

Domino-effecten bij chemische bedrijven en clusters, een literatuuroverzicht van de kennisontwikkeling

Swuste, Paul; van Nunen, Karolien; Reniers, Genserik

Publication date

2019

Document Version

Final published version

Published in

Tijdschrift voor Toegepaste Arbowetenschap

Citation (APA)

Swuste, P., van Nunen, K., & Reniers, G. (2019). Domino-effecten bij chemische bedrijven en clusters, een literatuuroverzicht van de kennisontwikkeling. *Tijdschrift voor Toegepaste Arbowetenschap*, 31(4), 131-147.

Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable).
Please check the document version above.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights.
We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Full paper

Domino-effecten bij chemische bedrijven en clusters, een literatuuroverzicht van de kennisontwikkeling

Paul Swuste¹, Karolien van Nunen^{2,3,4} en Genserik Reniers^{1,4,5}

Samenvatting

Majeure ongevallen in de chemische en petrochemische sector in het Westen, die veel media aandacht hebben gekregen in de jaren zeventig, zijn het startpunt geweest van onderzoek naar interne en externe domino-effecten in deze sectoren. Aanvankelijk zijn dit rapportages geweest van analyses van deze ongevallen vanuit overheidsinstellingen en aan overheden gelieerde onderzoekscentra. Ook zijn studies naar potentiële ongevallen in deze en de nucleaire sector gestart. Met de opkomst van de kwantitatieve risico-analyse hebben de, in Nederland gepubliceerde, gekleurde boekenreeks internationaal een prominente rol gespeeld in de kwantificering van domino-effecten. Vanaf begin jaren tachtig hebben de Europese Seveso richtlijnen wetenschappelijk onderzoek gestimuleerd. Dit is zichtbaar in het aantal publicaties over domino-effecten in wetenschappelijke tijdschriften. Een kwantitatieve benadering domineert het onderzoek in Westerse landen. Met verschillende analysetechnieken zijn waarschijnlijkheden en faalmechanismen berekend van het zeer complexe fenomeen van domino-effecten en haar consequenties. Een transitie naar risicomanagement staat nog in haar kinderschoenen. Een toekomstige transitie is nodig om initiële scenario's, de start van domino-effecten, te begrijpen. In India heeft een grote ramp in een chemisch bedrijf een vergelijkbare invloed gehad als in het Westen, alleen 20 jaar later. Chinese publicaties over domino-effecten in de wetenschappelijke pers verschijnen later dan in India. Door de snelle industrialisatie in dit land zijn de aantallen overweldigend, zowel in het aantal chemische bedrijven, als in de majeure ongevallen in deze sector.

Inleiding

In de literatuur over domino-effecten zijn een aantal reviewartikelen verschenen en geven een overzicht van majeure ongevallen met domino-effecten in de chemische- en procesindustrie (Kourniotis et.al., 2000; Ronza et.al., 2003; Gómez-Mares et.al., 2008; Darbra et.al., 2010; Abdolhamidzadeh et.al., 2011). Ook is een artikel verschenen met de 'state of the art' van het huidige onderzoek op dit gebied (Necci e.a., 2015). Dit artikel geeft een historisch overzicht van het onderzoek

Summary

Major accidents in Western countries, receiving a lot of media attention in the 1970s, are starting point for research into internal and external domino-effects in the chemical and petrochemical sectors and clusters. Initially, these reports are published by government institutions and government-related research centres. With the upcoming quantitative risk analyses, the so-called 'coloured books', published in the Netherlands, play a prominent role in quantifying these domino-effects. Since the early 1980s, the European Seveso guidelines encourage scientific research, shown in substantially growth of publications. Research in Western countries is dominated by risk assessments, and with various tools also probabilities, and failure mechanisms are calculated for the complex phenomenon of domino effects and its consequences. Previous works are closely related to political, official and private decision-making. A transition towards risk management is still in its infancy. A future transition is necessary to understand initial scenarios as starting points for domino-effects.

In India a similar wake-up call for domino-effects occurs 20 years later. Chinese publications on domino-effects in the international scientific press appear later than in India. Due to a rapid industrialisation, the numbers in this country are overwhelming, both in numbers of chemical companies, as many major accidents in this sector.

en de kennisontwikkeling van ongevalsprocessen leidend tot domino-effecten van de laatste 50 jaar. Historische overzichten zijn niet alleen een bron van anekdotes, of van chronologie, maar geven inzicht in transities in kennis over domino-effecten. Welke determinanten van deze ongevalsprocessen zijn tot nu toe bekend?

Nederland heeft een gunstig vestigingsklimaat voor de chemische sector. Er zijn directe lijnen tussen de belang-

¹ Sectie Veiligheidskunde, Technische Universiteit Delft, Nederland

² Leerstoel Vandeputte, Universiteit Antwerpen, België

³ Rechtshandhaving, Faculteit Rechten, Universiteit Antwerpen, België

⁴ Antwerp Research Group on Safety and Security (ARGoSS), Faculteit Toegepaste Economische Wetenschappen, Universiteit Antwerpen, België

⁵ Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), Bilthoven, Nederland

GEBIED	CHEMIECLUSTER
Eemsdelta	Delfzijl
Geleen-Sittard	Chemelot
Zeeland/kanaalgebied Gent-Terneuzen	Zeeland
Rotterdam/Botlek	Rotterdam-Rijnmond
	Pernis
	Botlek
	Europoort
	Maasvlakte
	Dordrecht
Moerdijk	Moerdijk
Amsterdam	Amsterdam



Figuur 1 Chemieclusters in Nederland

rijkste chemiecentra in Nederland, België, Duitsland en Noord-Frankrijk. Nederland is zes chemieclusters rijk (Figuur 1). Rotterdam-Rijnmond, Moerdijk, Zeeland en Chemelot zijn onderdeel van het ARRR cluster, een samenwerking van chemische bedrijven met Antwerpen en het Rijn-Ruhr gebied. Het ARRR cluster is met pijpleidingen, wegen, waterwegen en spoor met elkaar verbonden. Een chemische cluster is een geografisch afgebakend gebied waarbinnen verschillende chemische inrichtingen gevestigd zijn, al dan niet omgeven door niet-chemische inrichtingen. De samenwerking tussen deze inrichtingen kan variëren van niet of zeer licht georganiseerd tot intensief georganiseerd. Deze eventuele samenwerking schept mogelijkheden, zoals het efficiënt gebruik van energie en van grondstoffen, of aspecten op het gebied van incidenten- en rampenbestrijding. 'Supply keten management is daar een voorbeeld van, met relaties tussen meerdere partners die in verschillende delen van de supply-keten actief zijn. Dit is een voorbeeld van een zogenaamde verticale samenwerking en voorkomt onnodige logistieke kosten. Samenwerking kan ook horizontaal zijn en verwijst naar uitwisseling en delen van informatie, faciliteiten of hulpbronnen, zoals bijvoorbeeld incident- en rampenmanagement. Ook hier worden kosten tussen bedrijven beperkt, die als concurrent in eenzelfde markt opereren of in hele andere markten actief zijn (Reniers, 2009, 2010a). Nabijheid van en verbindingen tussen bedrijven hebben niet per se een positief effect op veiligheid. De ketenintegratie en de complexiteit in deze sectoren worden vergroot door een geleidelijke groei en verdere automatisering. Gecombineerd met een verdere uitbesteding van taken en onderdelen wordt het overzicht van processen en afhankelijkheden complexer. Dit en de cumulatie van risico's in een cluster verhoogt de kans op majeure ongevallen, al dan niet in combinatie met domino-effecten. Majeure ongevallen en incidenten

in deze sectoren, inclusief het vervoer van chemische stoffen, komen in Nederland met enige regelmaat voor. Het betreft één of meerdere explosies, branden, emissies van gevaarlijke stoffen via lekkages, of rookontwikkeling. De effecten zijn beperkt gebleven tot schade aan installaties met kosten tot enkele tientallen miljoenen euro's. Zo heeft de materiële schade van de brand bij Chemie-Pack Moerdijk in 2011 71 miljoen euro gekost (RIVM, 2016).

Een domino-effect is een betrekkelijk ingewikkelde gebeurtenis. De laatste twee decennia is vanuit de wetenschappelijke literatuur hier steeds meer aandacht voor. Voor domino-effecten bestaan een aantal definities. De meest eenvoudige definitie is afkomstig van Lees: 'een gebeurtenis in één eenheid die een vervolg gebeurtenis in een andere eenheid veroorzaakt' (Lees, 1996). Reniers en co-auteurs omschrijven een domino-effect als 'een cascade van gebeurtenissen waarbij consequenties van een eerder ongeval toenemen door opvolgende gebeurtenissen, zowel ruimtelijk als volgtijdelijk en aanleiding zijn voor een majeur ongeval' (Reniers e.a., 2005a). Deze twee definities beschrijven het proces van een domino-effect. Het Amerikaanse Center for Chemical Process Safety (CCPS) van de AIChE geeft als definitie 'een incident dat start in één eenheid en invloed heeft op nabijgelegen eenheden door een thermische effect, een explosie of een impact van fragmenten' (CCPS, 2000). In deze definitie is aandacht voor het mechanisme van een domino-effect, de hittestraling, de drukgolf en de projectie van brokstukken. Dat wordt in een definitie van Cozzani en co-auteurs nog verder uitgewerkt waar vier stadia worden onderscheiden:

1. een primair ongevalsscenario, het startpunt van het domino-effect;
2. de propagatie volgend op de primaire gebeurtenis,

veroorzaakt door fysische effecten - de escalatie factoren - van het primaire scenario en resulterend in schade aan ten minste één secundaire eenheid;

3. één of meerdere secundaire scenario's ontstaan, met effecten op dezelfde, of andere fabrieksinstallaties, of andere inrichtingen;
4. een escalatie effect is het gevolg, een toename van het effect van de domino ten opzichte van het primaire scenario (Cozzani e.a., 2006, 2007).

Deze laatste definitie maakt een onderscheid tussen een 'intern domino-effect', een effect binnen één inrichting en een 'extern domino-effect' tussen meerdere inrichtingen. Uit de bovengenoemde vier definities blijkt dat er in de literatuur beperkte overeenstemming is over een alom geaccepteerde definitie van het domino fenomeen (Reniers, 2010a, Abdolhamidzadeh e.a., 2011; Necci e.a., 2015). Ondanks het feit dat de gevolgen van domino-effecten rampzalig kunnen zijn, heeft het onderwerp nog weinig aandacht gekregen van veiligheidsmanagers en pas de laatste decennia van de wetenschap. Domino-effecten zijn immers complex en, vergelijkbaar met majeure ongevallen is de kans op een dergelijk ongeval zeer klein.

Methoden en technieken

Voor dit literatuuronderzoek zijn wetenschappelijke bibliografische databanken doorzocht, *Web of Science* en individuele wetenschappelijke tijdschriften, waaronder *Accident Analysis and Prevention*, *Journal of Hazardous Materials*, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, *Journal of Safety research*, *Process Safety Progress*, *Reliability Engineering and System Safety*, *Safety Science*, *Transactions of industrial Chemistry*. Relevante artikelen uit deze tijdschriften zijn geraadpleegd, evenals literatuurverwijzingen naar andere wetenschappelijke tijdschriften, die hierboven niet genoemd zijn. Bij deze zoektocht zijn de volgende zoektermen gebruikt: *industrial park*, *chemical park*, *industrial area*, *chemical area*, *chemical cluster*, *multiplant*, *domino*. Naast de wetenschappelijke literatuur is de zogenaamde grijze literatuur geraadpleegd; onderzoeksrapporten en beschikbare overheidsdocumenten. De zoektocht heeft meer dan 100 artikelen documenten opgeleverd.

Nade Tweede Wereldoorlog heeft er een massale opschaling plaatsgevonden in Westerse landen van voornamelijk de chemische industrie. De productiecapaciteit, de opslag en het transport van gevaarlijke materialen is in die periode sterk toegenomen. Dit is aanleiding geweest voor een aantal majeure ongevallen, die vanaf de jaren zeventig uitgebreid in de media zijn besproken. De betrouwbaarheid van de installaties in de procesindustrie is in die tijd een punt van grote zorg en vanaf die periode zijn verschillende 'loss preventie' studies gestart (Pasman en Snijder, 1974; Coevert e.a., 1974; Vörös en Honti, 1974; Grim, 1974; TNO, 1983; Pasman, 1999; Spoelstra e.a., 2015; voor een overzicht zie Oostendorp e.a., 2016).

