nodig is om een volledige foutenboom te construeren voor de complete fabriek maar kan worden volstaan met een beperkt aantal gekoppelde BBN's. Deze zienswijze leidt tot het beeld dat een chemische installatie kan worden gerepresenteerd door een verzameling excursie beheersingspaden waarvan er veel dezelfde zijn of vergelijkbaar zijn. In de volgende paragraaf wordt een excursie beheersingspad toegelicht met een voorbeeld.



Figuur 1: zeven excursie-beheerspaden met standaard barrière modellen voor een technisch onderdeel in een chemische fabriek.

Resultaten

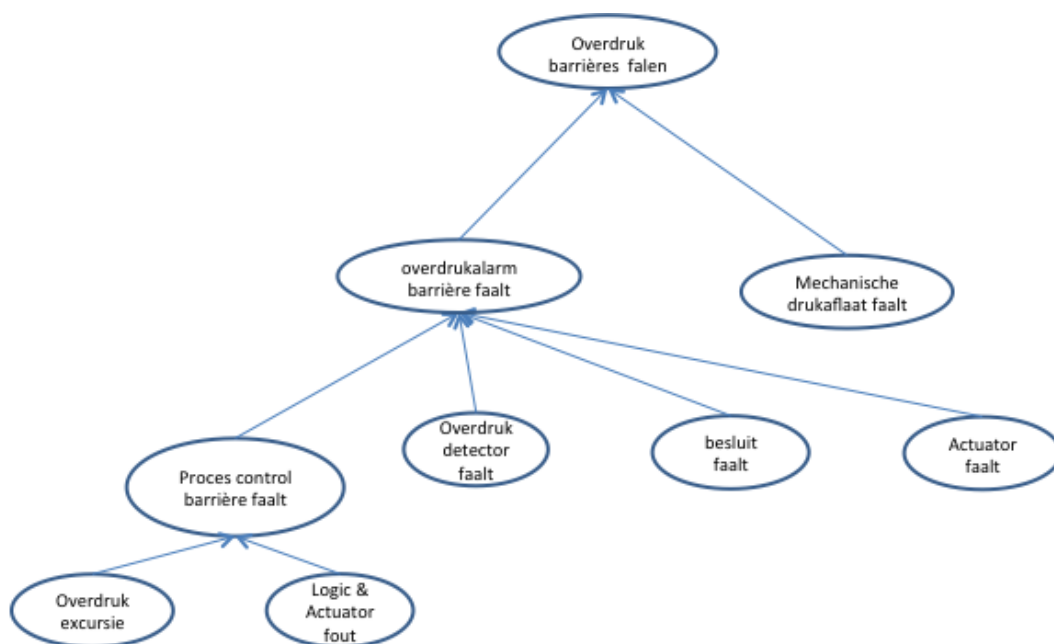
Het resultaat voor het ontwerp van een excursie beheersingspad wordt hier gegeven in de vorm van een voorbeeld. Dit resultaat geeft inzicht in de methode en typische uitkomsten van de analyse. Dit voorbeeld moet gezien worden als vingeroefening daar verregaande analyse van robuustheid nog niet heeft plaatsgevonden. Om die reden worden ook nog geen getallen vermeld in dit artikel.

Dit excursie beheersingspad is ontworpen voor een 'simple vessel'. Dit representeert een eenvoudig vat waarbij geen complexe processen plaatsvinden. Een voorbeeld is een condenspot of een vloeistof-scheider. Merk op dat een chemische fabriek tientallen of honderden van deze 'eenvoudige vaten' kan bevatten. De excursie die beheerst wordt is overdruk. Het beheersingspad is weergegeven in figuur 2. Links onder in figuur 2 is de initiële excursie: het moment dat overdruk plaats vindt. Dit is een probabilistische gebeurtenis, dat wil zeggen dat er een kans bestaat dat deze situatie zich voordoet. Omdat met non-parametrische BBN's wordt gewerkt kan hier een verdeling van faalkansen worden ingevoerd wat als voordeel heeft dat onzekerheden automatisch meegenomen worden in de berekening.

De eerste barrière is het procesbeheersingssysteem; ofwel de standaard 'process control'. In eerste instantie zal via proces control getracht worden de druk terug te brengen; veelal is dit een volledig geautomatiseerd proces. De tweede barrière wordt geactiveerd wanneer de eerste barrière niet in staat is om de drukverhoging te stoppen. In dit geval is dat een overdruk alarm waarbij een operator manueel ingrijpt op het proces. Als laatste redmiddel is er een mechanische drukaflaat. Deze aaneenschakeling van drie barrières is het excursie beheersingspad. In dit geval bevat deze drie barrières. Wanneer de proces-control loop zelf de oorzaak is van de excursie, bijvoorbeeld wanneer er een computer uitvalt of kabels breken, vervalt de eerste barrière en blijven er slechts twee over.

