

Van Three Mile Island tot Piper Alpha

veiligheidsmanagement en veiligheidssystemen, een overzicht van Engels- en Nederlandstalige literatuur, Deel 2, de periode 1979-1988

Swuste, Paul; Groeneweg, J; van Gulijk, C; Zwaard, W; Lemkowitz, Saul

Publication date

2015

Document Version

Final published version

Published in

Tijdschrift voor Toegepaste Arbowetenschap

Citation (APA)

Swuste, P., Groeneweg, J., van Gulijk, C., 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 Arbowetenschap*, 28(4), 130-157.

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

Van Three Mile Island tot Piper Alpha

veiligheidsmanagement en veiligheidssystemen, een overzicht van Engels- en Nederlandstalige literatuur, Deel 2, de periode 1979-1988

Paul Swuste¹, Jop Groeneweg², Coen van Gulijk³, Walter Zwaard⁴, Saul Lemkowitz⁵

Inhoud

Samenvatting
Summary
Introductie
Methoden en technieken
Three Mile Island
Algemene managementbenadering
 Total Quality Management
Arbeidsveiligheid, veiligheidstheorieën en –modellen
 Arbeidsveiligheid, status van het onderzoek
 Arbeidsveiligheid, theorieën, modellen en metaforen
Procesveiligheid, veiligheidstheorieën en –modellen
 Technische procesveiligheid
 Mens-machine interacties in complexe technologische systemen
Veiligheidsmanagement, -systemen
Piper Alpha
Ontwikkeling in Nederland
 Casus Shell
Discussie en conclusies
Referenties

Samenvatting

Vraagstelling: Wat is de invloed geweest van algemene managementstromingen en onderzoek naar oorzaken van ongevallen en rampen op het managen van veiligheid, in de periode tussen Three Mile Island en Piper Alpha? Binnen welke context heeft deze ontwikkeling plaatsgevonden en wat is de invloed geweest op het veiligheidskundige vakgebied in Nederland?

Methode: het literatuuronderzoek heeft zich beperkt tot oorspronkelijke Engelstalige en Nederlandstalige artikelen en documenten uit wetenschappelijke literatuur en de vakpers van 1979 tot 1988.

Resultaten en conclusies: In de vakliteratuur over arbeidsveiligheid zijn modellen en theorieën van menselijke fouten populair. In het wetenschappelijke domein van veiligheidskunde werd een systeembenadering geïntroduceerd, eerst bij procesveiligheid en later bij arbeidsveiligheid. Productieprocessen en hun sturing werden beschouwd als socio-technische systemen en arbeidsongevallen werden gezien als verstoringen in een georganiseerd dynamisch systeem. Menselijke fouten waren dan geen oorzaken meer, maar consequenties van

Abstract

Objective: Which general management trends influenced safety management and which safety models, theories and management solutions were introduced to explain and control causes of accidents and disasters in the period between Three Mile Island and Piper Alpha? In which context these developments took place and how did this context influence the safety domain in the Netherlands?

Method: The literature study was limited to original English and Dutch documents and articles in scientific and professional literature from 1979 till 1988.

Results and conclusions: Models and theories of human errors explaining occupational accidents were still popular in the professional literature. A system approach was introduced into mainstream safety science, starting in process safety, and subsequently drifting into occupational safety. Accidents were thought to be the result of disturbances in a dynamic system, a socio-technical system, rather than just human error. Human errors were also perceived differently, they were no longer just faults of people, but consequences of suboptimal interactions during process disturbances.

¹ Sectie Veiligheidskunde, Technische Universiteit Delft, e: p.h.j.swuste@tudelft.nl

² Universiteit Leiden en TNO

³ University of Huddersfield, West Yorkshire

⁴ Opleider en adviseur, Delft

⁵ Product & Proces Engineering, Technische Universiteit Delft

interacties tijdens processtorings. Deze periode liet een sterke toename zien van de kwaliteit van veiligheidskundig onderzoek, ook in Nederland.

De groei van de veiligheidskundige aan kennis van procesveiligheid werd gestuurd door grote ongevallen en rampen uit de jaren tachtig en was omvangrijker dan de kennisontwikkeling van het arbeidsveiligheidsdomein. De theorieën en modellen waren in deze periode volwassen genoeg om rampen uit het verleden te verklaren, maar te onvolwassen om kansen en scenario's op toekomstige grote ongevallen te voorspellen. In de jaren tachtig werden de termen 'latente fouten' en in Nederland de term 'onmogelijke ongevallen' geïntroduceerd. De organisatie kwam als black box in beeld. De menselijke fout werd ingebed in een organisatorische context.

Deze periode kende een versterking van het veiligheidskundige onderzoek, waardoor de kwaliteit zowel in Nederland als in het internationale domein verbeterde. Veiligheidsmanagement werd beïnvloed door ontwikkelingen binnen het kwaliteitsmanagement. Veiligheidsmanagement werd beïnvloed door ontwikkelingen binnen het kwaliteitsmanagement.