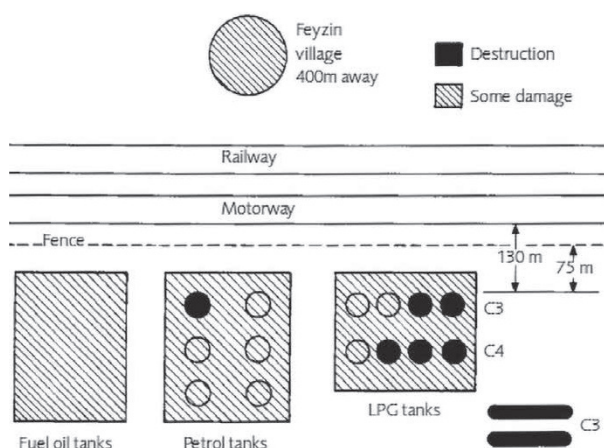
Het onderzoek naar domino-effecten is in te delen naar verschillende tijdsperiodes. Li en co-auteurs hebben de relatie aannemelijk gemaakt tussen de Seveso regelgeving en de productie van artikelen uit Westerse landen (Li e.a., 2017). De Seveso I richtlijn uit 1982 (Council Directive 82/501/EEC) noemt domino-effecten als belangrijk fenomeen binnen de procesindustrie. Deze effecten worden onderwerp van presentaties op internationale congressen en onderzoeksrapportages van majeure ongevallen of van onderzoek naar risico's van chemische industrieparken. Publicaties in wetenschappelijke tijdschriften verschijnen mondjesmaat na 1982. De eerste periode start met het majeure ongeval, een intern domino-effect, in Feyzin, Frankrijk in 1966 en loopt door tot begin jaren negentig van de vorige eeuw. De tweede periode valt samen met de publicatie van de Europese Seveso II richtlijn uit 1996 (Council Directive 96/82/EC). In deze richtlijn zijn regels opgenomen voor ruimtelijke ordening en de eis voor de identificatie en preventie van domino-effecten. Deze periode eindigt rond 2011 en laat een toename zien van publicaties in de wetenschappelijke pers. Daarna volgt de derde periode rond de Seveso III (Council Directive 2012/18/EU). In deze richtlijn wordt gesteld 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. De periode start in 2012 en loopt in dit literatuuroverzicht door tot begin 2018. Behalve onderzoek in Westerse landen is ook in Centraal en Zuidoost Azië veel gepubliceerd over domino-effecten. Dit onderzoek laat zich niet gemakkelijk indelen in de bovenstaande tijdsperiodes en zal daarom in een aparte paragraaf worden besproken.

Resultaten

Het eerste gedocumenteerde domino-ongeval uit 1947 vindt plaats in de haven van Texas City. Een schip is geladen met ammonium nitraat. Door een ontstekingsbron detoneert de lading. Dit geeft een kettingreactie waarbij andere schepen en een olieopslag op land exploderen. Ondanks dat dit majeure ongeval in Amerika het grootste is gemeten naar het aantal dodelijke slachtoffers, bijna 600, is het geen trigger geweest voor onderzoek naar domino-effecten (Khan en Abbasi, 1998).

Eerste periode, 1966-1995

De eerste periode wordt gedomineerd door majeure ongevallen met interne domino-effecten: Feyzin-1966 Frankrijk, Flixborough-1974 UK en Mexico City-1984 Mexico. Analyses van deze ongevallen geven een beeld van ongevalsprocessen met domino-effecten en stimuleren een risicobenadering die in de jaren zeventig van de vorige eeuw in het veiligheidskundige domein is geïntroduceerd. Het is de start voor prospectief onderzoek in Groot Brittannië, Nederland en Italië. In de wetenschappelijke literatuur wordt begonnen met



Figuur 2 Het tankpark van de Feyzin raffinaderij (IChemE, 1987)

onderzoek naar escalerende factoren van deze ongevalsprocessen.

In 1966 is een grote brand ontstaan in de tankopslag van de Feyzin raffinaderij in Frankrijk, 10 km onder Lyon. Aan dit majeure ongeval wordt slechts spaarzaam gerefereerd in de literatuur. Een LPG emissie heeft een gaswolk gecreëerd, die tot ontbranding is gebracht door een passerende auto van de naastgelegen weg (Figuur 2).

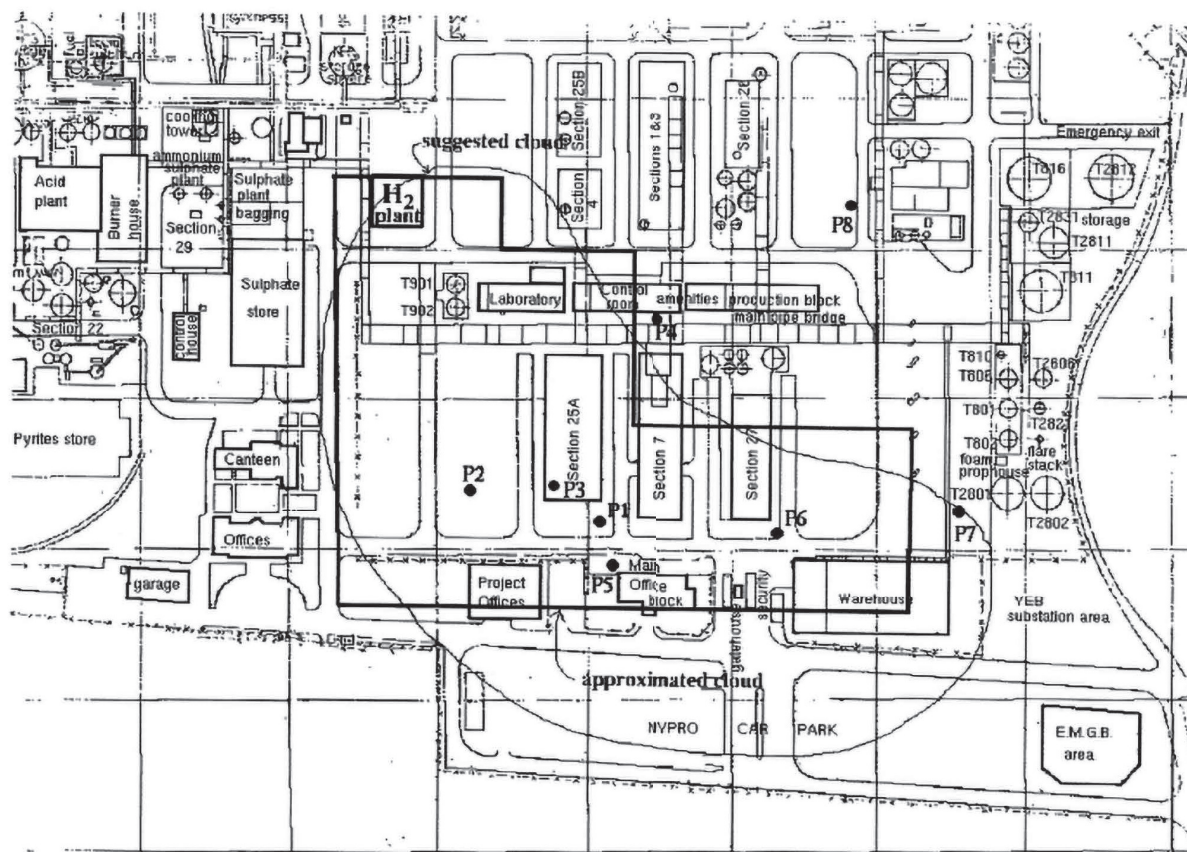
De ontstane brand start een domino-effect in de bolvormige opslagtanks. Dit leidt anderhalf uur later tot

een vuurbal, een BLEVE, een boiling liquid expanding vapour explosion, en rondvliegende fragmenten die meerdere BLEVE's veroorzaken. Het vuur verzwakt de poten van bolvormige opslagtanks en deze kantelen, maar exploderen niet. Een aantal petroleum en ruwe olietanks vatten vlam. Het water spray systeem is geactiveerd, maar heeft niet adequaat gefunctioneerd (Lees, 1980; IChemE, 1987; HSE 2010; Török e.a., 2011).

Het tweede majeure ongeval gebeurt één dag na afsluiting van het 1^e Internationale Loss Prevention Symposium in Delft-Den Haag (Buschmann, 1974). Een zware ontploffing treft de Flixborough Works van Nypro Limited in Noord Lincolnshire, UK. Een net aangebrachte bypass tussen twee reactoren scheurt open tijdens de opstart en een grote hoeveelheid cyclohexaan ontsnapt, die explodeert. Als secundair effect ontstaan branden op vele plaatsten in de fabriek en vervolgexplosies blazen een groot deel van de fabriek op (Figuur 3). Ook hier is sprake van een intern domino-effect (Parker, 1975, Lees, 1980; Høiset e.a., 2000; Venat, 2004).

Begin jaren zeventig doet het concept risico haar intrede in de veiligheidskunde. Het majeure ongeval in Flixborough heeft daar een grote rol bij gespeeld.

In Nederland is daarna begonnen met de publicaties van de zogenaamde 'gekleurde boeken', die een leidraad hebben gegeven voor de opzet van de kwantitatieve risico-analyse methode, de QRA (voor een overzicht zie



Figuur 3 Nypro Ltd in Flixborough De 'banaan' in de figuur geeft de omvang van de gaswolk weer (Lees, 1980; Høiset e.a., 2000)

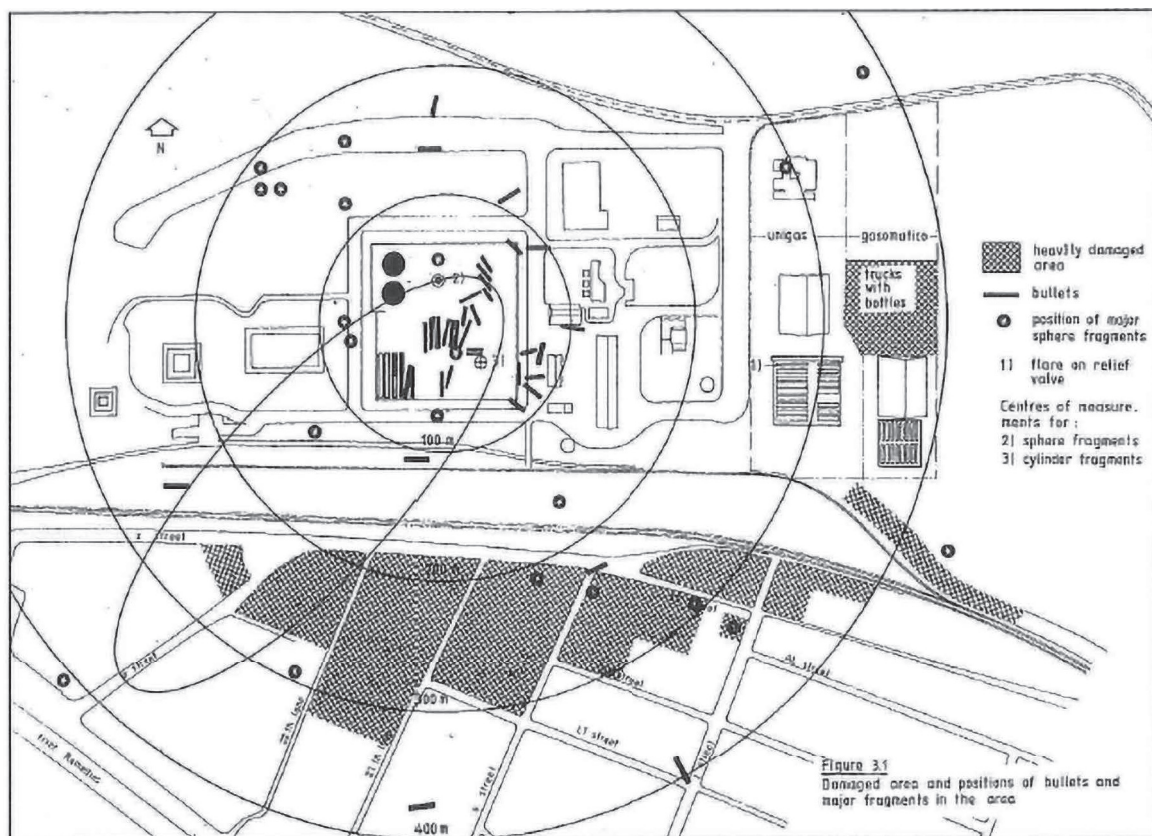
Oostendorp e.a., 2016). Een andere belangrijke publicatie is het WASH-1400 rapport, waar voor het eerst met de probabilistische risico-analyse methode (PRA) risico's van kerncentrales zijn berekend (Rasmussen, 1975). Deze kwantificering van risico's van chemische installaties is allereerst toegepast in Groot-Brittannië, bij het chemische industriepark aan de Noordzee monding van de Theems, Canvey Island. De aanleiding voor dit onderzoek is de mogelijke afwijzing van een vergunning voor de bouw van een tweede olieraffinaderij op de locatie. De studie van de Britse Health and Safety Executive heeft potentiële risico's berekend van de installaties, activiteiten en de mogelijke gevolgen voor omwonenden (HSE 1978, 1981; Lees, 1996). Op het industriepark zijn verschillende gevaarlijke bedrijven gevestigd, waaronder een LNG en een LPG terminal, opslag van petroleum producten, van toxische en vlambare vloeistoffen en van ammoniak, een olieraffinaderij, een ammonium nitraat fabriek en transport van gevaarlijke materialen over water, weg, spoor en pijpleiding. Voornamelijk gebaseerd op historische data zijn kansen berekend van emissies van vloeistoffen, gassen en explosies voor in- en externe domino-effecten voor een aantal scenario's:

- interacties binnen en tussen bedrijven/inrichtingen, de invloed van een LPG emissie op de olieopslag en de ammoniak bolopslag;
- een LNG brand die in een naastgelegen tank een scheuring veroorzaakt;

- opslagtanks of reactorvaten die getroffen worden door objecten, afkomstig van brand of explosies op de locatie of een naastliggende locatie, of door fragmenten van een roterende machine, of van een exploderend drukvat;
- een ontsparing van een tankwagon met effect op een nabijgelegen ammoniak opslagbol.

