

Verlag

Chemische clusters en domino's, is er een probleem?

Paul Swuste^{1,3} en Arlette van der Kolk^{2,3}

Verlag van de digitale bijeenkomst van de Contactgroep Gezondheid en Chemie (CGC), in samenwerking met de Nederlandse Vereniging voor Veiligheidskunde (NVVK), 21 januari 2021.

Domino en escalatie-effecten in (petro)chemische clusters en losstaande (petro)chemische bedrijven staat in deze bijeenkomst centraal. Dit onderwerp is nu belangrijk en zal in de toekomst belangrijker worden. Majeure ongevallen bij deze bedrijven kunnen desastreuze gevolgen hebben. De vraag is of de incidenten en ongevallen te voorspellen zijn. Een majeure ongeval kan immers het startpunt zijn van zogenaamde domino- of escalatie-effecten. Een escalatie-effect treedt op als een primaire ongewenste gebeurtenis zich voortplant naar delen van andere installaties binnen het bedrijf, waarbij de secundaire effecten ernstiger zijn dan de primaire gebeurtenis. Bij een domino-effect hebben consequenties in één bedrijf een effect op naastliggende andere bedrijven. Historisch zijn er verschillende voorbeelden van domino/escalatie-effecten. Bekend is het escalatie-effect bij de Flixborough Works van Nypro Limited in Noord-Lincolnshire, UK in 1974 (Lees, 1980), één dag na afsluiting van het 1e Internationale Loss Prevention Symposium in Delft-Den Haag. Een net aangebrachte bypass tussen twee reactoren scheurt open tijdens de opstart en een grote hoeveelheid cyclohexaan ontsnapt en explodeert. Branden en vervolgeexplosies die daarna ontstaan blazen een groot deel van de fabriek op. Een ander bekend voorbeeld gebeurt tien jaar later bij een LPG-opslag van het staatsoliebedrijf Petroleo Mexicana in San Juan Ixhuatepec, een noordelijke wijk van Mexico City. Een LPG-lekkage op het terrein leidt tot een vuurbal en meerdere BLEVE's, Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion, waardoor LPG-pijpleidingen scheuren. De vlammenzee leidt tot een aantal vervolgeexplosies en LPG-cilinders schieten als projectielen weg die deels in naastgelegen favella's terecht komen (Lees, 1996; Pietersen, 1988).

Duurzame Veiligheid 2030 is een programma voor een veilige (petro)chemische sector in Nederland, met aandacht voor domino/escalatie-effecten. De Onderzoeksraad voor Veiligheid heeft al eerder het chemiecluster Chemelot on-

derzocht en expliciet gewezen op mogelijke domino-effecten (OVV, 2018). In Delft is een eerste onderzoek afgerond naar de veiligheid van bestaande (petro)chemische clusters in ons land (van Nunen et al., 2019a). Deze CGC-NVVK bijeenkomst bespreekt de stand van zaken in het onderzoek naar domino/escalatie-effecten.

De eerste spreker is **Peter Schmitz**, HSE-manager bij OCI Nitrogen op de Chemelot locatie in Geleen. Hij doet momenteel promotieonderzoek bij de TU Delft naar technische en organisatorische indicatoren voor momentane en potentieel toekomstige ongevalsprocessen van het ammoniak productieproces.