Introductie

Dit artikel is onderdeel van een reeks artikelen in dit tijdschrift over de kennisontwikkeling binnen het veiligheidskundige domein. De reeks is gestart met overzichten van theorieën, modellen en metaforen vanaf de 19^e eeuw tot 1990 (Gulijk e.a., 2009; Oostendorp e.a., 2013; Swuste e.a., 2009, 2011). In 2014 is begonnen met het eerste deel geschiedschrijving van veiligheidsmanagement en -systemen (Swuste e.a., 2014). In de beginperiode van het vakgebied was er nauwelijks sprake van managen van veiligheid. Dat komt pas op in de jaren 30 en is gericht op arbeidsveiligheid. De focus ligt dan op de 'unsafe acts' van werknemers en selectie en training zijn de belangrijkste instrumenten van managers om de veiligheid van een proces te borgen. Het eerste deel van de serie beschrijft de periode vanaf de Safety First Movement tot Three Mile Island, met opkomende high-hazard industrieën en aandacht voor procesveiligheid. De rampen uit die tijd hebben een directe invloed gehad op de theorievorming en de modellen en metaforen. Dit tweede deel behandelt de volgende tien jaar, de periode vanaf Three Mile Island (1979) tot Piper Alpha (1988). Soms gaat de tekst kort in op periodes voor en na 1977-1988 wanneer relevant verslag van gebeurtenissen buiten de afgebakende periode vallen.

Auteurs gaan ervan uit dat de kennisontwikkeling binnen het veiligheidskundige domein en de algemene ideeën over het managen van bedrijven en organisaties een invloed hebben en hebben gehad op veiligheidsmanagement. De tekst verwijst met een zekere regelmaat naar voorafgaande periodes, daarmee doelend op eerdergenoemde publicaties. Voor dit artikel zijn onderstaande vragen leidend geweest:

In this period, process safety took a major leap forward after major disasters took place in that domain. Process safety outplaced the developments in occupational safety, which has been leading before. Theories and models in this period had advanced that disasters that had occurred could be explained, but were still unable to predict probabilities and scenarios of future disasters. In the 1980's 'latent errors' appeared in the international safety literature, and in The Netherlands the concept of 'impossible accident' appeared.

This period saw a reinforcement of safety research that increased the quality of safety research in The Netherlands, as well as the international domain. In addition safety management was strongly influenced by developments in quality management.

1. Welke algemene managementstromingen en welke theorieën en modellen voor ongevalsoorzaken zijn ontwikkeld?
2. Welke invloed hebben deze ontwikkelingen gehad op het managen van veiligheid in bedrijven?
3. Binnen welke context heeft deze ontwikkeling plaatsgevonden?
4. Welke consequenties heeft de ontwikkeling gehad voor het veiligheidskundige vakgebied in Nederland?

Methoden en technieken

Een uitgebreid literatuuronderzoek is de basis geweest voor de beantwoording van de onderzoeksvragen. Het onderzoek is beperkt tot de Engelstalige en Nederlandstalige literatuur, waardoor de ontwikkeling van het veiligheidskundige vakgebied in de Verenigde Staten, Groot-Brittannië en Nederland de nadruk heeft gekregen dan andere landen. Oorspronkelijke referenties en bronnen zijn via internet of via de bibliotheek van de Technische Universiteit Delft achterhaald. De volgende tijdschriften zijn voor de gehele periode geraadpleegd: Accident Analysis and Prevention, Journal of Hazardous Materials, Journal of Loss Prevention, Journal of Occupational Accidents, Journal of Safety Research en Safety Science. Referenties uit artikelen zijn nagetrokken uit de volgende tijdschriften: Academy of Management Journal, Administrative Science Quarterly, American Sociological Review, Ergonomics, California Management Review, Hazard Prevention, IEEE Transactions on reliability, IEEE Transactions on Systems, Man, & Cybernetics, International Journal of Man-Machine Studies, Journal of Applied Behaviour Analysis, Journal of Business & Psychology, Journal of Management, Journal of Manage-

ment Studies, Naval War College Review, Organization Science, Policy Sciences, Plant/Operation Progress, Public Health Reports, Reliability Engineering & System Safety, Risk Analysis, Social Science Information Studies en The Academy of Management Review. Het tijdschrift 'Reliability Engineering & System Safety' is in de bovenstaande bibliotheek slechts vanaf volume 20 (1988) beschikbaar. Ondanks het feit dat dit tijdschrift op het gebied van procesveiligheid toonaangevend is, zijn eerdere jaargangen niet geraadpleegd. Voor de consequenties voor het Nederlandse vakgebied zijn de betreffende jaargangen van de tijdschriften De Veiligheid, Maandblad voor Arbeidsomstandigheden en Risicobulletin geraadpleegd. Dit artikel omvat de periode vanaf de storing in de kernreactor Three Mile Island in 1979 tot en met de ramp in 1988 bij het olieplatform Piper Alpha. In de jaren tachtig kreeg een reeks grote ongevallen uit de proces- en nucleaire industrie, de chemicaliënopslag, de ruimte- en zeevaart en het railvervoer veel media-aandacht. Achteraf gezien blijkt dat veiligheidsmanagement, met de eerste aanzet van voor de Tweede Wereldoorlog, pas na Piper Alpha serieus werd genomen. Eind jaren tachtig werden de ISO-9000 normen gepubliceerd, gericht op en gebruikt als model voor kwaliteitsmanagement. Deze normen werden als model gebruikt voor veiligheidsmanagement. De twee ernstige ongevallen uit de titel van het artikel worden op twee plaatsten besproken. Na deze paragraaf wordt gestart met een kort overzicht van oorzaken van de bijna-ramp in de kerncentrale 'Three Mile Island'. In de twee na laatste paragraaf komen oorzaken van de 'Piper Alpha' ramp aan bod. De tussenliggende en navolgende hoofdstukken beschrijven vijf onderwerpen uit de periode 1979-1988:

- de algemene managementbenaderingen, met de nadruk op 'Total Quality Management';
- arbeidsveiligheid, de status en de kwaliteit van het onderzoek in dit domein en de kennisontwikkeling,



Figuur 1 Controlekamer TMI-2 tijdens de afhandeling van de storing (Kemeny, 1979)

waaronder de verschillende modellen over ongevalscausaliteit te weten de menselijke fout, sequentie, energie, informatie, systeem, klimaat, ongevalsepidemiologie en als laatste het OARU model, gebaseerd op processtorings. De periode heeft één ongevalstheorie opgeleverd, de risico-homeostase theorie;

- procesveiligheid, de kennisontwikkeling in de domeinen 'loss prevention' en 'reliability engineering' en de veranderende rol van de menselijke factor;
- veiligheidsmanagement en -systemen, de kennisontwikkeling, auditsystemen, high reliability en een typering van reacties van bedrijven op veiligheidsproblemen;
- het laatste hoofdstuk geeft inzicht in de ontwikkeling in Nederland, de mate waarin internationale kennis een rol heeft gespeeld. De kennisontwikkeling in ons land wordt mede in de paragraaf 'casus Shell' besproken.