In navolging van het Britse Canvey onderzoek is in Nederland de zogenaamde COVO-studie opgezet. COVO staat voor Commissie Veiligheid Omwonenden Rijnmond (Cremer and Warner, 1982; Lees, 1996). Voor zes industriële installaties zijn de risico's berekend: de acrylonitril opslag van Pakhoed, de ammoniak opslag van UFK, de chloor opslag van Akzo, de LNG opslag van Oxirane en de hydrodesulfuriser van Shell. Domino-effecten zijn in deze COVO-studie niet meegenomen.

Een derde grote ramp van een intern domino-effect vindt tien jaar na Flixborough plaats op de Pemex LPG opslag van het staatsolie bedrijf Petroleo Mexicana in San Juan Ixhuatepec, een noordelijke wijk van Mexico City. Een LPG lekkage op het terrein leidt tot een vuurbal, BLEVE, waardoor LPG pijpleidingen zijn gescheurd. De vlammenzee die hierdoor ontstaat, heeft een aantal vervolgexplosies gegenereerd en LPG cilinders zijn als projectielen weggeschoten die deels in de naastgelegen woonwijk terecht zijn gekomen (Figuur 4) (Pietersen, 1988; Lees, 1996).



Figuur 4 PEMEX locatie Mexico City, locatie van fragmenten en zwaar gestoffen gebied (gearceerd). De initiële gaswolk is in de figuur getekend (Pietersen, 2009)

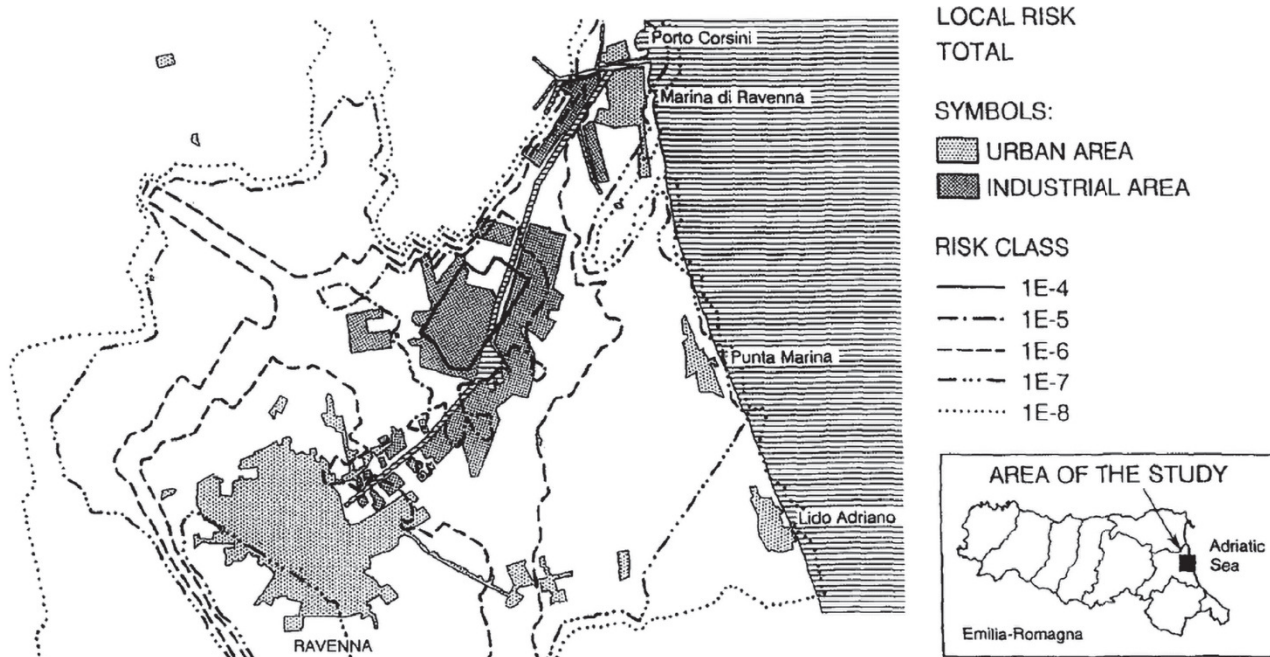
Een andere ramp, vier jaar later bij het platform Piper Alpha heeft nogmaals de aandacht gevestigd op domino-effecten en escalatie door brand en explosie op platformen en fabrieksterreinen. Dit heeft eind jaren tachtig van de vorige eeuw geleid tot de ontwerpstrategie 'Layers of Protection Analysis', kortweg LOPA. Dit concept is oorspronkelijk uit de militaire sector afkomstig en is in de jaren vijftig voor het eerst toegepast in de nucleaire sector (Swuste e.a., 2017). Eind jaren negentig zijn daar de 'Safety Integrity Levels (SILs) aan toegevoegd (Charlwood e.a., 2004).

In navolging van het Britse Canvey onderzoek en de Nederlandse COVO studie wordt in Italië het ARIPAR project gestart, de eerste grote risico studie in dit land. Risico's zijn berekend van een omvangrijk chemisch industrieel park in de nabijheid van Ravenna, inclusief de transportactiviteiten. In het park zijn sectoren actief uit de petrochemie, landbouwproducten, anorganische chemie, kolenoverslag, voedsel en opslag. Negen bedrijven zijn Seveso I plichtig en voor 38 andere bedrijven zijn 2000 mogelijke ongevalsscenario's ontwikkeld op basis van beoordelingen door experts en historische data.

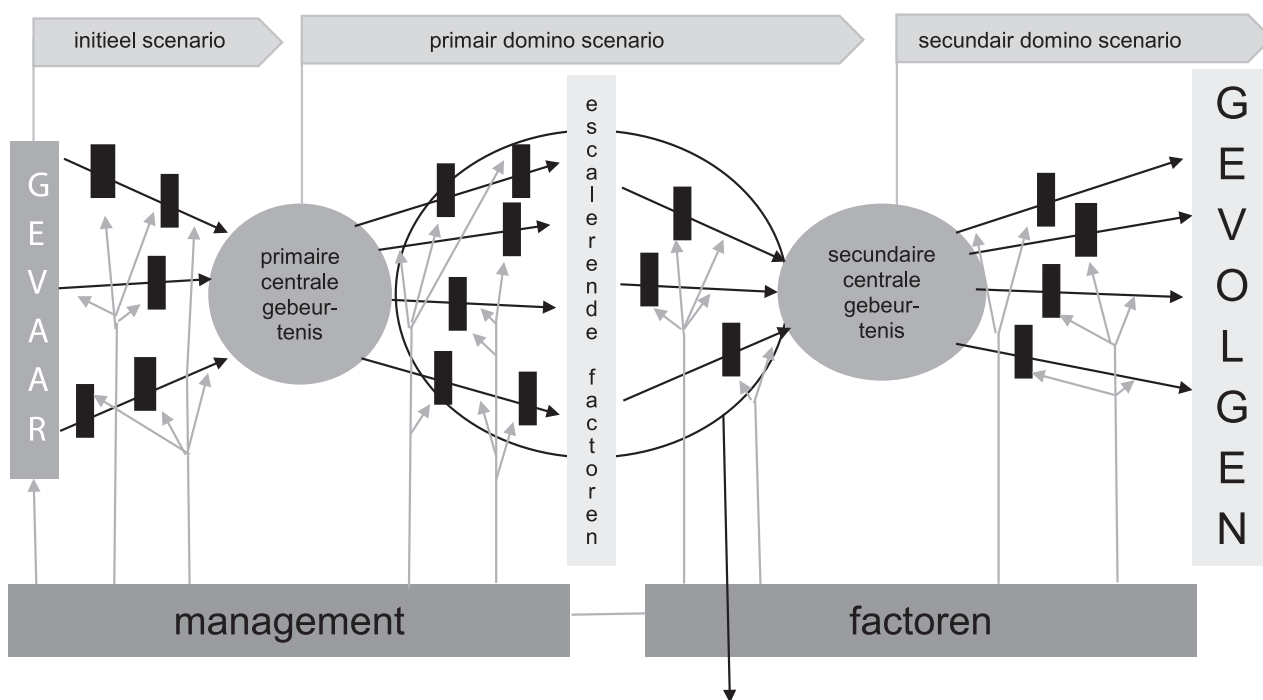
De scenario's hebben betrekking gehad op emissies van chloor, ammoniak, acrylonitril, anorganische zuren, LPG en hoog vlambare vloeistoffen. Uit de resultaten komt naar voren dat interne domino-effecten verwaarloosbaar zijn en dat de vaste installaties ver genoeg van de stad af liggen en daarom geen significante bijdrage leveren aan de risico's van Ravenna. De negen Seveso bedrijven hebben een significante bijdrage aan de risico-contouren (Figuur 5) en dat geldt ook voor het transport van gevaarlijke stoffen over de weg. Alleen die risicobijdrage is beperkt tot locaties waar de weg in de nabijheid ligt van bewoonde gebieden (Egidi e.a., 1995)

In deze periode zijn de belangrijkste determinanten van ongevalsprocessen van domino-effecten gepubliceerd, afkomstig uit casus beschrijvingen van majeure ongevallen. Een manier om deze ongevalsprocessen te visualiseren is een zogenaamde dubbele bowtie. (Figuur 6). Deze bowtie illustreert aan de linkerkant de start van een ongevalsproces, beginnend met een gevaar. Verschillende ongevalsscenario's zijn weergegeven als de pijlen van links naar rechts. Deze kunnen leiden tot het centrale punt van de domino bowtie; de primaire centrale gebeurtenis. Dit is een toestand waarbij het gevaar oncontroleerbaar is geworden en tot gevolgen kan leiden, schade aan materiaal of de omgeving en letsel en is de gele rechthoek in het midden van het figuur. Volgens de bovengenoemde definitie van Cozzani en co-auteurs vindt daarna de propagatie plaats. Escalerende factoren, fysische effecten, zorgen voor een vervolgtraject met de domino-scenario's en een secundaire centrale gebeurtenis en met gevolgen aan de rechterkant van de figuur, die groter zijn dan de gevolgen van het primaire ongevalsproces. In de figuur is het ongevalsproces weergegeven van een enkele domino. In principe kunnen primaire domino scenario's resulteren in meerdere secundaire centrale gebeurtenissen. De kracht van het bowtie model van het ongevalsproces zijn de beïnvloedende parameters. Deze parameters kunnen de primaire en secundaire centrale gebeurtenissen, de cirkels in de figuur, voorkomen of kunnen de gevolgen, de gele rechthoeken, beperken. Er kunnen twee soorten van beïnvloedende parameters geïdentificeerd worden. Enerzijds de veiligheidsbarrières die zijn weergegeven als de zwarte rechthoeken in de figuur.