De eerste barrière bevat slechts twee nodes van de vier in het basismodel (1: de excursie, 2: de aanwezigheid en efficiency van een detector, 3: een functionerende logic operator en 4: de actuator). De twee nodes in deze barrière zijn de parameter excursie (druk in dit geval) en het de geïntegreerde logic en actuator. Deze vereenvoudiging is mogelijk gedurende normale procesoperatie: in dat geval is er altijd processturing aanwezig. De detector, logic en actuator functie zijn in verregaande mate geïntegreerd en continue operationeel zodat het, vooralsnog, eenvoudiger is om van één fout uit te gaan.

De tweede barrière bevat vier nodes: de excursie die niet door de proces control loop kon worden beheerst; de alarm detector welke niet altijd aanwezig is op een eenvoudig vat; een fout in het alarmeringssysteem zodat het signaal niet bij een operator komt; en tenslotte een fout in het ondernemen van actie. De laatste node vergt menselijk handelen, daarom is deze node verbonden met invloeden van menselijk falen en management invloeden (welke elders zijn gepubliceerd [Han12;Lin12]).



Figuur 2: Excursie beheersingspad voor overdruk in een eenvoudig vat.

De derde barrière bestaat weer uit twee nodes: die voor de excursie die niet door het alarmcircuit kon worden beheerst en het falen van een drukaflaat. Een drukaflaat is gebaseerd op een mechanische springveer welke de detector, logic en actuator combineert in een enkele klep. In dit artikel is geen kwantitatieve informatie opgenomen daar die tijdens het schrijven van dit artikel nog gevalideerd wordt.

Dit is een van de negen excursie beheersingspaden die zijn ontworpen voor eenvoudige vaten. Hij is afgeleid van informatie uit LOPA-analyses, publiek beschikbare informatie en inzichten in ontwerp standaarden voor chemische industrie.

Conclusie

Er is een methode ontworpen om lekkagefrequenties in de chemische- en procesindustrie rekenkundig in te schatten. Hierbij wordt gebruik gemaakt van geavanceerde modelleer technieken, waarmee de beschikbare gegevens omtrent de apparatuur en de procedures kunnen worden omgezet in foutenbomen en BBN's, waarbij zo veel mogelijk recht gedaan wordt aan de complexiteit van de werkelijkheid. Hiermee is in principe aangetoond dat een werkbare methode mogelijk is om faalfrequenties voor een hele chemische fabriek te modelleren. De methode zorgt ervoor dat het niet nodig is om een foutenboom te maken voor de volledige fabriek maar dat alleen relevante excursie beheersingsprocessen met karakteristieke barrières worden gemodelleerd. Deze excursie beheersingspaden kunnen voor een groot deel van de installatie steeds opnieuw gebruikt worden.

Door de vertaling in BBN's wordt het ook mogelijk om met distributies van faalkansen te werken (zodat onzekerheden automatisch doorgerekend worden) en menselijke- en managementfactoren te integreren. De methode is gebaseerd op voorgaande wetenschappelijke ontwikkelingen. De eerste stap in de methodeontwikkeling gebruikt een werkmethode uit bestaande QRA modellering in de chemische industrie waarbij installaties worden onderverdeeld in kleinere herkenbare onderdelen. De tweede stap is gebaseerd op vergelijkbare lekkages oorzaken uit het STATAS onderzoek. De derde stap is gebaseerd op het concept 'valide barrière' zoals die in LOPA analyse wordt gebruikt.

Dit artikel worden gezien als een demonstratie van het principe. In de toekomst moet verder worden gewerkt aan het opstellen van een dataset en het valideren van de methode.

Deze werkmethode maakt een aantal nieuwe ontwikkelingen mogelijk voor chemische procesveiligheid. Ten eerste wordt inzicht gecreëerd in faalfrequenties van chemische installaties; er wordt niet alleen gemodelleerd met historische faalfrequenties (bijvoorbeeld die voor een drukvat) maar ook naar oorzaken, menselijk handelen, en barrière effectiviteit. Ten tweede kan dit model gebruikt worden om verschillende veiligheid verhogende maatregelen te vergelijken: installatie van nieuwe drukaflaten versus trainen van personeel omdat alle invloeden gemodelleerd worden. Op langere termijn is een integratie met bestaande QRA methoden mogelijk zoals Safeti-NL of SHEPERD. Ook wordt onderzocht of volledige equipment-lijsten van fabrieken kunnen worden ingelezen en de opbouw van het model te automatiseren; dit is mogelijk wanneer er met standaard waarden wordt gewerkt. Ook is het mogelijk dat deze methode betere 'leading indicators' kan opleveren voor de chemische procesindustrie maar voor dat mogelijk is hiervoor moet een verregaande validatie worden uitgevoerd.

Dit werk is volledig gefinancierd door Royal Dutch Shell plc.