In dit artikel ligt de nadruk op de analyse van de kennisontwikkeling. Dit impliceert dat ontwikkelingen in veiligheidswetgeving slechts sporadisch aan bod zullen komen. Voor de veiligheidskundige praktijk is wetgeving voor veel bedrijven leidend, vooral als het gaat om de introductie van veiligheidsmanagement(systemen). Ook voor kennisontwikkeling heeft wetgeving een stimulerende rol, daar wetgeving vaak nieuw onderzoek initieert. Echter, de basis voor wetgeving is mede bepaald door reeds ontwikkelde kennis.

Three mile island

Op 28 maart 1979 ontstond door een storing in het secundaire koelsysteem een verhoogd risico op een zogenoemde 'melt-down' in de kerncentrale van Three Mile Island, nabij Harrisburg, in de Amerikaanse staat Pennsylvania. Bij deze bijna-ramp werden radioactieve gassen in de atmosfeer geloosd. In de rapportages van de Presidentiële Commissie over de oorzaken van de storing werd het ongeval geweten aan technische storings door menselijke fouten. Ook werd nadrukkelijk gewezen op de problemen met het veiligheidsmanagementsysteem (Kemeny, 1979; Lees, 1980). Het rapport wees op de gebrekkige training van de operators, de verwarrende en tegenstrijdige procedures en de focus van het management op slechts een beperkt aantal majeure rampscenari's. De storing in een waterpomp, leidend tot een verhoogde druk in het primaire koelcircuit, was de start van het ongevalsproces en het veiligheidsventiel van het koelsysteem, de zogeheten PROV - pilot operated relief valve, was ongemerkt open blijven staan. Dit scenario was als rampscenario niet onderkend. Ook was er een duidelijk 'mens-machine interface'-probleem. Het controlepaneel (figuur 1) van de reactor was omvangrijk en onoverzichtelijk, waardoor operators in de controlekamer niet in staat bleken een adequate diagnose van de storing te stellen en daardoor een hele serie van fouten maakten.

In de eerst minuten van de storing gingen meer dan 100

audio-alarmen af, zonder dat het duidelijk was welke daarvan serieus genomen moesten worden. De aansturing door het topmanagement werd gehinderd door de verregaande bureaucratisering en gespreide locaties van de organisatie. Het topmanagement, de reactor en de verschillende diensten waren honderden kilometers van elkaar verwijderd. Veiligheid werd mede daardoor een papieren exercitie. Tien jaar later vernietigden een aantal explosies het boorplatform Piper Alpha. In de rapportage van het onderzoek naar oorzaken van deze ramp kwamen gelijksoortige managementoorzaken naar voren (Cullen, 1990). De processen waren te complex geworden en het veiligheidsmanagement was te gefragmenteerd en inconsistent georganiseerd. Voordat ingegaan wordt op de kennisontwikkeling binnen de domeinen arbeidsveiligheid en procesveiligheid volgt nu eerst een kort overzicht van de algemene managementbenaderingen

Algemene managementbenadering

De algemene managementbenadering in de jaren tachtig was een voortzetting van het 'moderne management' van na de Tweede Wereldoorlog, een Amerikaanse benadering die in het eerste deel van deze serie besproken is. Het moderne management werd gekarakteriseerd als een zogenaamde opensysteembenadering, met een focus op de omgeving waarbinnen een bedrijf of organisatie opereert met aandacht voor in- en externe belangengroepen. In deze periode was eveneens de kwaliteit van product en proces een dominant thema. Deming (1982) richtte zich in zijn oorspronkelijke werk op het verwante terrein van de kwaliteitszorg. Samen met Juran (Juran 1951, Juran en Barish, 1955) hebben ze vlak na de Tweede Wereldoorlog in Japan een omslag teweeggebracht in de kwaliteitsbewaking van productie en producten, gebaseerd op het gezamenlijk werk van Walter Shewhart van Bell Telephone Laboratories New York en Deming. Ze ontwikkelden een statistische benadering voor procescontrole, de zogenaamde SPC - Statistical Process Control (Shewhart en Deming, 1939; Greisler, 1999). Met SPC is de variabiliteit in kwaliteit en in het aantal productielijnen te begrijpen en te reduceren. Variaties van fysische processen volgen zelden een normale verdeling. Grofweg zijn er twee oorzaken voor aan te wijzen: variaties die het gevolg zijn van natuurlijke schommelingen, inherent aan het proces, en schommelingen die een proces buiten haar tolerantiegrens kan brengen. Voorbeelden van natuurlijke schommelingen zijn variaties in temperatuur, in eigenschappen van grondstoffen etc. Deze variaties komen frequent voor. De grote schommelingen zijn minder frequent en geven doorgaans grotere afwijkingen. Een verkeerde instelling van startparameters van een proces, of een uitzonderlijke kwaliteit van grondstoffen zijn daar voorbeelden van. Als men controles tijdens het proces uitvoert, kunnen storingen en afwijkingen achterhaald worden en is de kwaliteitscontrole niet beperkt tot een achteraf-controle van het gereede product. Hoewel SPC vooral is toegepast binnen de productindustrie, is de benadering bruikbaar voor ieder proces met een kwantificeerbare opbrengst.