Dit zijn fysische of technische aspecten die een ongevalsscenario kunnen onderbreken. Anderzijds zijn er management factoren. Dit zijn de liggende rechthoeken



Figuur 5 De overall risico-contouren uit het ARIPAR project (Egidi e.a., 1995)



primaire centrale gebeurtenis: inrichting/bedrijf 1
 secundaire centrale gebeurtenis: inrichting/bedrijf 2
 preventie domino's: barrières in beide inrichtingen/bedrijven

Figuur 6 Een enkele dominobowtie

onderaan de figuur. Deze management factoren hebben invloed via de verticale pijlen. Deze pijlen vertegenwoordigen de niet-fysische of organisatorische en menselijke aspecten en die de kwaliteit van de barrières bepalen, of direct een ongevalsscenario of gevaar kunnen beïnvloeden. Om domino-effecten te adequaat managen en te vermijden, moet zowel het primaire als het secundaire dominoproces met barrières beheerd worden.

Vanaf het begin is een risicobenadering en de daaraan gekoppelde risicoberekening dominant in publicaties over chemische fabrieken van één bedrijf en over chemische clusters, die in de literatuur ook worden aangeduid met chemische industriële parken. Dat komt deels door de toegenomen aandacht voor een risicobenadering vanaf de jaren zeventig en deels door de complexiteit van de ongevalsprocessen die kunnen gebeuren of zijn voorgekomen. Majeure ongevallen in deze industrieparken zijn dermate ingewikkeld (Necci e.a., 2015) dat een risicobenadering nog enige uitweg geeft.

In de wetenschappelijke pers wordt geconstateerd dat een QRA-analyse op zich geen rekening houdt met domino-effecten. Er wordt een start gemaakt om de centrale gebeurtenis van het primaire ongevalsproces en de gevolgen te omschrijven, inclusief de escalerende factoren. Het betreft een plasbrand (pool fire), een explosie, geprojecteerde fragmenten door een vuurbal, BLEVE, een straalvlam (jet fire) en een explosie na doorslag van materiaal. Naast geprojecteerde fragmenten is de escalerende factor bij branden de hittestraling

(Bagster en Ritblado, 1989, 1991). Deze auteurs hebben een programma ontwikkeld om de frequentie van de domino-effecten, veroorzaakt door deze primaire ongevalsprocessen, te berekenen.

In artikelen in de wetenschappelijke pers in deze periode wordt deels ingegaan op de onzekerheden die onlosmakelijk verbonden zijn aan kwantitatieve risicoanalyses. Het betreft de data waar de analyse op gebaseerd is; de mismatch tussen data via beoordeling door experts en historische data, de onzekerheden in toxiciteitgegevens van chemicaliën en de compleetheid van de analyse (Cremer en Warner, 1980; Paté-Cornell, 1987; Ronza e.a., 2003). In het proces van wet- en regelgeving kunnen de uitkomsten van een risico-analyse de communicatie over risico's ondersteunen en consensus onder besluitvormers stimuleren. Daar zit ook een keerzijde aan. Om risico's te kunnen interpreteren is vrij veel expertise nodig. Bij lokale overheden, die besluiten moeten nemen, is die expertise doorgaans niet aanwezig en vaak niet bij omwonenden van een chemisch industrieel park. Daar werkt de kwantificering van risico's als argument eerder averechts (Macgill en Snowball, 1983; Quarantelli, 1984; Swuste e.a., 2015).

De tweede periode rond Seveso II, 1996-2011

In de tweede periode worden vijf grote overzichten gegeven van retrospectief onderzoek naar majeure ongevallen in de procesindustrie en in havengebieden. Voor deze overzichten zijn een aantal databestanden gebruikt: de Major Hazard Incident Data Service (MHIDAS)

van de Britse Health and Safety Executive (HSE), het Major Accident Reporting System (MARS) van de Europese Unie, het Failure and Accident Technical Information System (FACTS) van de Nederlandse organisatie van Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek (TNO) en de Analyse, Recherche et Information sur les Accidents (ARIA) van het Franse Ministerie van Regionale Planning en Milieu. Deze artikelen geven een globaal beeld van ongevalsprocessen, waaronder ongevallen met enkel, of meervoudige, in- en externe domino-effecten. Omdat context informatie van de majeure ongevallen beperkt is in deze databestanden, zijn gevonden verschillen vaak niet of moeilijk te duiden. Naast dit onderzoek, waarbij de aantallen majeure ongevallen al snel in de honderden lopen, worden ook twee prospectieve case studies gepubliceerd, beide wederom afkomstig uit Italië met risico berekeningen van industriële parken. Verder zijn artikelen verschenen over scenario's, primaire en vervolg dominoscenario's escalerende factoren, barrières en maatregelen, methoden om domino-effecten te berekenen en hoe de veiligheid in industriële chemische parken gemanaged kunnen worden.

Het eerste onderzoek geeft een overzicht van 207 chemische majeure ongevallen tussen 1960 en 1998. Er worden karakteristieke patronen gevonden tussen de verschillende gevaren; brandbare vloeistoffen (olie, nafta, benzine, kerosine), gasvormige koolwaterstoffen en toxische stoffen (Cl_2 , NH_3 , pesticiden). De hoogste dominofrequentie wordt gevonden bij de gasvormige koolwaterstoffen en de laagste bij de toxische stoffen, hoewel het effectbereik bij toxische stoffen het grootst is (Kourniotis e.a., 2000). Het tweede onderzoek bespreekt 828 chemische incidenten in havens uit een niet nader aangegeven tijdsperiode. Hier wordt geconstateerd dat de Seveso II richtlijn niet van toepassing is op het transport van gevaarlijke stoffen. Branden komen niet vaak voor tijdens manoeuvreer, maar vaker op land, tijdens verwerking, opslag en transport. 5% van de onderzochte ongevallen zijn gaswolken ontstaan tijdens het laden en lossen van schepen en bij installaties op het land en beginnen met een zogenaamde 'loss of containment' (LOC) (Ronza e.a., 2003). Het derde onderzoek heeft 225 chemische ongevallen met domino-effecten onderzocht in de periode 1961-2007 met als escalatiefactoren de categorisering van de MHIDAS databestand: externe gebeurtenissen, mechanisch falen, menselijke fout, botsingen en heftige reacties zoals een runaway reactie. Hier zijn de eerste twee categorieën, externe gebeurtenis en mechanisch falen de belangrijkste factoren voor domino-effecten bij opslag, productieproces en transport. De ongevalsprocessen startend met een explosie, gevolgd door een brand en andersom, zijn veruit in de meerderheid (Darbra e.a., 2010). De laatste twee studies bespreken 224 domino-effecten tussen 1917 en 2009 (Abdolhamisadeh e.a., 2011), en 84 straalbranden (Gómez-Marís e.a., 2008). Een overweldigende meerderheid van 89% van deze effecten worden veroorzaakt door brandbare chemicaliën.

Maar ook niet brandbare stoffen, als Cl_2 , CO_2 en oververhit water leiden tot explosies, gevolgd door domino-effecten.

Vijftien jaar na het eerste ARIPAR onderzoek naar de risico's van het industriële park nabij Ravenna is een tweede prospectieve analyse gestart, gebaseerd op 300 scenario's uit de officiële veiligheidsrapportages van bedrijven van het park. De conclusies zijn niet anders dan de studie uit 1995 en wederom zijn een aantal hotspot locaties aangewezen, veroorzaakt door transport (Antonioni e.a., 2009). Een tweede prospectieve studie is eveneens in Italië uitgevoerd, in Sicilië bij het Augusta-Mellilli-Priolo industriële park nabij Siracusa, aan de oostkant van het eiland. Het artikel is vrij schaars in de vermelding van haar databronnen en resultaten, behalve dat methode van het ARIPAR project ook hier is toegepast (Bartolozzi e.a., 2010).

Er is in de wetenschappelijke pers vrij veel aandacht voor methoden om de kans op domino-effecten en haar gevolgen te berekenen. De QRA-analyse wordt aangevuld met een probit model voor verschillende escalatiefactoren en categorieën van schade aan procesapparatuur als gevolg van overdruk, of met informatie uit het 'gele boek', uit de Nederlandse serie van gekleurde boeken (CPR 14E, 1979). Ondanks de schaarste aan historische data zijn de gevolgen van een domino-effect met apparatuur specifieke probits te berekenen (Cozzani en Salzano, 2004a,b; Salzano en Cozzani, 2005; Antonioni e.a., 2009). Een explosie als primaire centrale gebeurtenis geeft een drukgolf als escalerende factor. Voor overdruk wordt een drempelwaarde van 7-70 kPa gehanteerd, afhankelijk van de consequenties, zoals het scheuren van een vat, het verplaatsten, etc. (Cozzani e.a. 2006; Necci e.a., 2015). Bij primaire centrale gebeurtenissen als een plas- of straalbrand is straling de escalerende factor. Bij een temperatuur boven de 700°K kan deze straling een stalen vat snel verzwakken (Gómez-Marís e.a., 2008).

Er wordt ook software ontwikkeld voor domino-effecten. DOMIEFFECT (Khan en Abbasi, 1998b) en DomPrevPlanning (Reniers en Dullaert, 2007, 2008) zijn daar een voorbeeld van. Met deze software wordt het relatieve belang van installaties bepaald wordt op grond van afstanden tussen installaties met (zeer) brandbare stoffen, de faalscenario's van installaties en de wijzigingen, zowel kwalitatief als kwantitatief, aan installaties over de laatste vijf jaren. Het 'paarse boek' en het hierboven genoemde Instrument Domino Effect van het RIVM zijn de bronnen voor de berekeningen. De beoordeling is relatief eenvoudig, geeft een eerst screening van dominogevaren en vereist, anders dan een QRA-analyse, een beperkte input aan data (CPR 18E, 1999; RIVM, 2003).

De nadruk van de Seveso II richtlijn op de identificatie en preventie van externe domino-effecten genereert een aantal artikelen over veiligheidsmanagement over individuele bedrijven heen. Dat levert problemen op, daar

bedrijven in industriële chemische parken niet op voorhand bereid zijn om informatie te delen met andere bedrijven. De horizontale samenwerking is niet vanzelfsprekend (EPCA, 2007b). In een industrieel park, al dan niet dominant chemisch, zijn de gezamenlijke verantwoordelijkheden voor veiligheid, milieu en gezondheid niet altijd duidelijk (Gaucher en Dolladille, 2010; Heikkilä e.a., 2010). 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. Dit is een orgaan bestaande uit vertegenwoordigers van de deelnemende bedrijven, aangevuld met onafhankelijke deelnemers die de vertrouwelijke informatie onder hun hoede nemen. Dit creëert een open, niet vertrouwelijk deel van de raad en een vertrouwelijk deel. In deze constellatie is een Cluster Safety Management System op te zetten met de standaard activiteiten van ieder management systeem, inclusief mogelijke externe domino-effecten, inclusief preventie (Reniers e.a., 2005b,c, 2009a). Besluitvorming, zeker in de context van een clusterraad kan ingewikkeld zijn, zeker als risicobeheersing over meerdere bedrijven geen duidelijk economisch voordeel geeft. Er verschijnen publicaties over een speltheoretische benadering voor deze strategische samenwerking en besluitvorming. Speltheorie is een mathematische discipline binnen de economische wetenschappen om strategische keuzes van, en financiële voordelen voor, betrokkenen te onderzoeken (Reniers e.a., 2009b; Reniers 2010b; Pavlova en Reniers, 2011),

De eerste artikelen over preventie van domino-effecten verschijnen in deze periode, over type barrières, afstanden en inherent veilig ontwerp. Barrières worden ingedeeld in passieve, actieve en procedurele barrières. Passieve barrières zijn fysisch van aard en hebben een directe invloed op scenario's. Een voorbeeld is een thermische isolatie van procesonderdelen. Deze maatregel wordt veelvuldig toegepast en kan kostbaar zijn. Actieve barrières beïnvloeden eveneens scenario's direct, maar vereisen, anders dan passieve barrières, een externe interventie om geactiveerd te worden. Een sprinklerinstallatie boven een opslag onder druk is daar een voorbeeld van. Deze barrière wordt minder betrouwbaar gevonden wegens faalkansen van de interventie. Buiten deze maatregelen zijn afstand en inherent veilig ontwerp zeer effectief om danwel de consequenties, danwel het ontstaan van primaire dominoscenario's te beheersen (Gleshill en Lines, 1998; CPR 18E, 1999). Met inherent veilig ontwerp (Kletz, 1984) wordt verwezen naar procesintensivering, met als steekwoorden: mindering, intensivering, substitutie en simplificatie. Deze ontwerpbenadering leidt tot minder gevaarlijke stoffen en dito condities (Hendershot, 1997; Cozzani e.a., 2007; zie voor een overzicht Swuste e.a., 2015). In figuur 6 is dit de verticale pijl die direct van de managementfactoren naar het gevaar leidt.