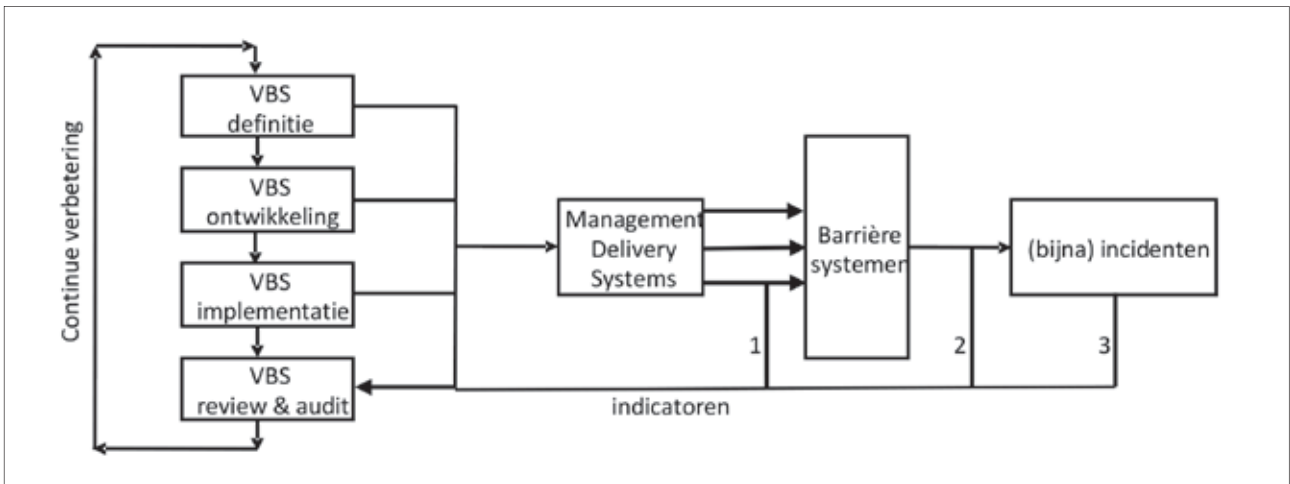
De procescondities van het ammoniak productieproces zijn potentieel gevaarlijk. De procesdruk varieert van vacuüm tot 220 bar, de procestemperatuur ligt tussen de -180 en 1000°C en aanwezige chemicaliën zijn brand, explosie gevoelig en deels toxisch. Na een aantal procesgerelateerde incidenten in 2015 start met een groot onderzoek naar majeure ongevalsprocessen bij ammoniakbedrijven. Dit heeft geresulteerd in een aantal scenario's met een zekere mate van waarschijnlijkheid en in een ordening van de gevaarlijkste procesonderdelen van het ammoniak productieproces (Schmitz et al., 2018). De karakteristieke hoge temperatuur en mechanische faalmechanismen, zoals corrosie onder isolatie, atmosferische corrosie en 'low cycle fatigue' zijn het meest waarschijnlijk (Schmitz et al., 2019). Om de ongevalsprocessen inzichtelijk te maken is de visuele weergave van de bowtie metafoor gebruikt. Hierin zijn de 'early warnings' en de geïnstalleerde barrières weergegeven, die inzicht geven in de waarschijnlijkheid van het scenario (Schmitz et al., 2020a). Deze 'early warnings' zijn in te zetten om inspecties te initiëren. Dat betekent dat inspecties pas noodzakelijk zijn als het faalmechanisme en daarmee één of meerdere scenario's geactiveerd zijn. Dit is een nieuwe stap op het gebied van onderhoud efficiëntie en een onderdeel van risk based inspection, RBI. Als laatste is gezocht naar procesveiligheids-indicatoren (Swuste et al., 2015) voor de kwaliteit van de barrières en ontwikkeling van de scenario's (Figuur 1).

De figuur heeft drie regelkringen. De bijna-incidentenrappor-

¹ Technische Universiteit Delft

² NVVK

³ bestuur CGC



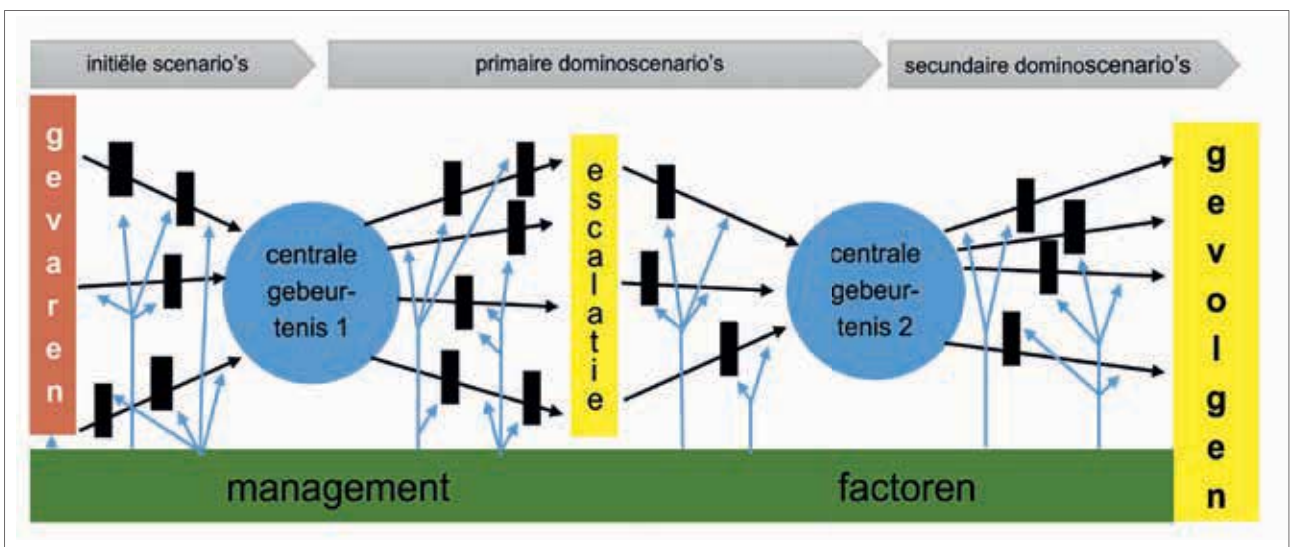
Figuur 1: Procesveiligheidsindicatoren (Schmitz et al., 2020b) VBS-veiligheidsbeheerssysteem