Total Quality Management

Deming vertrok in 1947 naar Japan. In die periode was Japan bezet door Amerikaanse troepen. Vanuit Amerika werd ondersteuning gegeven aan de Japanse industrie om te voorkomen dat het economisch verzwakte land een makkelijke prooi zou zijn voor het opkomende communisme, een argument dat eveneens een rol heeft gespeeld bij de Marshallhulp (Leitner, 1999; Judt, 2012). Deming had een eenvoudige boodschap voor Japanse ondernemers: het management was het grootste probleem bij de matige kwaliteit van Japanse producten. Zijn boodschappen waren simpel en duidelijk: 'Als de focus van een bedrijf op de kwaliteit ligt, dan gaan de kosten op den duur omlaag', 'ligt de focus op de kosten, dan zakt de kwaliteit'. Daarmee is Deming een van de grondleggers van Total Quality Management (TQM), een managementbeweging die in Japan begon en pas in de jaren tachtig overwaarde naar het Westen (Pindur e.a., 1995; Nye, 2013). TQM is naast kwaliteitscontrole gebaseerd op een permanente analyse van de behoefte van klanten en via kwaliteitskringen op een uitgebreide werknemersparticipatie in besluitvormingsprocessen in het bedrijf. Het management moet werknemers ondersteunen om hun taak slimmer uit te voeren en de productie moet zo 'lean' mogelijk worden met zo min mogelijk buffers en voorraden. In deze visie wordt kwaliteitscontrole ingebouwd in het arbeidsproces en in de werker-management-relatie. Alle hiërarchische lagen worden onderworpen aan een statistisch proces van controletechnieken (Vinzant en Vinzant, 1999). In de loop van de jaren tachtig zijn een aantal spraakmakende boeken verschenen, die in lijn lagen met de TQM-benadering. Moss Kanter (1984) met 'The change masters', Peters en Waterman (1982) met 'In search of excellence' en Morgan (1986) met 'Images of organisations' zijn daar voorbeelden van. Het volgende hoofdstuk behandelt het tweede onderwerp van dit artikel, de ontwikkelingen binnen de arbeidsveiligheid.

Arbeidsveiligheid

Arbeidsveiligheid, status van het onderzoek

Deze periode laat een toename zien van veiligheidskundige publicaties in wetenschappelijke tijdschriften, afkomstig uit onderzoekscentra in Scandinavië (Stockholm, Tampere, Trondheim), het Verenigd Koninkrijk (Loughborough, Manchester, Surrey, Imperial College-London, Birmingham-Aston), de Verenigde Staten (Boston, Chicago, Morgantown, Texas Tech en San Diego), Nederland (Leiden, Delft), Duitsland (Wuppertal, Köln) en Frankrijk (Parijs).

Geheel volgens haar traditie waren in de Verenigde Staten de kosten van veiligheid (Miller e.a., 1987) en praktische veiligheidsmaatregelen een terugkerend onderwerp. Maatregelen ter beveiliging van trappen in fabrieken (Templer e.a., 1985), of van industriële persen (Cohen e.a., 1986) zijn daar voorbeelden van. Ook verschenen er uitgebreide handboeken voor de maakindustrie, zoals het Accident Prevention Manual van de National Safety

Council (McElroy, 1980), of de laatste editie van het handboek van Heinrich (Heinrich e.a., 1980).

Met de toegenomen aandacht voor onderzoek werden veiligheid en bedrijfsongevallen even serieus genomen als beroepsziekten (Haddon, 1980). Vergelijkbaar met het begin van de jaren zestig verschenen gaandeweg de jaren tachtig in de literatuur ook meer artikelen over de kwaliteit van veiligheidskundig onderzoek. De kennisontwikkeling evolueerde langzaam in een domein met een dominante ingenieursbenadering (Fellner en Sulzer, 1984). Er werd echter beperkte voortgang gemaakt met de classificatie van ongevalstypen, met relevante ongevalsparameters (Singleton, 1984) en bij het onderwerp preventie was er sprake van veel goede wil en weinig theorievorming (Kjellén en Larsson, 1981; Saari, 1982). Dat gold overigens ook voor veiligheidstraining, één van de maatregelen die vaak als oplossing wordt gemeld. Training was weinig effectief doordat deze nauwelijks was toegespitst op de taak die uitgevoerd moest worden (Cohen en Jensen, 1984). De relatie tussen de resultaten van ongevalsanalyses en preventie was eveneens betrekkelijk vaag. Voor preventie werden vaak de tien strategieën van Haddon (1973) als leidraad genomen (Compes, 1982). Deze strategieën waren niet gestoeld op onderzoek, maar waren eerder algemene vuistregels, die bovendien voor complexe installaties en processen niet meer opgingen (Barnett, en Brickman, 1986). In deze periode kwam de aanpak van veiligheidskundig onderzoek, naar effecten van interventies, ter discussie te staan. In preventieonderzoeken zijn dit doorgaans de verzuimongevallen die in voor-na-vergelijking werden gebruikt. Dat leverde drie typen problemen op. Allereerst zijn deze vergelijkingen gevoelig voor regressie naar het gemiddelde, waardoor verschillen ten onrechte werden toegeschreven aan effecten van interventies of maatregelen (Hauer, 1980, 1983). Ten tweede zijn verzuimongevallen een weinig betrouwbare maat, immers gevoelig voor registratiebias (Menkel en Carter, 1985; Purswell en Rumar, 1984). En het is een effectmaat. Om de invloed van interventies te meten is een blootstellingsmaat een betere indicator. Dit begrip blootstelling was binnen de veiligheidskunde maar heel beperkt ontwikkeld en kwam vaak niet veel