Discussie

Dit artikel demonstreert dat een drietal stappen leiden tot een overzichtelijke werkwijze om de lekkagefrequentie van procesinstallaties te berekenen. Omdat dit op basis van BBN's gebeurt is het mogelijk om menselijke- en managementfactoren mee te nemen in de analyse. Het is echter nog wel belangrijk om de methode goed te valideren. De volgende complicaties zijn geïdentificeerd maar tot op heden nog onvoldoende uitgewerkt.

De eerste complicatie is dat een gedeelte van de interacties tussen instrumenten met het opsplitsen in excursie beheersingspaden verloren gaat. Er zijn een aantal mogelijkheden om dit alsnog in de methode onder te brengen. Er kunnen door nieuwe excursie beheersingspaden worden ontwikkeld die deze interactie in de analyse opnemen. Een tweede oplossing is om een grotere BBN te ontwerpen, dat wil zeggen dat de logische operatoren (zie bovenin figuur 1) ook als BBN worden uitgewerkt zodat interferenties tussen excursie beheersingspaden direct kunnen worden gemodelleerd. Dit gaat ten koste van de eenvoud van het model.

De tweede complicatie is dat de methode voor en groot deel van de informatie van gestandaardiseerde instrumenten (leidingen, eenvoudige vaten) eenvoudig overdraagbaar is maar dat complexere instrumenten (chemische reactoren) mogelijk zeer specifieke excursie beheersingspaden kunnen bevatten. In dat geval zal voor deze, relatief uitzonderlijke instrumenten, een volledige analyse moeten worden uitgevoerd om een toegespitste set van excursie beheerspaden te ontwikkelen. Dit vergt lokale kennis van het systeem welke niet altijd in de juiste vorm aanwezig is. Voordeel van de methode blijft wel dat deze additionele exercitie alleen nodig is voor enkele complexe instrumenten.

Een derde complicatie is dat dubbel-tellen van faalfrequenties mogelijk is bij het opsplitsen in excursie beheersingspaden. Dit is een probleem dat in het ontwerp van de excursie beheersingspaden moet worden geadresseerd; bijvoorbeeld, een lengte-eenheid leidingwerk moet goed gekozen worden. Overigens blijft het dan alsnog mogelijk om bij uitzonderingen gespecialiseerde additionele excursie beheersingspaden te ontwikkelen.

Vooralsnog blijft de aanbeveling welke in de conclusie staat overeind: er zal een gedegen validatie moeten worden uitgevoerd onder realistische condities. Hiervoor is de medewerking van een commercieel chemisch- of procestechnologisch bedrijf vrijwel onmisbaar.

Referenties

- [Ale99] Ale BJM & Uitdehaag PAM *Guidelines for Quantitative Risk Analysis, (CPR18)* RIVM, 1999, SDU, Den Haag, ISBN 90-12-08796-1, 1999
- [Ale09] Ale B, Bellamy LJ, Cooke RM, Duyvis M, Kurowicka D, Lin PH, Morales O, Roelen ALC, Spouge J *Causal Model for Air Transport Safety - Final report*. Ministerie van Verkeer en Waterstraat, Directoraat-Generaal Luchtvaart en Maritieme zaken, 2009
- [Dow01] Dowell AM Layers of protection analysis. New York: Center for chemical process safety: 2001
- [Gra11] Graham B & Reilly WK. *Deep water, the Gulf oil disaster and the future of offshore drilling, report to the president*. National commission on the Deepwater Horizon oil spill and offshore drilling, ISBN: 978-0-16-087371-3, 2011
- [Gup02] Gupta JP The Bophal gas tragedy, could it have happened in a developed country? J. Loss prevention in the process industries, 15: 1-4, 2002
- [Han12] Hanea D, Hanea A, Ale B, Sillem S, Lin PH, Van Gulijk C, Hudson P. *Integrating organisational factors into a BBN model of risk*, PSAM 11, Helsinki, 2012
- [Hem12] *Hazards and Effects Management Process, Shell downstream manufacturing*. Document Number: DSM-2500003-RP-01, 2012
- [Lin12] Lin PH, Hanea D, Ale B, Sillem S, Van Gulijk C, Hudson P. Modelling human and organizational behaviour in a high-risk operation. PSAM11, Helsinki, 2012
- [Liv06] Livonianitou Z, Konstandinidou M & Christou M *Statistical analysis of major accidents in petrochemical industry notified to the major accident reporting system (MARS)*. J. hazardous materials, A137: 1-7, 2006
- [Man05] Mannan S. *Lee's Loss prevention in the Process Industries; 3rd ed*. Elsevier, Amsterdam, 2005
- [Ste11] Steffy LC *Drowning in oil*. New York: McGraw-Hill; 2011
- [Tec84] *Technika Report on a computer based system for risk assessment of chemical plant using a simplified classical method, Volume II theory*. Technika consulting scientists & engineers, London, 1984
- [Vla09] Vlaamse Overheid *Handboek faalfrequenties*. Vlaamse Overheid, departement LNE, 2009.



<http://www.veiligheidskunde.nl/congres2013-sessie1>