tages van OCI en andere buitenlandse ammoniakbedrijven via de literatuur zijn gebruikt om majeure ongevalsprocessen en -scenario's te achterhalen. De laatste kring, kring 3, geeft bij toekomstige bijna-incidenten informatie over het functioneren van het veiligheidsbeheerssysteem als geheel. Kring 2 gaat uit van het barrière systeem, het geheel van aanwezige barrières dat moet voorkomen dat een scenario zich ontwikkelt. Daarvoor moet de kwaliteit van de barrière, uitgedrukt in betrouwbaar/beschikbaar en effectiviteit, voldoende zijn en het moet duidelijk zijn of een barrière is aangesproken. Het onderzoek beperkt zich tot de preventieve barrières in het linkerdeel van de bowtie. Met een aantal voorbeelden is de kwaliteit en de activering van barrières voor procesinstallaties van het ammoniakproductieproces uitgewerkt (Schmitz et al., 2020a). Kring 1 start vanuit organisatorische factoren, ook wel management delivery systems genoemd. Dit is eveneens uitgewerkt met een aantal voorbeelden (Schmitz et al., 2020b). Kwalitatieve informatie wordt uit de drie à vierjaarlijkse audits of peer reviews gehaald. Bij geen grote tekortkomingen is het zinvol om kwantitatief te gaan meten. Met vastgestelde drempelwaarden kunnen (management)indicatoren worden ontwikkeld. Het bepalen

van drempelwaarden is echter niet gemakkelijk omdat de invloed op de ongevalsprocessen moeilijk vast te stellen is. Er is nog veel retrospectief onderzoek naar incidenten nodig om hier iets over te kunnen normeren. De presentatie laat zien dat majeure ongevallen voorspelbaar zijn mits er voldoende kennis is van de ongevalsprocessen en van organisatorische/management factoren die daar invloed op hebben.

Paul Swuste, pensionado en verbonden aan de TU Delft, geeft een kort overzicht van enkele historische domino/escalatie-effecten en gaat dieper in op de onderliggende ongevalsprocessen.

De presentatie van Peter Schmitz gaat uit van primaire ongevalsprocessen en hoe deze te voorspellen zijn. Als eerste worden een aantal definities van domino/escalatie-effecten gegeven. Deze hebben als overeenkomst dat een domino-effect begint met een primair ongevalsproces, dat leidt tot de propagatie van fysische effecten zoals straling, brand, explosie, overdruk, of van wegschietende fragmenten. Dit zijn de escalatie factoren die de start zijn voor een opvolgend ongevalsproces binnen of buiten de inrichting. Na