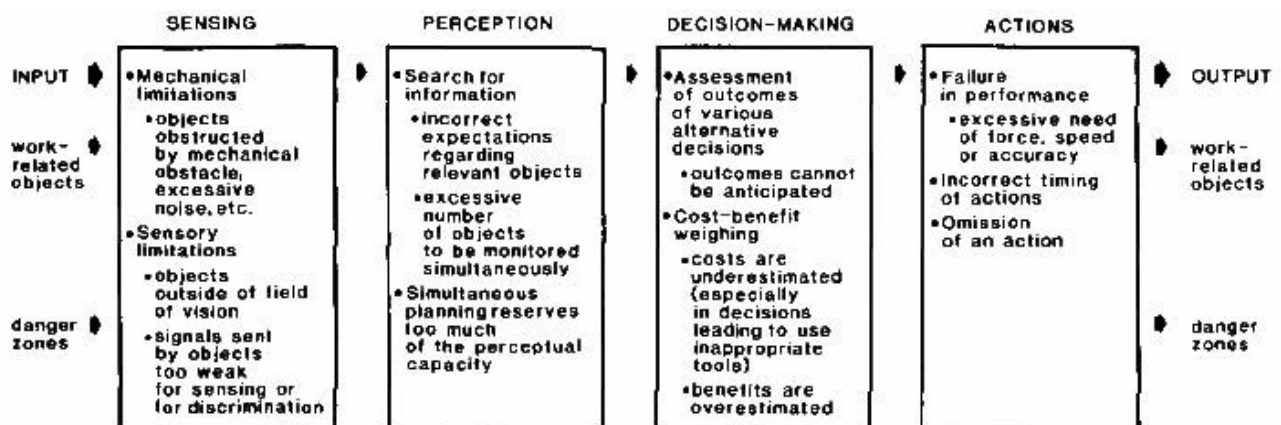
verder dan een lijst met vooraf bepaalde veilige praktijken en condities die al dan niet gevolgd werden (Saari, 1984; Hubbard en Niel, 1985). Deze onderwerpen konden gescoord worden in bedrijven en op werkplekken en gaven daarmee een cijfermatige beoordeling van het veiligheidsniveau in een fabriek of werkplaats, een score die veel overeenkomst heeft met de later ontwikkelde veiligheidsindex (Fellner en Sulzer, 1984; Frijters, e.a., 2008).

Arbeidsveiligheid, theorieën, modellen en metaforen

Het beeld uit de vorige periode (zie Swuste e.a., 2014), te weten dat arbeidsongevallen complex zijn en moeilijk te voorspellen, bleef dominant (Shannon, 1980). Werd voor die tijd een ongeval gezien als een betrekkelijk eenvoudig fenomeen, het gevolg van één enkele oorzaak, gaandeweg werd het duidelijk dat vrijwel altijd meerdere oorzaken een rol spelen. Deze werden aanvankelijk aangeduid als 'gevaarlijke handelingen' en 'gevaarlijke condities'. Veiligheid was een belangrijke voorwaarde voor een efficiënte productie (Heinrich e.a., 1980). Maar tegelijkertijd waren veiligheidsmaatregelen en -interventies die tijd en geld kostten gedoemd te mislukken. Dat gold ook voor maatregelen die een omslachtige werkwijze introduceerden en daardoor interfereerden met de productiekwaliteit, of de -snelheid, (Sulzer en Santamaria, 1980; Monteau, 1983).

De modellen van oorzaken van ongevallen in deze periode waren vaak gebaseerd op een samenvoeging van modellen uit de voorgaande periode, waaronder:

- Het menselijke-foutmodel; hierbij was een menselijke fout de oorzaak van een ongeval en dit model richtte zich op bronnen van fouten, hun frequenties en de beheersing ervan. Het oudste model dat terugging naar onveilige handelingen was Heinrichs dominometafoor uit begin jaren 40;
- Het sequentiemodel; dit model ging uit van een sequentie van gebeurtenissen, of fasen in de tijd. Het bekende voorbeeld was wederom de dominometafoor;
- Het energiemodel; een ongeval als het resultaat van

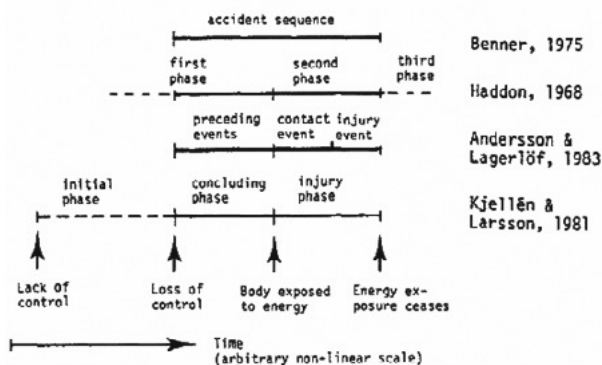


Figuur 2 De gebruikelijke mechanismen die leiden tot fouten in informatieverwerking (Saari, 1984)

een interactie tussen gevaar, energie, omgeving en het slachtoffer. Technische, humane en organisatorische factoren bepaalden de interactie. Dit model stamt uit de tweede helft van de jaren zestig (Haddon, 1968);