Voor veilige afstanden voor externe domino-effecten

heeft RIVM een eerdergenoemd instrument ontwikkeld, ter ondersteuning van inspectietaken van het bevoegd gezag. Het zogenaamde 'Instrument Domino-Effect' gaat uit van een aantal primaire dominoscenario's, van stof categorieën en van kwetsbaarheid van blootgestelde installaties om de gewenste veilige afstand te berekenen (RIVM, 2003). Veilige afstanden is ook een onderwerp bij een ruimtelijke clustering van transportlijnen van infrastructuur: wegen, spoor, waterwegen en pijpleidingen. In Nederland zijn corridors ontstaan van transportstromen door een verhoogde intensiteit van gebruik en ruimtegebrek. De afstanden tussen deze transportlijnen is op veel plaatsen minder dan 100 meter, terwijl 300 meter geadviseerd wordt. Deze clustering kan een verhoogde kans op ongevallen en domino-effecten impliceren. Echter de FACTS database ondersteunt op basis van historische gegevens deze aanname niet, wel zijn de gevolgen van deze ongevallen groter, in termen van schade en letsel (Rosmuller en Heijden, 2002).

In artikelen over de primaire dominoscenario's en escalerende factoren van domino-effecten komen dezelfde elementen terug als uit de eerste periode. Deze scenario's zijn de verschillende type branden, explosies en toxische emissies en straling, vuur, fragmenten en overdruk zijn de escalerende factoren (Cozzani e.a., 2006, 2007; Reniers en Dullaert, 2007).

De derde periode rond Seveso III, 2012-2018

In veel artikelen in deze en de vorige periode wordt, vanwege de consequenties, het majeure ongeval in Mexico City uit 1984 aangehaald in de introductie van artikelen. Het dodental bij dit ongeval is opgelopen tot meer dan 500. In mindere mate wordt gerefereerd aan de majeure ongevallen bij Flixborough uit 1974 en Buncefield uit 2005. Vergelijkbaar met de tweede periode worden in publicaties in deze periode de onderzoeklijnen van een kwantitatieve beoordeling van domino's en hun effecten voortgezet. Er wordt verslag gedaan van één retrospectief onderzoek. Pijpleidingen krijgen weer aandacht, evenals een dynamische modellering van domino-effecten en ontwikkelde software om het waarschijnlijkheid van het ongevalsproces en de effecten te berekenen. Seveso III heeft nog meer dan Seveso II de nadruk gelegd op het managen van deze ongevalsprocessen en dat is in het aantal artikelen over dit onderwerp terug te vinden.

In een overzichtsartikel wordt de balans opgemaakt van het onderzoek naar domino-effecten tot en met de tweede periode. Er worden problemen geconstateerd waar een kwantitatieve beoordeling van deze effecten door wordt gehinderd. Domino-effecten zijn zeer complex, dat geldt ook voor de modellen en de kansschattingen, de spreiding in de data en de onzekerheden van de analyses zijn nog steeds groot (Kardell en Löf, 2014). Er is nog te weinig ontwikkeling in geïntegreerde software, die geografische informatie kan meewegen en een beoordeling van de consequenties kan geven. Een tweede punt is de

Tabel 1 Escalatie factoren en verwachte secundaire scenario's (Salzano en Cozzani, 2012)

Primary scenario	Escalation vector	Expected secondary scenarios ¹
Pool fire	radiation, fire impingement	jet fire, pool fire, BLEVE, toxic release
Jet fire	radiation, fireimpingement	jet fire, pool fire, BLEVE, toxic release
Fireball	radiation, fireimpingement	tank fire
Flash fire	fire impin gement	tank fire
Mechanical explosion ²	fragments, overpressure	any
Confined explosion ²	overpressure	any
BLEVE ²	fragments, overpressure	any
VCE	overpressure, fire impingement	any
Toxic release	concent ration	none

¹ Verwachte scenario's zijn ook afhankelijk van het gevaar van de chemicaliën

² Het primair falend reactorvat kan leiden tot andere scenario's (bv. plasvuur, vuurbal, toxische emissie)

gebrekkige kennis over structurele schade die leidt tot falen van apparatuur en installaties, dit betreft de initiële scenario's die naar de primaire centrale gebeurtenis leiden (Figuur 4) en de primaire en secundaire dominoscenario's (Cozzani en Reniers, 2013).

De resultaten van het retrospectief onderzoek, een vorm van beschrijvende domino-epidemiologie, is een herhaling van de conclusies van onderzoek van Darbra en co-auteurs van vier jaar eerder (Hemmatian e.a., 2014; Darbra e.a., 2010). Het verschil is de beschouwde periode, die van 1961-2007 is uitgebreid tot en met 2011. Het onderzoek geeft een geografische vergelijking van EU landen, andere westerse landen en de rest van de wereld en daarmee wordt het belang van domino-effecten wederom aangegeven. In de rest van de wereld is een stijging in frequentie waarneembaar, terwijl de EU en andere Westerse landen een lichte daling laten zien.

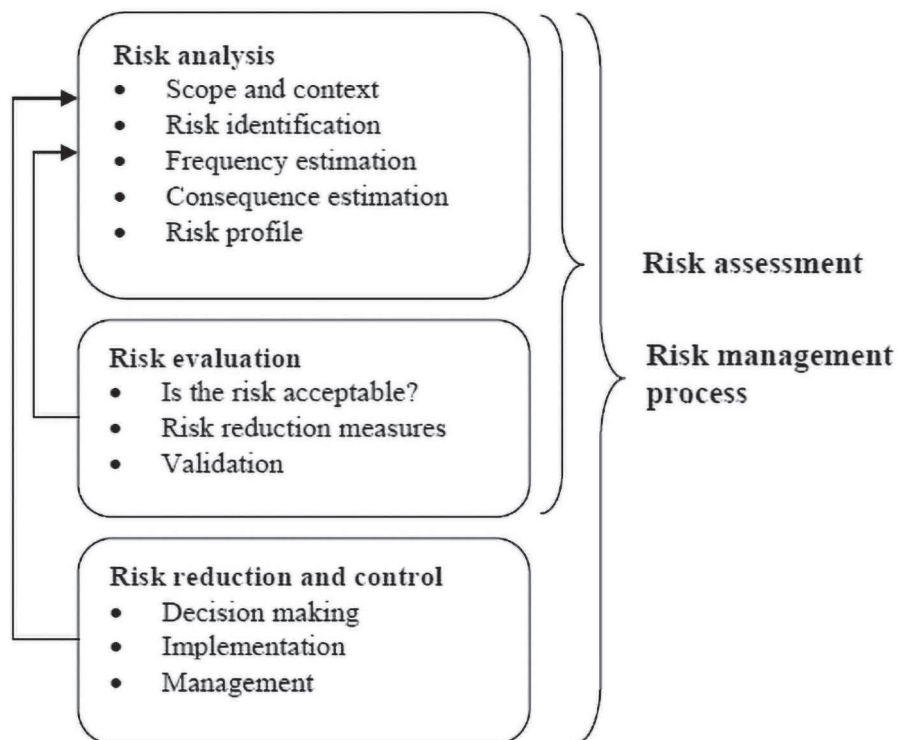
In een reviewachtig artikel geven Salzano en Cozzani een overzicht van de reeds bekende primaire en secundaire scenario's, inclusief de escalerende factoren (Tabel 1 en Figuur 4) (Salzano en Cozzani, 2012).

Toxische emissies als primaire scenario worden in dit overzicht niet verantwoordelijk gehouden voor een escalatie naar een secundair scenario, of schade aan secundaire installaties, alhoewel een toxische emissie in combinatie met een vuur, of hittestraling kan ontbranden (Necci e.a., 2015). Een ander punt zijn domino-effecten bij parallelle pijpleidingen. Die verlopen anders dan bij chemische bedrijven. Hier is corrosie een hele belangrijke factor en er kan een domino effect optreden als een naastgelegen pijpleiding in het gat of krater ligt dat door het primaire scenario is ontstaan. Naastliggende leidingen worden beschermd door de grond, waardoor een afstand van 10 meter tussen parallelle pijpleidingen voldoende blijkt te zijn (Ramirez e.a., 2015; Silva e.a., 2016).

Het modelleren van domino-effecten wordt op meerdere manieren uitgevoerd, zoals ook in de tweede periode.

Er zijn voorbeelden van QRA analyses aangevuld met probit functies (Kaldri e.a., 2013; Kardell en Lööf, 2014). Het eerder genoemde paarse boek is een belangrijke bron van faalfrequenties en effecten. Dat geldt eveneens voor een model voor domino-effecten van primaire emissies, gevolgd door overdruk en hittestraling. Het model is gebaseerd op een gebeurtenissenboom, waar de topografie van het industrieel gebied, de karakteristieken van kwetsbare installaties en de aanwezige barrières worden meegenomen in de kansberekeningen (Alileche e.a., 2017). Ander onderzoek gaat dieper in op escalerende scenario's bij gaswolk explosies. In veel chemische bedrijven is de aanname dat deze detonaties alleen voor kunnen komen bij emissies van zeer reactieve chemicaliën, zoals waterstof, of acetyleen. Nu blijkt dat veel meer brandbare chemicaliën kunnen detoneren onder de juiste omstandigheden, waarbij een aangestoken emissie kan accelereren naar een detonatie of sterke deflagraties. Onder wetenschappers is dit fenomeen reeds langere tijd bekend (Kolbe e.a., 2017). Een recente benadering van domino-effecten gaat uit van de dynamische omgeving waarbinnen deze effecten plaatsvinden. Hierbij wordt gebruikt gemaakt van een zogenaamde 'Domino Evolution Graph (DEG) model in combinatie met een 'Minimum Evolution Time (MET) algoritma (Chen e.a., 2018), of een flexibel model gebaseerd op een matrix (Zhou en Reniers, 2018a). De effecten zijn niet binomiaal of lineair te benaderen. Domino's zijn dynamische gebeurtenissen van onderlinge afhankelijkheden. Een Markov-keten benadering voorziet hierin en geeft een beter model van de tijd en de ruimte waarbinnen domino's zich ontwikkelen (Khazad e.a., 2017a).

In deze derde periode is er meer aandacht voor barrières, die initiële scenario's en primaire en secundaire domino-scenario's kunnen beïnvloeden of beheersen en voor het risicomanagement proces. (Figuur 7). De risico-analyse heeft al ruimschoots in de belangstelling gestaan van onderzoekers. Nu worden onderwerpen als risico-evaluatie en risico-reductie belangrijk. Risicomanagement in industriële chemische parken begint met informatie



Figuur 7 Het risicomanagement proces (uit Kardell en Lööf, 2014)

uitwisseling. In de tweede periode is reeds een oproep gedaan voor de opzet van een clusterraad. Die oproep wordt ook nu weer herhaald (Reniers en Amyotte, 2012). Dat geldt ook voor de speltheoretische benadering van besluitvorming (Reniers e.a., 2012). Belangrijke elementen van risicomanagement zijn maatregelen voor noodsituaties en efficiëntie van barrières om de verspreiding van domino-effecten te voorkomen of te vertragen. Dit is een nieuwe richting in onderzoek naar domino-effecten. Deze elementen worden voor vuur geïnitieerde domino's gemodelleerd en getest met Timed Colored Hybrid Petri-nets (TCHPN) (Zhou en Reniers, 2018b).