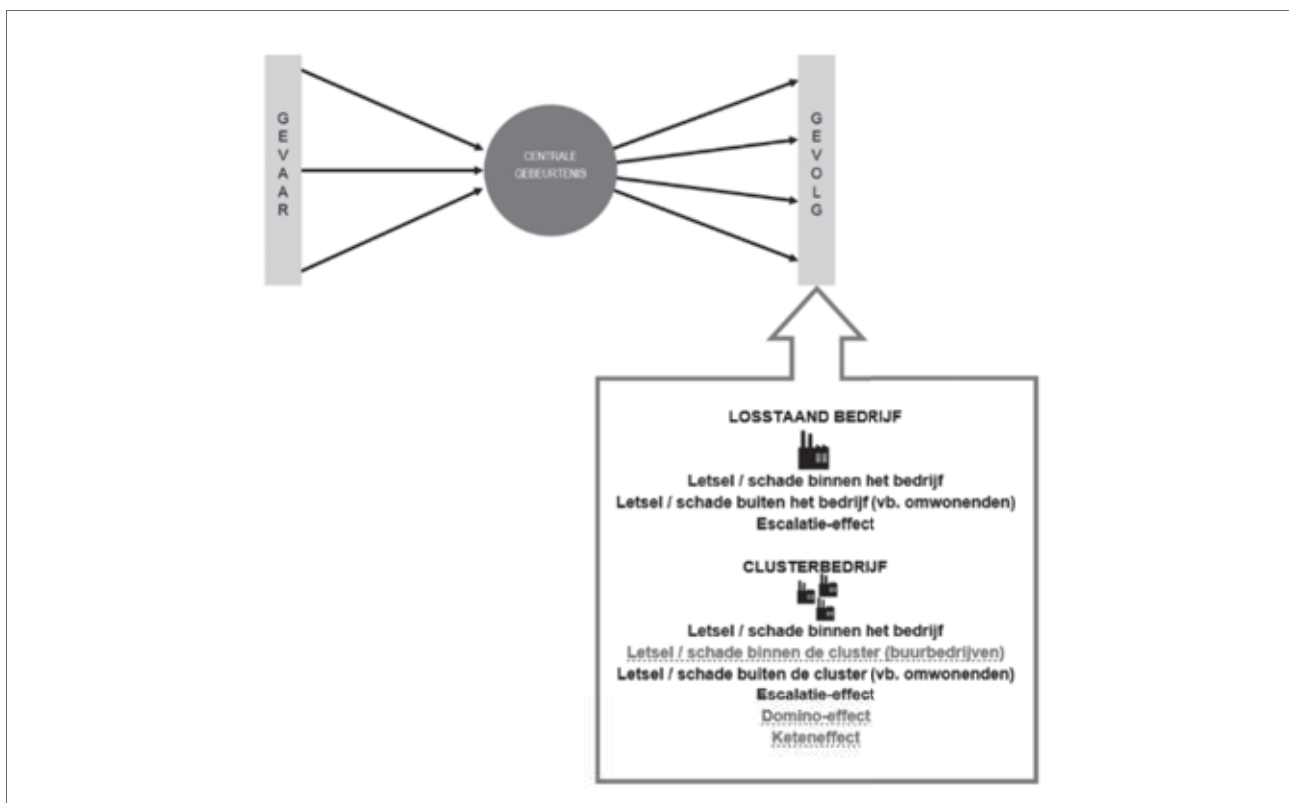
Figuur 2: De domino bowtie (Swuste et al., 2018)

enkele bekende en minder bekende voorbeelden wordt de domino bowtie gepresenteerd als inzichtelijke metafoor om elkaar opvolgende ongevalsprocessen te begrijpen (Figuur 2). In de figuur is een dubbele bowtie weergegeven, maar een domino-effect kan uit meerdere ongevalsprocessen bestaan en dus meer dan twee bowties omvatten. Om domino-effecten te begrijpen is allereerst een goed begrip van primaire en opvolgende ongevalsprocessen noodzakelijk, zoals dat in de eerste presentatie is aangegeven. De figuur laat zien dat de beheersing van de initiële scenario's van het primaire ongevalsproces de sleutel is om domino-effecten te voorkomen. Majeure ongevallen in Nederland tussen 1990 en 2010 maken duidelijk dat deze ongevallen nog jaarlijks en soms frequenter voorkomen. Onze kennis over deze primaire ongevalsprocessen lijkt nog beperkt te zijn. Aanvankelijk, vanaf eind jaren zeventig van de vorige eeuw zijn rapportages en analyses van majeure ongevallen gestart vanuit overheidsinstellingen en aan overheden gelieerde onderzoekscentra. Met de opkomst van de kwantitatieve risicoanalyse spelen de, in Nederland gepubliceerde, gekleurde boekenreeks internationaal een prominente rol in de kwantificering van domino-effecten. Vanaf begin jaren tachtig stimuleren de Europese Seveso richtlijnen wetenschappelijk onderzoek. Dit is zichtbaar in het aantal publicaties over domino-effecten vanuit een kwantitatieve benadering in diverse rapporten en wetenschappelijke artikelen. Verschillende analysetechnieken berekenen waarschijnlijkheden en faalmechanismes van het zeer complexe fenomeen van domino-effecten en haar consequenties. Deze analyses geven getallen en getallen geven houvast. Dat is de dominante gedachte van veel technisch