- Het informatiemodel; een ongeval was het resultaat van een verstoring in de informatievoorziening van een systeem aan de werknemer. Dit model werd begin jaren zeventig gepubliceerd. Een nadere uitwerking, afkomstig uit Scandinavië ging uit van de toegankelijkheid van de informatie en de verschillende cognitieve processen die daarbij een rol spelen (zie figuur 2). Eerdere ervaringen en ontvangen instructies beïnvloedden de oriëntatie van de ontvanger. Diverse interne factoren, zoals de conditie en de motivatie van de ontvanger, hadden hier eveneens invloed op. Dit maakte het geheel tot een ingewikkeld proces (Saari, 1984);
- Het systeemmodel; een ongeval was het gevolg van een abnormaal effect van het systeem. De analyse richtte zich op de componenten en subsystemen en hun onderlinge interacties. Zo werd een arbeidsongeval beschouwd als een staat van verstoring van een georganiseerd dynamisch systeem in een technische omgeving. Letsel ontstond door ongecontroleerd contact van een persoon met een risicofactor (Tuominen en Saari, 1982; Leplat, 1984).

De Encyclopedie van de International Labour Office (ILO) ging eveneens uit van een systeemmodel en zag ongevallen als een resultaat van een onveilig arbeidssysteem dat door ontwerpfouten ontstaan was of door andere oorzaken inherent onveilig was (Monteau, 1983). Deze relatie tussen ongevallen en ontwerp werd eveneens in Zweden gelegd (Harms-Ringdahl, 1987a). Ook in het Verenigd Koninkrijk werden systeemmodellen ontwikkeld voor de opslag en analyse van ongevallen bij de Fordfabrieken in Liverpool (Shannon, 1980; Shannon en Manning, 1980). Hier waren de systeemcomponenten de onvoorziene gebeurtenissen (geraakt door, gesneden, verstuit, etc.), veroorzaakt door objecten (machine, deeltje, olie, gereedschap etc.) en factoren die objecten in beweging brengen;

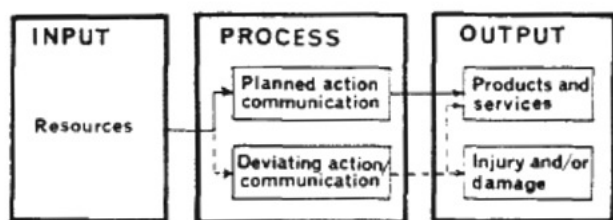


Figuur 3 De relatie tussen de fases van verschillende procesmodellen voor ongevallen (Kjellén, 1984a)

- Het klimaatmodel; in Israël werd het onderzoek naar veiligheidsklimaat van bedrijven gestart (Zohar, 1980a-b). De aanname was dat het gedrag van werknemers bepaald werd door het klimaat van de organisatie. Daarbij omvatte klimaat de dimensies 'betrokkenheid van de leiding', 'status van de veiligheidskundige' en het 'belang van veiligheid tijdens het werk'.
- Het procesafwijkingsmodel; een verbijzondering van het systeemmodel werd in de jaren tachtig geformuleerd. Menselijke fouten werden gezien als consequentie van interacties met delen van het productieproces, of deze fouten waren het resultaat van een minder adequate respons op procesafwijkingen (Kjellén, 1984a, Häkkinen, 1982). Sommige auteurs keerden zich tegen de tendens om fouten van werknemers als oorzaak van ongevallen te zien en benadrukten de probleem oplossende kwaliteiten van mensen (Hovden en Sten, 1984).
- Het ongevalsepidemiologie model; dit model is in de Verenigde Staten toegepast bij de beschrijving van ongevallen met vorkheftrucks. Over een periode van drie jaar, 1983-1985, werden meer dan 88.000 ongevallen geanalyseerd naar sekse, leeftijd, verdeling over de maanden, type letsel en beroep (Stout, 1987). Tegen deze en andere statistische benaderingen van veiligheidskundige data werden bedenkingen geuit. De belangrijkste kritiek was dat analyses geen informatie over scenario's bevatte. Het gevolg daarvan was dat geen zicht was op factoren en condities die van invloed waren op het ongevalsproces (Purswell, 1984).

Vaak werden elementen van de verschillende modellen gecombineerd. Zo kwam de tijdssequentie uit het procesmodel regelmatig terug en zagen veel modellen de interactie met gevaar, of energie als één van de oorzaken van ongevallen (figuur 3). Voorbeelden van syntheses van meerdere modellen waren de risicofactoren voor ongevallen van de ILO, de 'IJEM'-indeling en het model van de Occupational Accident Research Unit (OARU) uit Stockholm het onderste voorbeeld uit figuur 3.

Bij IJEM staat I voor het Individu, J voor de baan (job), E voor de socio-economische omgeving (environment) en M voor het Materiaal en materieel (Faverge, 1983). Het OARU-model was een systeemmodel met afwijkingen en processtoringen als oorzaak van ongevallen (figuur 4) (Kjellén en Larsson, 1981; Kjellén, 1984a-c).



Figuur 4 Het afwijking en storingsmodel (Kjellén, 1984a)

Het model was gebaseerd op onderzoek naar ongevallen in verschillende sectoren, waaronder de mijnbouw, de bouw, de staalindustrie en de railbranche. Afwijkingen leidden tot letsel en achterliggende factoren bepaalden de sequentie van het ongevalsproces. Deze afwijkingen werden gedefinieerd als gebeurtenissen of condities van een productieproces: ze weken af van een ongestoorde procesgang en hadden betrekking op afwijkingen van de materiaalstroom, van informatie, op technische afwijkingen, gelijktijdige activiteiten, omgevingsfactoren en afwijkingen van persoonlijke beschermingsmiddelen. De achterliggende factoren werden opgevat als relatief stabiele condities waarbinnen een productieproces functioneerde en die aanwezig waren gedurende het ongevalsproces. Deze factoren refereerden aan fysische en technische condities, waaronder het ontwerp van het proces, de werkplek en de werkomgeving. Andere factoren waren organisatorisch-economisch (besluitvorming, onderhoud, planning, training etc.) en sociaal-individueel (management instructies, informatievoorziening, kennis en kunde van werknemers).