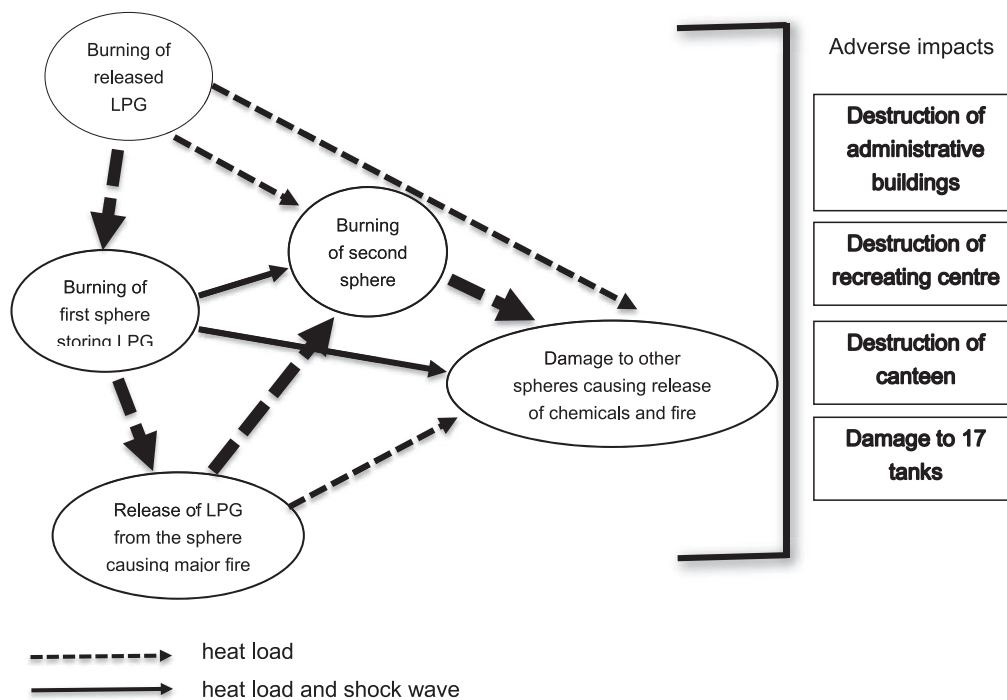
Ook worden Baysiaanse netwerken gebruikt voor een beslismodel met indexen voor potentiële domino installaties en apparatuur, inclusief een inherente veiligheidsbenadering (Khazad e.a., 2013-2015). Dit model ondersteunt beslissers waar barrières geplaatst moeten worden (Janssens e.a., 2015). Dan is een classificatie van maatregelen en barrières eveneens een belangrijk onderwerp. Daar wordt in lijn met de focus op kwantificering aandacht aan besteed. Het gaat dan om de aanwezigheid van barrières en de kans op falen als de barrière wordt aangesproken en zijn effectiviteit. De gehanteerde classificatie is dezelfde als in de tweede periode, het onderscheid tussen inherent veilig ontwerp, passieve, actieve barrières en procedurele barrières. Deze laatste groep wordt in lijn met het vlinderdasmodel uit figuur 6 de management factoren genoemd.

Actieve barrières zijn onderdeel van een groter systeem, waar faalkansen voor bekend zijn. Er moet een detectie

zijn van het gevaar, van vuur, gas, of rook. Vervolgens is er een melding, bijvoorbeeld een alarm in een controle, gevolgd door een activatie. Die activatie kan mechanisch zijn of instrumenteel. Tenslotte moet de barrière ook werken. Voorbeelden van actieve barrières zijn noodstoppen en blokkeersystemen die menselijk handelen vereisen, druk- en/of temperatuurverlaging, toevoer van inert gas, sprinklers, water deluge en schuim systemen. Voorbeelden van passieve barrières zijn het gebruik van vuurvast materiaal, of vuurbestendige muren of panelen. Deze onderwerpen zijn in een model kwantitatief beoordeeld en berekend voor een aantal scenario's waaronder extreme weercondities op olieplatformen (Landucci e.a., 2015-2017; Alileche e.a., 2017). De barrière veilig ontwerp komt doorgaans neer op de afstand tussen domino gevoelige apparatuur of installaties. Er is een artikel gepubliceerd om domino-effecten onderdeel te laten zijn van het ontwerp van een enkelvoudig bedrijf of inrichting, of van een chemisch cluster. Nu worden de resultaten van een kwantitatieve analyse gebruikt bij besluiten over uitbreiding van een chemische fabriek nabij woningbouw bij een uitbreiding van een woongebied in de buurt van chemische bedrijven. Domino-effecten worden dan vaak genegeerd. Met een Bayesiaans netwerk analyse waarbij de knooppunten bestaan uit de domino-gevoelige installaties of apparatuur kan ruimtelijke ordening een onderdeel worden van het initieel ontwerp van een chemische fabriek, of cluster (Kahzad en Reniers, 2015).

Centraal en Zuidoost Azië

Onderzoek naar domino-effecten in Centraal en Zuidoost Azië is van recentere datum. Het kantelpunt voor



Figuur 8 Het waarschijnlijke ongevalsproces bij de raffinaderij, Vishakhapatnam (Khan en Abbasi, 1998)
De dikte van de pijlen geven de intensiteit van de hittestraling aan

onderzoek in Westerse landen ligt in de jaren zeventig, bij het majeure ongeval in Flixborough. In India ligt dat kantelpunt op het gebied van domino-effecten meer dan twintig jaar later als gevolg van een majeur ongeval bij een raffinaderij vlak bij Vishakhapatnam. Buurland China heeft meer dan andere landen in de regio te maken met snel groeiende chemische en petrochemische sectoren, die in chemische clusters zijn georganiseerd voornamelijk in kustgebieden en nabij grote bevolkingscentra. Ondanks de vele majeure ongevallen in deze sectoren is uit de literatuur niet op te maken dat één van deze ongevallen een kantelpunt in onderzoek is geweest. In Centraal en Zuidoost Azië zijn niet alleen de risico-analisten actief in onderzoek naar chemische clusters, maar is er eveneens een milieuhygiënische traditie met onderzoek naar vervuiling van bodem, (grond)water en lucht.

In India vindt een majeur ongeval met interne domino-effecten plaats in 1997 bij de 40 jaar oude Hindustan Petroleum Corporation Limited (HPLC) raffinaderij nabij Vishakhapatnam, een miljoenenstad in de provincie Andrah Pradesh gelegen aan de Golf van Bengalen. Een lek in een pijpleiding naast een LPG opslagtank, veroorzaakt door corrosie, genereert een gaswolk. De gaswolk explodeert, er ontstaat een grote brand en 15 minuten later explodeert en naastgelegen opslagtank, daarna gevolgd door meerdere tanks (Figuur 8). De consequenties zijn enorm in termen van letsel, dodental en schade. In de analyse van het ongeval zijn meerdere onvolkomenheden geconstateerd. Er is sprake van paniek en management inertie, zoals uitgebleven acties op corrosierapportages van de onderhoudsdienst en eerdere grote emissies van brandbare stoffen, de getroffen gebouwen die op 30

meter van het tankpark zijn gesitueerd en de rapportage van het initiële lek een uur voorafgaande aan de explosie. Pas anderhalf uur na de eerste explosie wordt actie ondernomen. Het ongeval in de HPLC raffinaderij is de start geweest van de opzet van een Domino Effect Analyse (DEA) methode. Deze methode combineert drempelwaarden uit de literatuur voor de verschillende escalatiefactoren, overdruk, fragmenten en hittestraling met karakteristieken van kwetsbare installaties: gebruikte constructiematerialen, eigenschappen en hoeveelheden chemicaliën, afstanden tussen eenheden en de windrichting. Twee artikelen gaan uitgebreid in op het ongeval in Vishakhapatnam en andere industriële ongevallen in India en geven een lijst met internationaal geregistreerde majeure ongevallen, al dan niet met domino-effecten, vanaf 1947 tot 1997 (Khan en Abbasi, 1998, 1999). Vijf jaar voor het majeure ongeval bij de HPLC raffinaderij verschijnt er een eerste overzicht van een Indiaas risico analyse bureau over domino-effecten, risico-analyse modellen en barrières (Latha e.a., 1992).

Voor Chinese auteurs duurt het langer voordat hun publicaties in de internationale wetenschappelijke pers verschijnen. De aantallen zijn in dat land overweldigend, een snelle industrialisatie creëert veel majeure ongevallen (Huang e.a., 2011). Tussen 2000 en 2003 worden er jaarlijks 400-600 ongevallen met chemische stoffen geregistreerd, daarbij vallen ieder jaar tussen de 800 en 1100 doden. Welke bijdrage afkomstig is van industrieel chemische parken is niet te achterhalen. Na 2003 halveren die aantallen, of reduceren nog verder. Auteurs schrijven dit toe aan nieuw ingevoerde wetgeving en een andere organisatie van de Chinese Arbeidsinspectie, die vanaf

dat jaar direct aan de centrale State Council rapporteert (Duan e.a., 2011). Een aantal auteurs rapporteren over uitgevoerde risico analyses in industriële chemische parken in de nabijheid van Sjanghai, van Nanjing. Het zijn QRA analyses aangepast voor domino-effecten (Wang en Ma, 2009; Yu e.a., 2009; Sun e.a., 2010), of Monte Carlo simulaties voor meervoudige domino scenario's, veroorzaakt door tank fragmenten na een explosie (Sun e.a., 2016). Net als in Westerse landen is ook hier aandacht voor een risicomanagement benadering, die in grote lijnen teruggrijpt naar algemene managementprincipes (Zhou, 2013; Zhou en Zhang, 2017). Als laatste is een opmerkelijke publicatie uit Iran, in combinatie geschreven met Indiase auteurs. Een Monte Carlo Simulatie wordt gebruikt om frequenties van domino-effecten te schatten. Een algoritme wordt ingevoerd op een hypothetische combinatie van dominogevoelige installaties, in dit geval vier tanks met naphta, LPG en xyleen die op verschillende afstanden van elkaar staan. Gedurende vele simulaties met iedere keer andere startcondities, wordt het falen of niet-falen voor iedere installatie bepaald. Via deze route wordt een dominofrequentie vastgesteld. Het instrument is een simulatietechniek, dat als voordeel heeft dat systemen die mathematisch te complex zijn of waar teveel kennis ontbreekt over het gedrag van het systeem er uitspraken gedaan kunnen worden over, in dit geval, faalfrequenties (Abdolhamidzadeh e.a., 2010)

Discussie en conclusie

Dit overzicht bespreekt een periode van 1966-2018, meer dan vijftig jaar. In de wetenschap is dat nog betrekkelijk jong en dat laat zich zien in het ontbreken van een algemeen geaccepteerde definitie van domino-effecten. In de eerste periode zijn de rapportages van majeure en van potentiële ongevallen, uitgevoerd door overheden en onderzoeksinstellingen, dominant aanwezig. Refererend aan de dominobowtie (figuur 6) hebben deze verslagen al in de jaren zeventig inzicht gegeven in de gevaren, centrale gebeurtenissen, de primaire en secundaire, een globale beschrijving van de scenario's, de initiële, primaire en secundaire domino scenario's en in de gevolgen van deze scenario's. Er wordt in die tijd nog weinig gepubliceerd in de wetenschappelijke pers. Het risico concept in het veiligheidskundige domein is nog vrij vers en QRA is het opkomende analysemodel. Het is moeilijk om in dit model domino-effecten te verdisconteren, schadeberekeningen en invloed van barrières worden nog niet meegenomen. In de tweede periode komt de wetenschappelijke productie op gang, er komen overzichten van scenario's, escalatiefactoren, primaire en vervolg domino scenario's. Maar wederom worden invloeden van barrières niet in de modellen opgenomen.

In de tweede periode start de wetenschappelijke productie met overzichten van scenario's, escalerende factoren en primaire en secundaire centrale gebeurtenissen, inclusief berekeningen van hun waarschijnlijkheden. Informatie over de invloed van barrières zijn nog geen

onderdeel van de modellen. Terwijl de meeste artikelen risico analyses presenteren is er later in deze periode een transitie zichtbaar naar risico management, cluster veiligheidsmanagement besluitvorming en barrières. De fysieke barrières en maatregelen uit de literatuur hebben allemaal invloed op alle scenario's uit figuur 6. Mogelijke barrières en maatregelen zijn:

- noodstop (actief)
- blokkeersystemen (actief)
- druk- en/of temperatuurverlaging (actief)
- toevoer inert gas (actief)
- sprinklers (actief)
- water deluge en schuimsystemen (actief)
- vuurvast materiaal (passief)
- vuurbestendige muren of panelen (passief)
- afstand (passief)
- inherent veilig ontwerp (proces intensivering)

Voor een uitgebreide lijst van technische barrières, zie Faes en Reniers (2013). Managementfactoren, waar in de literatuur nog geen melding van gemaakt is, betreffen indicatoren en acties die de aanwezigheid en de kwaliteit van de barrières op pijl houden (Swuste e.a., 2015).

In de derde periode wordt veel aandacht besteed aan mathematische modellen. Maar er is ook kritiek op de gekwantificeerde benadering, die eveneens in de eerste periode is geuit. Het betreft de onzekerheden van de kansberekeningen en er wordt geopperd dat de berekende waarschijnlijkheden meer lijken te zeggen over de visie van de analist dan over de werkelijkheid, 'in the eye of the beholder' (Khakzad e.a., 2018b). Het onderzoek naar domino-effecten lijkt sterk gestuurd te zijn door de wet- en regelgeving, de Seveso richtlijnen, hoewel de bouwstenen van het ongevalsproces reeds voor Seveso I zijn ontwikkeld. De invloed van de Seveso richtlijnen is opmerkelijk, daar wetenschap doorgaans een eigen dynamiek heeft. In een toegepast vakgebied als veiligheidskunde is dat mogelijk wat minder het geval. Maar er kan worden geconstateerd dat het onderzoek naar dit onderwerp dicht op politieke, ambtelijke en private besluitvormers heeft gezeten.