geschoolde experts en besluitvormers in bedrijven en bij overheden. Maar deze getallen zijn constructen, omgeven door grote onzekerheden en geven weinig informatie over onderliggende ongevalsprocessen. Gevaren en escalatie factoren daarentegen zijn reëel. Het gaat om temperatuur, straling, druk, corrosie, brand, explosies etc. Om domino/escalatie-effecten te kunnen begrijpen, noodzakelijk om maatregelen te nemen, is kennis vereist van de centrale gebeurtenissen, van de scenario's en van de effectiviteit van barrières. Maar vooral is kennis en een beter begrip van initiële ongevalsprocessen nodig die een domino/escalatie-effect kunnen starten. Momenteel zijn pas de eerste stappen in het voorspellen van deze ongevalsprocessen.

Na de pauze laat **Karolien van Nunen**, werkzaam als universitair docent bij de TU Delft, de stand van zaken zien bij (petro)chemische clusters in Nederland.

Het onderzoek, een samenwerking tussen Universiteit Antwerpen en TU Delft, is een verkennende studie naar parameters die de veiligheid van (petro)chemische clusters en losstaande (petro)chemische bedrijven beïnvloeden. Nederland kent zes (petro)chemische clusters: Amsterdam, Delfzijl-Eemshaven, Moerdijk, Rotterdam-Rijnmond met als sub-clusters Pernis, Botlek, Europoort, Maasvlakte, Sittard-Geleen Chemelot en Zeeland Terneuzen. Het onderzoek beperkt zich tot de zogenaamde worst-credible scenario's en centrale gebeurtenissen. Dit zijn scenario's en centrale gebeurtenissen met de grootste effecten die tot op zekere hoogte waarschijnlijk zijn, zoals 1/ brand: plasbrand, fakkelflam, vuurbal, steekvlam, 2/ explosie: mechanische



Figuur 3: Effecten van worst-credible scenario's en centrale gebeurtenissen (van Nunen et al., 2019b)

explosie, explosie in gesloten ruimte, gaswolke explosie, VCE, BLEVE en 3/ het vrijkomen van toxische stoffen. De gevaren, die hieraan voorafgaan, zijn de aanwezigheid van ontvlambare, explosieve en toxische stoffen. Hierin zijn er geen verschillen tussen (petro)chemische clusters en losstaande bedrijven. Of de scenario's en centrale gebeurtenissen optreden is sterk afhankelijk van de soort en de hoeveelheid aanwezige gevaarlijke stoffen in een bedrijf en van de activiteiten die daarmee gepaard gaan.

Het verschil tussen losstaande en geclusterde bedrijven ligt in de gevolgen van de worst-credible scenario's en centrale gebeurtenissen (Figuur 3). Bij een losstaand bedrijf kan een ongevalsproces lijden tot letsel of schade binnen het eigen bedrijf, letsel of schade buiten het bedrijf, bijvoorbeeld naar omwonenden en de bebouwing, of een escalatie-effect, een ongevalsscenario in het bedrijf veroorzaakt een *ander* ongevalsscenario binnen hetzelfde bedrijf.

Bij een clusterbedrijf gelden deze mogelijke effecten ook, maar hier komt bovenop dat er ook letsel of schade kan optreden bij de buurbedrijven. En ook bestaat de mogelijkheid op domino-effecten, een ongevalsscenario in het bedrijf veroorzaakt een ander ongevalsscenario in een ander bedrijf en keteneffecten. Keteneffecten ontstaan als bedrijven binnen een cluster onderling zijn verbonden. Voorbeelden zijn het gezamenlijk gebruik van utilities zoals elektriciteit, stoom, water, gassen, of als productiestromen tussen bedrijven geïntegreerd zijn, zoals bijvoorbeeld het ammoniakkringleidingnet bij Chemelot.