In de Verenigde Staten is men geneigd om de eigen verantwoordelijkheid van werknemers te benadrukken en daarom bleven in deze periode het menselijke-foutmodel en het bijsturen van onveilig gedrag in de literatuur populair. Reductie van fouten kon bereikt worden door positieve feedback. Het belonen van veilig gedrag was volgens de gangbare psychologische inzichten efficiënter dan het straffen van onveilig gedrag (Sulzer en Santamaria, 1980; Heinrich e.a., 1980; Fellner en Sulzer, 1984; Chhokar en Wallin, 1984; Cohen en Jensen, 1984). Vergelijkbare resultaten kwamen ook uit Scandinavisch onderzoek (Grondstrom e.a., 1980; Vuorio 1982). Observaties waren in deze gedragsbenadering belangrijk en er werden voorstellen gedaan om werknemers als observators op te leiden (Sulzer, 1987). Deze voorstellen waren een voorloper van huidige 'behaviour-based-safety'-programma's.

In de beschouwde periode werd één theorie ontwikkeld, de risico-homeostasetheorie. Homeostase is een term uit de biologie en beschrijft het dynamische vermogen van een organisme om het interne milieu constant te houden ondanks veranderingen in de omgeving waarin het organisme zich bevindt. Dit dynamische evenwicht van een open systeem wordt ook wel aangeduid als een 'steady state'-toestand en verschilt van een fysisch-chemische evenwichtstoestand, die statisch is en thermodynamisch alleen toepasbaar is op een gesloten systeem. Risico-homeostase werd ontwikkeld in het domein van de verkeersveiligheid en verwees naar het mechanisme dat mensen een gewenst of geaccepteerd niveau van risico hanteren (Wilde, 1982). Als het waargenomen niveau daarboven of daaronder ligt, passen ze hun gedrag zodanig aan tot het gewenste niveau bereikt wordt. De theorie werd ook toegepast op andere domeinen, waaronder de arbeidsveiligheid (Wilde, 1986). Uitgaande van deze theorie betekent dit dat een taak die via ontwerpaanpassingen of andere maatregelen veiliger werd, onveilig gedrag gestimuleerd. Een voorbeeld is dat veilige auto's risicovol

rijgedrag blijken op te roepen. In de literatuur ontstond een uitgebreide discussie over deze compensatietheorie, voornamelijk binnen de transportveiligheid. De kritiek die ook binnen het domein van de arbeidsveiligheid te horen was, concentreerde zich op de operationalisering van het risiconiveau en van veranderingen die triggers zijn voor compensatiegedrag (McKenna, 1985 a-b). In de arbeidsveiligheid is de homeostase theorie nooit geaccepteerd. Na dit hoofdstuk over arbeidsveiligheid volgt de ontwikkeling binnen het domein van de procesveiligheid

Procesveiligheid, veiligheidstheorieën en veiligheidsmodellen

In het domein van de procesveiligheid tekende zich een scheiding af in twee aparte domeinen; de technische procesveiligheid en de 'mens machine'-interacties in complexe technologische systemen.

Technische procesveiligheid

Na de ramp in Flixborough in 1974 was een deel van het Britse onderzoek gericht op de verwoestende effecten van gaswolkexplosies bij chemische installaties (Roberts, 1982; Baker, 1982). De focus van het onderzoek verbreedde zich vervolgens naar algemene technische procesveiligheid. De grote namen uit het Verenigd Koninkrijk zijn Frank Lees (1931-1999) en Trevor Kletz (1922-2013). Lees publiceerde in 1980 een indrukwekkend standaardwerk, getiteld 'Loss prevention in the process industry'. Tot op heden zijn vier edities uitgebracht, in 1980, 1996, 2005 en de laatste in 2012. De edities in deze eeuw zijn onder leiding van Sam Mannan verschenen. Het werk van Lees en de vele boeken en artikelen van Kletz beperkten zich tot de chemische, petrochemische en petroleumindustrie. Hun werk was een antwoord op het probleem van de toegenomen omvang en complexiteit in deze industriesector.

Loss prevention is gebaseerd op de systeembenadering. Gevaren en risico's werden in kaart gebracht met een systeemanalyse en gekwantificeerd met behulp van probabilistische technieken en fysisch-chemische modellen uit het reliability-engineering-domein. Kletz omschreef deze benadering met de 3E's; Equipment, om installaties veiliger te maken, gebaseerd op Equations om risico's te berekenen en op Experimenten (Kletz, 1988c). Het grootste gevaar binnen deze sector was 'loss of containment (LOC)'. Bijlage 1 geeft een indicatie van zware ongevallen en rampen als gevolg van een LOC, gebaseerd op rapportage in Loss Prevention tijdschriften en nationale databanken of databanken die specifiek voor de chemische sector zijn opgezet (Lees, 1980, 1996; Mannan, 2004; Kletz, 1988d). Deze bijlage is indrukwekkend en de relatief hoge frequentie van ongevallen met opslagtanks en transport via spoor, weg, zee en buisleidingen vallen op (Lees, 1983; Kletz, 1984b-c, 1985a, 1986b). Met uitzondering van Afrika zijn alle werelddelen in deze bijlage vertegenwoordigd. De informatie uit deze bijlage is niet volledig, zoals de auteur vermeldt en dat blijkt onder andere uit de oververtegenwoordiging van de Verenigde