De hoeksteen voor de besluitvorming zijn de resultaten van de gekwantificeerde modellen, die niet meer alleen via een QRA aanpak tot resultaten leiden. Er ontstaan indexen, er worden Monte Carlo simulaties uitgevoerd en analyses met Bayesiaanse netwerken en invloeden van barrières worden opgenomen in de modellen. Er is een verschuiving opgetreden. De bal ligt nu niet alleen maar bij bedrijven. Anders dan in de eerste periode, toen veiligheid vooral een onderwerp van bedrijven is geweest, wordt de aandacht nu maatschappelijk gestuurd. Burgers zijn bezorgd en een doorzichtige en begrijpelijke risicomanagementproces is een serieus onderwerp voor bedrijven geworden (Raaijen, 2018). Dat blijkt eveneens uit een recent Brits voorstel (COMAH, 2018). Dat discussies over gevaren en risico's tussen bedrijven, wetenschapper en burgers niet altijd

soepel verloopt, laat een Noors artikel zien (Lindøe en Kringen 2015). Op twee locaties nabij Stavanger en Oslo ontstaat een conflict over de risicobeoordeling tussen burgers, bedrijven en overheid. De omgevingsrisico's van een LNG opslag worden verwaarloosbaar gevonden en een stadsuitbreiding nabij een petrochemisch cluster wordt gepland zonder raadpleging van omwonenden. De resultaten van de risico-analyse zijn moeilijk communiceerbaar met het publiek en een belanghebbend bedrijf doneert een grote som geld aan de universiteit. Een hoogleraar die de resultaten van de analyse heeft becommentarieerd wordt eerst ontslagen en later op een lagere positie weer in dienst genomen.

Een transitie die nog moet plaatsvinden is een beter begrip van primaire scenario's. Domino-effecten beginnen allemaal met een of meer gevaren en primaire scenario's die leiden naar een primaire centrale gebeurtenis. Het gebrek aan kennis over deze gebeurtenissen creëert nogal wat onzekerheid in probabilistische berekeningen van escalatiefactoren. Dit deel vereist veel meer aandacht dan het ontvangt. Databases van ongevallen in het verleden zijn geen betrouwbare bron vanwege het ontbreken van contextinformatie. Hoogstwaarschijnlijk zijn deze scenario's en centrale gebeurtenissen bedrijfsspecifiek. Onderzoek naar dit onderwerp vereist een grondig onderzoek naar mogelijke scenario's uit de literatuur en besprekingen met fabrieksbeheerders en operationele medewerkers. De aanpak is niet probabilistisch, maar deterministisch, en biedt gedetailleerde informatie over bestaande belemmeringen en mechanische en instrumentele waarschuwingssystemen. Voor managers en operationeel personeel is probabilistische informatie moeilijk te begrijpen. Ze hebben instrumenten nodig om de voortgang van rampscenario's op te sporen en beheertools om de kwaliteit van barrières te waarborgen. Een dergelijke benadering is onlangs ontwikkeld, zowel in het arbeids- als in het procesveiligheidsdomein, en genereert scenario-specifieke indicatoren (Nunen e.a., 2018, 2019; Schmitz e.a., 2019; Swuste e.a., 2019).

In Centraal en Zuidoost Azië is een vergelijkbaar majeur ongeval opgetreden als in Feyzin, alleen dertig jaar later. Dit heeft onderzoek naar domino-effecten gestimuleerd. Of dit heeft geleid tot een verbeterde beheersing van deze effecten is niet uit de literatuur op te maken. In China lijken de aantallen een rol spelen. Er is een vrij constante productie van artikelen over domino's uit dit land.

Referenties

Abdolhamidzadeh B Abbasi T Rashtchian D Abbasi S (2010). A new method for assessing domino effect in chemical process industry. *Journal of Hazardous Materials* 182:416-426

Abdolhamidzadeh B Abbasi T Rashtchian D Abbasi S (2011). Domino effect in process-industry accidents - An inventory of past events and identification of some patterns. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 24:575-593

Alileche N Olivier D Estel L Cozzani V (2017). Analysis of domino effect in the process industry using the event tree method. *Safety Science* 97:10-19

Antonioni G Spadoni G Cozzani V (2009). Application of domino effect quantitative risk assessment to an extended industrial area. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 2: 614-624

Bagster D Ritblado R (1989). Thermal hazards in the process industry. *Chemical Engineering progress* 85:69-75

Bagster D Ritblado R (1991). The estimation of domino incident frequencies. *Process Safety and Environmental Protection* 69:195-199

Bartolozzi V Bajardi S Vasile F Marino S (2010). Safety Integrated Area Analysis - a Recent Case. *Study Chemical Engineering Transactions* 19:457-462

Buschmann C (ed.) (1974). Loss prevention and safety promotion in the process industry. *Proceedings of the 1st International Loss Prevention Symposium*, The Hague 28-30 May

CCPS (2000). Centre for Chemical Process Safety. *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*, second ed., AIChE, New York

Chen C Reniers G Zhang L (2018). An innovative methodology for quickly modelling the spatial-temporal evolution of domino accidents triggered by fire. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 54:312-324

Charlwood M Turner S Worsell N (2004). A methodology for the assignment of safety integrity levels (SILs) to safety-related control functions implemented by safety-related electrical, electronic and programmable electronic control systems of machines. *Health and Safety Executive*, Norwich

Covert K Groothuizen Th Pasman H Trense R (1974). Explosions of unconfined vapour clouds. In Buschmann C (ed.) (1974). *Loss prevention and safety promotion in the process industry. Proceedings of the 1st International Loss Prevention Symposium*, The Hague 28-30 May, p. 145-157

COMAH (2018). How to work together Collaboration in the high hazard sector. A guide to join industry, regulators and union groups that work in the high hazard process sectors. *COMAH Strategic Forum*, version 1.0 12th February

Council Directive 82/501/EEC of June 24 1982 on the major accident hazards of certain industrial activities (Seveso I). *Official Journal of the European Communities*, L230/25, Brussels, 5.8.82

Council Directive 96/82/EC (Seveso II) of 9 December 1996, January 14, 1997. On the control of major-accident hazards involving dangerous substances. *Official Journal of the European Communities*, 0013e0033, L 10/13, Brussels

Council Directive 2012/18/EU (Seveso III) of 4 July 2012, July 24, 2012. On the control of major-accident hazards involving dangerous substances. *Official Journal of the Euran Communities*. L 197/1, Brussels

Cozzani V Gubinelli G Salzano E (2006). Escalation thresholds in the assessment of domino accidental events. *Journal of Hazardous Materials A* 129:1-21

Cozzani V Reniers G (2013). Historical background and state of the art on domino effect assessment. In: Reniers en Cozzani (Eds). *Domino effects in the process industries. Modelling, prevention and managing*. Elsevier, Amsterdam

Cozzani V Salzano E (2004a). A quantitative assessment of domino effects caused by overpressure Part I probit models. *Journal of Hazardous Materials A* 107:67-80

Cozzani V Salzano E (2004b). A quantitative assessment of domino effects caused by overpressure Part II case studies. *Journal of Hazardous Materials A* 107:81-94

Cozzani V Tugnoli A Salzano E (2007). Prevention of domino effects: From active and passive strategies to inherent safer design. *Journal of Hazardous Materials A* 139:209-219

- Cozzani V Tugnoli A Salzano E (2009). The development of an inherent safety approach to the prevention of domino accidents. *Accident Analysis and Prevention* 41:1216–1227
- Cremer & Warner (1980). An analysis of the Canvey report. Oyez Intelligence Reports, London
- Cremer and Warner (1982). Risk Analysis of Six Potentially Hazardous Industrial Objects in the Rijnmond Area, Londen (the so-called COVO-study)
- CPR 14E (1979). Commission for Prevention of Disasters. Methods for the Calculation of Physical Effects of the Release of Dangerous Materials (Liquids and Gases). Yellow Book. Directorate General of Labour, The Hague, the Netherlands
- CPR 18E (1999). Commission for Prevention of Disasters. Guidelines for quantitative risk assessment. National Institute of Public Health and the Environment (RIVM), Ministry of Transport, Public Works and Water Management, Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment, The Hague, The Netherlands
- Darbra R Palacios A Casal J (2010). Domino effects in chemical accidents: main features and accident sequences. *Journal of Hazardous Materials* 183:565-573
- Duan W Chen G Ye Q Chen Q (2011). The situation of hazardous chemical accidents in China 2000-2006. *Journal of Hazardous Materials* 186:1489-1494
- Egidi D Foraboschi F Spadoni G Amendola A (1995). The ARIPAR project: analysis of the major accident risks connected with industrial and transportation activities in the Ravenna area. *Reliable Engineering and System Safety* 49:75-89
- EPCA (2007a). The European Petrochemical association. A Paradigm Shift: supply chain collaboration and competition in and between Europe's chemical clusters, Brussels
- EPCA (2007b). European Petrochemical Association. The Role of Clusters in the chemical industry. 41st Annual meeting, Brussels
- Faes R Reniers G (2013). Managing domino effects in a chemical industrial area. In: Reniers G Cozzani (2013) (Eds). *Domino effects in the process industries, modelling, prevention and managing*. Elsevier, Amsterdam
- Gaucher R Dolladille O (2010). Conventions on multi-operator sites: An effective risk management tool. *Process Safety Progress* 29(1):32-38
- Gledhill J Lines I (1998) Development of methods to assess significance of domino effects from major hazard sites. Contract Research Report 183/1998. Health and Safety Executive, Her majesty's Stationary Office, Norwich
- Gómez-Mares M Záratev L Casal J (2008). Jet fires and the domino effect. *Fire Safety Journal* 43(8):583–588
- Grim W (1974). Case studies of fires in refineries and petrochemical plants. In Buschmann C (ed.) (1974). *Loss prevention and safety promotion in the process industry*. Proceedings of the 1st International Loss Prevention Symposium, The Hague 28-30 May, p. 355-361
- Heikkilä A Malmen Y Nissila M Kortelainen H (2010). Challenges in risk management in multi-company industrial parks. *Safety Science* 48:430-435
- Hemmatian B Abdolhamidzadeh B Darbra R Casal J (2014). The significance of domino effect in chemical accidents. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 29:30-38
- Hendershot D (1997). Inherently safer chemical process design. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 10(3):151-157
- Høiset S Hjertager B Solberg T Malo K (2000). Flixborough revisited – an explosion simulation approach. *Journal of Hazardous Materials A77(1-3):1-9*
- HSE (1978). Health and Safety Executive. Canvey: An investigation of potential hazards from operations in the Canvey Island/Thurrock Area. Her Majesty's Stationary Office, London
- HSE (1981). Health and Safety Executive. Canvey: A second report. A review of the potential hazards from operations in the Canvey Island/Thurrock Area three years after publication of the Canvey report. Her Majesty's Stationary Office, London
- HSE (2010). Refinery fire at Feyzin. 4th of January 1966. <http://www.hse.gov.uk/comah/sragtech/casefeyzin66.htm> geraadpleegd 19 maart 2018
- Huang L Wan W Li F Li B Yang J Bi J (2011). A two-scale system to identify environmental risk of chemical industry clusters. *Journal of Hazardous Materials* 186:247-255
- ICChemE (1987). The Feyzin Disaster. *Loss Prevention Bulletin* 077, October p 1-4
- Janssens J Talarico L Reniers G Sorensen K (2015). A decision model to allocate protective safety barriers and mitigate domino effects. *Reliability Engineering and System Safety* 143:44-52
- Kadri F Chatelet E Lallement P (2013). The assessment of Risk Caused by Fire and Explosion in Chemical Process Industry: A domino effect-based study. *Journal of Risk Analysis and Crisis Response* 3(2):66-76
- Kardell L Löf M (2014). QRA with respect to domino effects and property damage. Report 5461, Lund University, Sweden
- Khakzad N (2015). Application of dynamic Bayesian network to risk analysis of domino effects in chemical infrastructures. *Reliability Engineering & System Safety* 138:263-272.
- Khakzad N Amyotte P Cozzani V Reniers G Pasman H (2018b). How to address model uncertainty in the escalating of domino effects. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* doi 10.1016/j.jlp.2018.03.001
- Khakzad N Khan F Amyotte P Cozzani V (2013). Domino effect analysis using Bayesian networks. *Risk Analysis* 33(2):292-306
- Khakzad N Khan F Amyotte P Cozzani V (2014). Risk management of domino effects considering dynamic consequence analysis. *Risk Analysis* 34(6):1128-1138
- Khakzad N Naderpour M Reniers G (2017b). A Markov chain approach to domino effects in chemical plants. *Journal of Safety Health and Environmental Research* 13(2):360-369
- Khakzad N Landucci G Cozzani V Reniers G Pasman H (2018a). Cost-effective fire protection of chemical plants against domino effects. *Reliability Engineering & System Safety* 169:412-421
- Khakzad N Naderpour M Reniers G (2017a). A Markov chain approach to domino effects in chemical plants. *Journal of Safety Health and Environmental Research* 13(2):360-369
- Khakzad N Reniers G (2015). Risk based design of process plants with regard to domino effects and land planning use. *Journal of Hazardous Materials* 299:289-297
- Khan F Abbasi S (1998a). Models for domino effect analysis in chemical process industries. *Process Safety Progress* 17(2):107-123
- Khan F Abbasi S (1999b). The world's worst industrial accident of the 1990s. *Process Safety Progress* 18(2):135-145
- Kletz T (1984). Cheaper, Safer Plants, or Health and Safety at Work. The Institution of Chemical Engineers. Rugby, UK
- Kolbe M Simoes V Salzano E (2017). Including detonations in industrial safety and risk assessments. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 49:171-176
- Kourniotis S Kiranoudis C Markatos N (2000). Statistical analysis of domino chemical accidents. *Journal of Hazardous Materials* 71:239–252
- Landucci G Argenti F Tugnoli A Cozzani V (2015). Quantitative assessment of safety barrier performance in the prevention of domino scenarios triggered by fire. *Reliability Engineering and System Safety* 143:30-43
- Landucci G Argenti F Spadoni G Cozzani V (2016). Domino effect frequency assessment: The role of safety barriers. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 44:706-717
- Landucci G Bonvicini S Cozzani V (2017). A methodology for the analysis of domino and cascading events in oil & gas facilities operating in harsh environments. *Safety Science* 95:182-197