Deze presentatie lichtte de aanbevelingen toe om veiligheid binnen clusters te optimaliseren. Zo is het nodig om informatie-uitwisseling over ongevalsscenario's tussen naburige bedrijven te stimuleren. En dat geldt zowel voor bedrijven met een domino-aanwijzing als voor bedrijven zonder een domino-aanwijzing. Ook is er meer aandacht nodig voor mogelijke domino-effecten bij de bedrijven die net onder de BRZO drempel vallen. En die extra aandacht moet niet enkel vanuit de cluster zelf komen. De vraag kan ook gesteld worden of de inspectie, de gemeenten, de regionale vergunningverleners genoeg zicht hebben op deze risicorelevante bedrijven. Samenwerking binnen clusters moet veel meer proactief en strategisch zijn. Nu beperkt deze samenwerking zich vaak enkel tot het reactieve en operationele als een gezamenlijk noodplan, alarmering, brandweer, etc. Ook moet een clusterbeleid verder gaan dan ruimtelijke ordening en externe veiligheid. Dus ook nadat de cluster gevestigd is zou deze clusterbenadering zich moeten voortzetten, onder andere in het toezicht en handhaving vanuit de overheid. Binnen de clusters is er de noodzaak van samenwerking en kennisdeling. Vinden de bedrijven in een cluster elkaar om samen veiligheid op een hoger niveau te brengen?

Ter afsluiting van de middag geeft **Genserik Reniers**, als hoogleraar verbonden aan zowel de Universiteit Antwerpen als de TU Delft, een overzicht van het onderzoek naar domino/escalatie-effecten.

Het onderzoek naar domino-effecten is in te delen naar verschillende tijdsperiodes, bepaald door de Seveso regelgeving en de productie van wetenschappelijke artikelen en rapportages (zie voor een overzicht Swuste et al., 2018). In de eerste editie van het handboek Loss Prevention in the Process Industries van Frank Lees (1980) wordt het domino-effect behandeld als een resultaat van propagatie van processtoringsen. Maar tot 1996 is er echter zeer beperkt aandacht voor domino/escalatie-effecten in de wetenschappelijke literatuur. Het onderwerp komt wel aan de orde bij een analyse van de LPG-branden en explosies bij de opslag van de Feyzin raffinaderij onder Lyon in 1966. Eén en twintig jaar na de ramp publiceert het Britse Institute of Chemical Engineers een korte analyse van dit majeure ongeval en benoemt expliciet de escalatie-effecten (IChemE, 1987). Ook de TNO-analyse van het majeure ongeval in Mexico City verwijst naar deze effecten (Pietersen, 1988). Maar het onderzoeksrapport over het majeure ongeval in Flixborough zwijgt hierover (Parker, 1975). De mogelijkheid van domino-effecten is een van de belangrijkste zorgen van de Britse overheid en leiden in 1978 tot het Britse onderzoek naar gevaren en risico's van het petrochemisch industriepark op Canvey Island, aan de monding van de Theems. Tien jaar later start een vergelijkbaar onderzoek in Italië bij het chemische cluster bij Ravenna, het ARIPAR-project. De Seveso I richtlijn uit 1982 noemt domino-effecten. Dit heeft een weerklank op internationale congressen en onderzoeksrapportages van majeure ongevallen. Publicaties in wetenschappelijke tijdschriften verschijnen mondjesmaat na 1982. Het concept risico is inmiddels geïntroduceerd in de procesveiligheid, mede onder druk van het majeure ongeval in Flixborough en de publicatie van de Nederlandse gekleurde boeken. Maar met de kwantitatieve risicoanalyse techniek QRA zijn geen domino-effecten te berekenen. Er wordt een start gemaakt om de centrale gebeurtenis van het primaire ongevalsproces en de gevolgen te omschrijven, inclusief de escalerende factoren. Het eerste programma wordt ontwikkeld om de frequentie van de domino-effecten, veroorzaakt door deze primaire ongevalsprocessen, te berekenen.

De tweede periode valt samen met de publicatie van de Europese Seveso II richtlijn uit 1996. Hier zijn regels opgenomen voor ruimtelijke ordening en de eis voor de identificatie en preventie van externe domino-effecten. Deze periode eindigt rond 2011 en laat een toename zien van publicaties in de wetenschappelijke pers met artikelen over primaire en vervolg dominoscenario's, escalerende factoren, barrières en maatregelen, methoden om domino-effecten te berekenen en hoe de veiligheid in industriële chemische parken te managen. De QRA-analyse wordt aangevuld met het zogeheten probit model om verschillende escalatiefactoren en categorieën van schade aan procesapparatuur in te schatten, gebruik makend van informatie uit het 'gele boek' uit de gekleurde boekenreeks. De eerste software verschijnt om het relatieve belang van installaties te bepalen op grond van afstanden tussen installaties met (zeer) brandbare stoffen, de faalscenario's van installaties. Het 'paarse boek' en het Instrument Domino Effect van het RIVM zijn de bronnen

voor de berekeningen. Informatie van chemische bedrijven, relevant voor externe domino-effecten, wordt al snel als vertrouwelijk gezien. In de literatuur is een voorstel gedaan voor de oprichting van een zogenaamde clusterraad. Besluitvorming in een clusterraad kan ingewikkeld zijn, zeker als risicobeheersing over meerdere bedrijven geen duidelijk economisch voordeel oplevert. Er verschijnen publicaties over speltheoretische benaderingen voor deze strategische samenwerking en besluitvorming.

Daarna volgt de derde periode rond de Seveso III vanaf 2012. Deze richtlijn stelt dat eigenaren van chemische locaties intensief informatie moeten uitwisselen ter preventie van deze escalerende scenario's. In alle Seveso richtlijnen wordt alleen gesproken van externe domino-effecten tussen verschillende inrichtingen. Interne domino-effecten binnen één inrichting worden buiten beschouwing gelaten. De derde periode laat een sterke toename zien van wetenschappelijke artikelen. Behalve onderzoek in Westerse landen is ook in Centraal en Zuidoost Azië veel over het onderwerp gepubliceerd. Hier zijn een aantal universiteiten actief in het onderzoek naar domino/escalatie-effecten (Figuur 4). Tussen deze universiteiten bestaan duidelijke verbanden middels de uitwisseling van onderzoekers, studenten en gezamenlijke publicaties en projecten. Dit is zichtbaar tussen België-Nederland, Italië-Canada en India-Iran en in mindere mate tussen Italië-Nederland en Italië-België. Het onderzoek richt zich op een verdere kwantificering met Baysiaanse netwerken, maar er blijven grote onzekerheden in de kansberekeningen. Mede onder druk van Seveso

III is er aandacht voor risicomanagement en barrières. In deze periode verschijnen, of gaan verschijnen, een aantal handboeken met de state of the art van het onderzoek en de beheersing van domino/escalatie-effecten (Reniers & Cozzani, 2013; Cozzani & Reniers, 2021).

Literatuur

Cozzani V, Reniers G. (eds) (2021) Dynamic risk assessment and management of domino effects and cascading events in the process industry. Elsevier.

IChemE (1987) The Feyzin Disaster. Loss Prevention Bulletin 077, October p 1-4.

Lees F. (1980) Loss Prevention in the Process Industries, Butterworth & Co, London, UK.

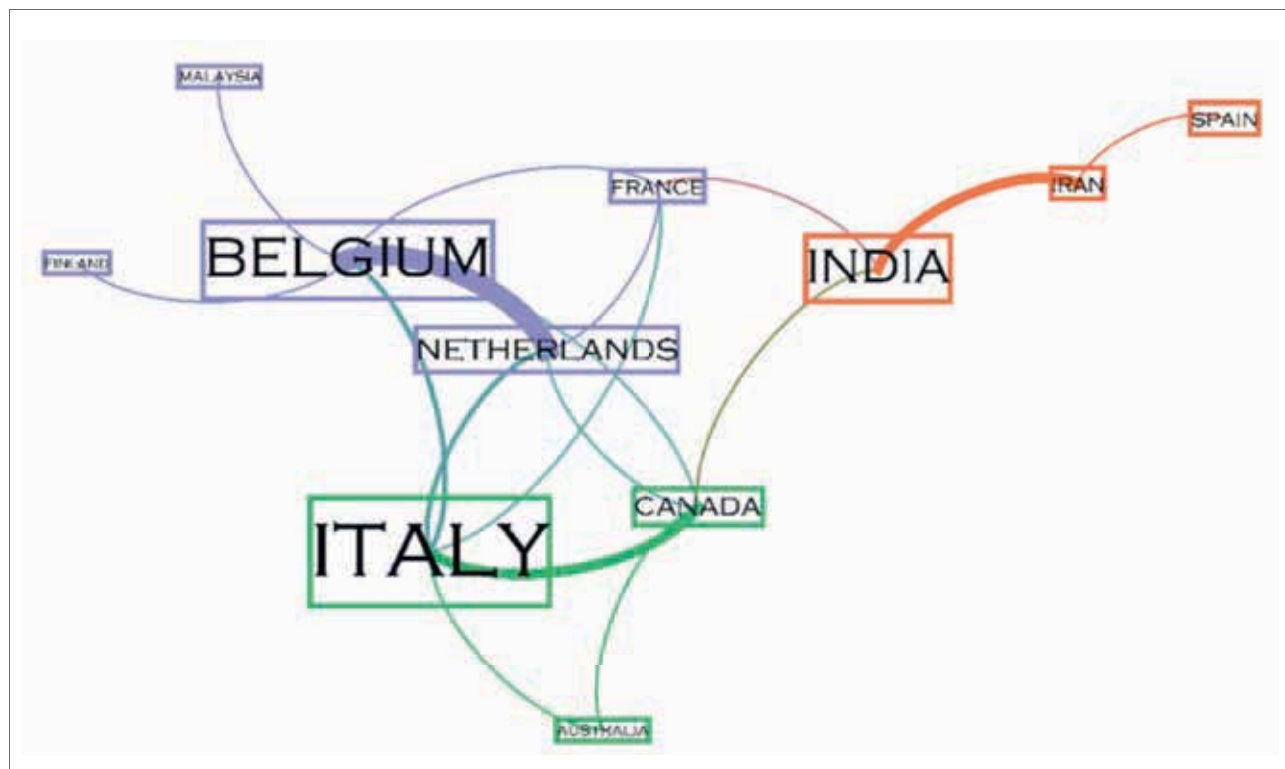
Lees F. (1996) Loss prevention in the process industry. Hazard Identification, assessment, and control. Butterworth Heinemann, 2nd edition, Oxford.