- Latha P Gautam G Raghavan K (1992). Strategies for quantifying of thermally initiated cascade effects. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 5(1):18-27
- Lees F (1980). *Loss Prevention in the Process Industries*, Butterworth-& Co, London, UK
- Lees F (1996). *Loss Prevention in the Process Industries*, second ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, UK
- 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
- Lindøe H Kringen J (2015). Risk governance of hazardous industrial ports and areas: a case study of industrial areas and harbors in Norway. *Journal of Risk Research* 18(7):931-946
- Macgill S Snowball (1983). What use risk assessment? *Applied Geography* 3(3):171-192
- Necci A Cozzani V Spadoni G Khan F (2015). Assessment of domino effect State of the art and research needs. *Reliability Engineering and System Safety* 143:3-18
- Nunen K van Swuste P Reniers G et al. (2018). Improving Pallet Mover Safety in the Manufacturing Industry: A Bow-Tie Analysis of Accident Scenarios. *Materials* 11(1955):1-19
- Nunen K van Swuste P Reniers G Schmitz P. (2019). Developing leading safety indicators for occupational safety based on the bow-tie method. *Chemical Engineering Transactions* (submitted)
- Oostendorp Zwaard W Gulijk C van Lemkowitz S Swuste P (2013). Introductie begrip risico binnen de veiligheidskunde in Nederland. *Tijdschrift voor toegepaste Arbowetenschap* 26(3-4):75-91
- Parker R (1975). *The Flixborough Disaster - Report of the Court of Inquiry*. Department of Employment. Her Majesty's Stationary Office, London
- Pasman H (1999). *Risicobeheersing. Chemical risk management. Naar processen en producten veilig voor mens en milieu*. Intreerede, TU Delft
- Pasman H Snijder G (1974). Schadepreventie en veiligheidsbevordering in de procesindustrie. *De Veiligheid* 50(5):211-212
- Pate-Cornell E (1987). Probabilistic risk analysis and safety regulation in chemical industry. *Journal of Hazardous Materials* 15:97-122
- Pavlova Y Reniers G (2011). A sequential-move game for enhancing safety and security cooperation within chemical clusters. *Journal of Hazardous Materials* 186:40-406
- Pietersen C (1988). Analysis of the LPG disaster in Mexico City. *Journal of Hazardous Materials* 20:85-107
- Pietersen C (2009). 25 jaar later. De twee grootste industriële rampen met gevaarlijke stoffen LPG ramp Mexico City, Bhopal tragedie. Gelling Publishing, Nieuwekerk aan de IJssel, the Netherlands
- Quarantelli E (1984). Chemical disaster preparedness at the local community level. *Journal of Hazardous Materials* 8:239-249
- Raaijen W (2018). Industriële veiligheid staat voor een fundamentele verandering, interview Genserik. *Petrochem* 2, 20 februari
- Ramirez J Pastor E Casal J Amaya R (2015). Analysis of domino effect in pipelines. *Journal of Hazardous Materials* 298:210-220
- Rasmussen N e.a., (1975). Reactor safety study. An assessment of accident risks in U.S. commercial nuclear power plants. Executive summary. WASH-1400 (NUREG-75014). USA Nuclear Regulatory Commission, Rockville, MD
- Reniers G (2009). How to increase multi-plant collaboration within a chemical cluster and its impact on external domino effect cooperation initiatives. *Safety and Security Engineering III*:379-388
- Reniers G (2010a) *Multi-plant safety & security management in the chemical process industries* Wiley-Vch, Weinheim
- Reniers G (2010b). An external domino effects investment approach to improve cross-plant safety within chemical clusters. *Journal of Hazardous Materials* 177:167-174
- Reniers G Ale B Dullaert W Soudan K (2009a). Designing continuous safety improvement within chemical industrial areas. *Safety Science* 47:578-590
- Reniers G Amyotte P (2012). Prevention in the chemical and process industries: Future directions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 25:227-231
- Reniers G Cuypers S Pavlova Y (2012). A game-theory based multi-plant collaboration model for cross plant prevention in a chemical cluster. *Journal of Hazardous Materials* 209-210:164-176
- Reniers G Dullaert W Ale B Soudan K (2005a). The use of current risk analysis tools evaluated towards preventing external domino effects. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 18:119-126
- Reniers G Dullaert W Ale B Soudan K (2005b). Developing an external domino accident prevention framework: Hazwim. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 18:127-138
- Reniers G Dullaert W Soudan K (2005c). Preventing external domino accidents: a framework for enhancing cooperation in Chemical Process Industry (CPI). *Safety and Security Engineering* 721-735
- Reniers G Dullaert W (2007). DomPrevPlanning: user-friendly software for planning domino effects prevention. *Safety Science* 45:1060-1081
- Reniers G Dullaert W (2008). Knock-on accident prevention in a chemical cluster. *Expert System with Applications* 34:42-49
- Reniers G Dullaert W Karel S (2009b). Domino effects within a chemical clusters: a game-theoretical modelling approach by using Nash-equilibrium. *Journal of Hazardous Materials* 167:289-293
- RIVM (2003) *Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu. Instrument Domino-Effect*. RIVM, Bilthoven
- RIVM (2016). *Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu. Nationaal Veiligheidsprofiel 2016. Een all hazard overzicht van potentiële rampen en bedreigingen die onze samenleving kunnen ontwrichten*. Analistennetwerk Nationale Veiligheid, RIVM Bilthoven
- Ronza A Félez S Darbra R Carol S Vilchez J Casal J (2003). Predicting the frequency of accidents in ports areas by developing event trees from historical analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 16:551-560
- Rosmuller N Heijden R van der (2002). The impact of spatial clustering of transport infrastructure on risk. *Environment and Planning* 34:2193-2210
- Silva E Nele M Melo F Konozy L (2016). Underground parallel pipelines domino effect. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 43:315-331
- Salzano E Cozzani V (2005). The analysis of domino accidents triggered by vapor cloud explosions. *Reliability Engineering and System Safety* 90:271-284
- Salzano E Cozzani V (2012). Introduction external hazard factors in QRA *Revista de Ingeniería*. Universidad de los Andes. Bogotá D.C. p. 50-56
- Schmitz P Swuste P Reniers G Nunen K van (2019). Mechanical integrity of process installations: an assessment based on bow-ties. *Chemical Engineering Transactions* (submitted)
- Spoelstra M Mahesh S Kooi E Heezen P (2015). Domino effects at LPG and propane storage sites in the Netherlands. *Reliability Engineering and System Safety* 143:85-90
- Sun Y Qian Y Zhang Y (2010). Risk analysis for vulnerabilities near chemical sites. *IEEE Conferences* 1-6
- Sun D Jing J Zhang M Wang Z Zhang Y Cai L (2016). Investigating multiple domino scenarios by fragments. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 40:591-602

- Swuste P Groeneweg J Gulijk C van Zwaard W Lemkowitz S (2015). Van Three Mile Island tot Piper Alpha, veiligheidsmanagement en veiligheidssystemen, een overzicht van Engels- en Nederlandstalige literatuur, Deel 2, de periode 1979-1988. Tijdschrift voor toegepaste Arbowedenschap 28(4):130-157
- Swuste P Gulijk C van Zwaard W Lemkowitz S Oostendorp Y Groeneweg J (2014). Veiligheidsmanagement en -systemen vanaf 1900 tot heden. Een overzicht van Engels- en Nederlandstalige literatuur. Deel 1: 19e eeuw tot 1979. Tijdschrift voor toegepaste Arbowedenschap 27(3):84-105
- Swuste P Gulijk C van Groeneweg J Zwaard W Lemkowitz S (2017). Risico- en veiligheidsmanagement in high-tech-high-hazard sectoren, Van Clapham Junction tot Macondo, Deepwater Horizon. een overzicht van Engels- en Nederlandstalige literatuur. Deel 4, veiligheid van de industriële high-tech-high-hazard sectoren. de periode 1988-2010. Tijdschrift voor toegepaste Arbowedenschap 30(3):78-120
- Swuste P Nunen K van Schmitz P Reniers G (2019). Process safety indicators, how solid is the concept? Chemical Engineering Transactions (submitted)
- Swuste P Teunissen J Reniers G Blokland P (2015). Procesveiligheidsindicatoren, een overzicht van de literatuur. Tijdschrift voor toegepaste Arbowedenschap 28(3):82-98
- TNO (1983). LPG A Study. Comparative analysis of the risks inherent in the storage, transshipment, transport and use of LPG and motor spirit. General Report, TNO, Apeldoorn
- Török Z Ajtai N nTurcu A Ozunu A (2011). Comparative consequence analysis of the BLEVE phenomena in the context on Land Use Planning; Case study: The Feyzin accident. Process Safety and Environmental Protection 89:1-7
- Venart J (2004). Flixborough The explosion and its aftermath. Process safety and Environmental Protection 82(B2):105-127
- Vörös M Honti G (1974). Explosions of a liquid CO₂ vessel in a carbon dioxide plant. In Buschmann C (ed.) (1974). Loss prevention and safety promotion in the process industry. Proceedings of the 1st International Loss Prevention Symposium, The Hague 28-30 May, p. 337-346
- Yu Q Zhang Y Wang X Ma W Chen L (2009). Safety distance assessment of industrial toxic release based on frequency and consequences: a case study in Shanghai, China. Journal of Hazardous Materials 168:955-961
- Wang J Hung C Hung C Chang G (2009). Polychlorinated dibenzo-p-dioxin and dibenzofuran emissions from an industrial park clustered with metallurgical industries. Journal of Hazardous Materials 161:800-807
- Yu Q Zhang Y Wang X Ma W Chen L (2009). Safety distance assessment of industrial toxic release based on frequency and consequences: a case study in Shanghai, China. Journal of Hazardous Materials 168:955-961
- Zhou D (2013). Study on risk management of the chemical industry park. Proceedings 2011 International Conference on Business Management and Electronic Information, 13-15 May Guangzhou, Vol 4 p. 92-95
- Zhou D Zhang M (2017). The integrated safety assessment on chemical industry parks. Proceedings of the 9th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics p. 105-107
- Zhou J Reniers G (2018a). A matrix-based modelling for fire induced domino effects. Process Safety and Environmental Protection 116:347-353
- Zhou J Reniers G (2018b). Petri-net evaluation of emergency response domino triggered by fire. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 51:94-101