Li J, Reniers G, Cozzani V, Khan F. (2017) A bibliometric analysis of peer-reviewed publications on domino effects in the process industry. Journal of Loss Prevention in the Process Industries; 49: 103-110.

Onderzoeksraad voor Veiligheid (OVV). (2018) Meer samenwerking nodig voor veilig Chemelot. OVV, Den Haag.

Parker R. (1975) The Flixborough Disaster. Report of the Court of Inquiry. Department of Employment, Her Majesty's Stationary Office, London.

Pietersen C. (1988) Analysis of the LPG disaster in Mexico City. Journal of Hazardous Materials; 20: 85-107.



Figuur 4: Landen met de hoogste bijdrage/samenwerking in onderzoek naar domino-effecten in de chemische industrie (Li et al., 2017) De dikte van de lijnen geeft de mate van samenwerking weer, de grootte van de weergave van de landen de relatieve omvang van de onderzoeksinspanning

- Reniers G, Cozzani V. (eds) (2013) Domino effects in the process industries. Elsevier
- Schmitz P, Swuste P, Theunissen J, Reniers G, Decramer G, Uijterlinde P. (2018) Een aanpak voor een realistische ranking van de gevaarlijke procesonderdelen van het ammoniakproductieproces. Tijdschrift voor toegepaste Arbowedenschap; 31 (2): 42-54.
- Schmitz P, Swuste P, Reniers G, Decramer G. (2019) Een aanpak voor de beoordeling van mechanische faalmechanismen van statische apparaten van het ammoniakproductieproces. Tijdschrift voor toegepaste Arbowedenschap; 32 (2): 34-54.
- Schmitz P, Swuste P, Reniers G, van Nunen K. (2020a) Een praktische aanpak voor het voorspellen van majeure ongevallen in de procesindustrie op basis van de barrière status op scenario niveau. Tijdschrift voor toegepaste Arbowedenschap; 33 (2): 47-66.
- Schmitz P, Swuste P, Reniers G, van Nunen K. (2020b) Praktische kwalitatieve aanpak voor het voorspellen van majeure ongevallen in de procesindustrie op basis van organisatorische factoren. Tijdschrift voor toegepaste Arbowedenschap; 33 (4): 124-134.
- Swuste P, Theunissen J, Reniers G, Blokland P. (2015) Veiligheidsindicatoren voor processen een overzicht van de literatuur. Tijdschrift voor toegepaste Arbowedenschap; 28 (3): 83-98.
- Swuste P, van Nunen K, Reniers G. (2018) Domino-effecten bij chemische bedrijven en clusters, een literatuuroverzicht van de kennisontwikkeling. Tijdschrift voor toegepaste Arbowedenschap; 31 (4): 131-147.
- Van Nunen K, Reniers G, Swuste P. (2019a) Verkennende studie naar (petro)chemische clusters en veiligheid: Veiligheidsparameters binnen (petro)chemische clusters en losstaande (petro)chemische bedrijven Technische Universiteit Delft, Universiteit Antwerpen.
- Van Nunen K, Swuste P, Reniers G. (2019b) (Petro)chemische clusters en veiligheid. Tijdschrift voor toegepaste Arbowedenschap; 33 (1): 2-20.