Tabel 1 Afwijkingen van operationele parameters (naar Lees, 1980)

Some deviations of operating parameters from design conditions	
Process variables	Pressure, temperature, flow, level, concentration
Pressure system	Mechanical stress, loading, expansion, contraction, cycling effects, vibration, cavitation, resonance, hammer; corrosion, erosion, fouling
Chemical reactions	Reactions in reactors: nature and rate of main reactions and side reactions; catalyst, behaviour: reaction, regeneration, poisoning, fouling, disintegration; unintended reactions, elsewhere: explosion, heating, polymerization, corrosion
Material characteristics	Vapour density; liquid density, viscosity; melting point, boiling point; latent heat; phase change; critical point effects; solids physical state, particle size, water content
Impurities	Contaminants; corrosion products; air; water
Localized effects	Mixing effects, mal-distribution; adhesion, separation, vapour lock, surging, siphoning, vortex generation, sedimentation, fouling, blockage, hot spots
Time aspects	Contact time, control lags, sequential order
Process disturbances	Operating point changes, changes in linked plants, start-up, shutdown, utilities failure, equipment failure, control disturbance, operator disturbance, blockage, leakage, climatic effect, fire
Constructional defects	Plant not complete, not aligned, not level, not supported, not clean, not leak-tight; materials of construction incorrect or defective
Loss of containment	Leakage, spillage

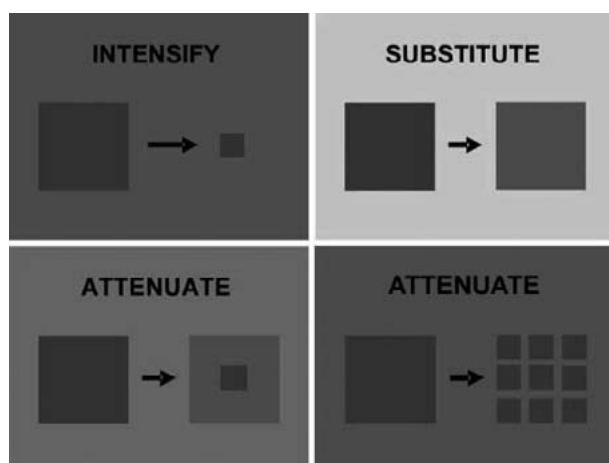
Staten en de ondervertegenwoordiging van Japan en West-Europese landen. De LOC's uit bijlage 1 werden veroorzaakt door afwijkingen en fouten in het productie-systeem (zie tabel 1).

Daarbij speelden vier factoren een dominante rol: de hoeveelheden, de energie, de tijd en de intensiteit-afstand-factor. Hoeveelheden hadden betrekking op het volume van de gevaarlijke stoffen. De energiefactor relateerde aan de energie, nodig om gevaarlijke stoffen tot een brandbaar, toxisch of explosief mengsel om te vormen. De energie-inhoud van gassen onder druk is hoog en het gevaarlijke mengsel zal plotseling en onverwacht bij een LOC ontstaan. Bij gekoelde vloeibaar gemaakte gassen onder atmosferische druk zal de energie voor verdamping uit de omgeving moeten komen. Dat is een veel langzamer proces. De tijd verwees naar de tijd en ontsnappingssnelheid van de ontsnapte stof en de intensiteit-afstand-factor was een indicatie van de schade die op verschillende afstanden kon ontstaan in geval van

brand of explosie. De veiligheidsanalyses waren gericht op de invloed van verschillende indicatoren, die ook wel factoren of determinanten werden genoemd en bepalend waren voor scenario's van grote ongevallen of rampen.

Naast de Britse publicaties verschenen uitgebreide overzichten van verschillende veiligheidskundige analysemethoden van Scandinavische auteurs, met kritische commentaren over de betrouwbaarheid van de vereiste data, bijvoorbeeld faalkansen van installatieonderdelen (Suokas, 1985; Harms-Ringdahl, 1987b). In deze publicaties kwam de ingenieursbenadering naar voren. Er was een nadruk op het ontwerp en herontwerp van installaties als één van de dominante oplossingsrichtingen voor een grotere veiligheid binnen de sector.

'What you don't have can't leak' was een van Kletz's slogans uit de vorige periode (Kletz, 1978). Deze slogan werd nadrukkelijk herhaald in de inherent veilige benadering van deze auteur; 'maak installaties zo eenvoudig mogelijk', 'zorg dat de ontwerper de taken en regel-mogelijkheden van operators begrijpt' en 'controleer ontwerpen achteraf met risico-analyse-technieken, zoals de HAZard and OPerability-techniek (HAZOP)' (Kletz, 1982; Kletz, 1983; Clark, 2008). Een vergelijkbare aanpak werd in Scandinavië gepropageerd bij onderzoek naar risico's in de proces en nucleaire sector (Rasmussen, 1980, 1985; Hollnagel, 1983; Suokas, 1985, 1988). Preventie van grote ongevallen en rampen lag vaak ver van de topgebeurtenis af (Kletz, 1988a). En dat was ook te zien in zijn benadering van enkele eenvoudige preventieprincipes, die in figuur 5 grafisch zijn weergegeven (Kletz, 1985c):



Figuur 5 De relatie tussen de fases van verschillende procesmodellen voor ongevallen (Kjellén, 1984a)

Intensiveer: Gebruik kleinere hoeveelheden van gevaarlijke materialen, waardoor effecten bij vrijkomen worden beperkt;
Vervang: Gebruik minder gevaarlijke materialen, minder brandbaar, minder toxisch;

- Verdun: Als een gevaarlijke stof gebruikt moet worden, gebruik het dan onder minder gevaarlijke condities, of in een minder gevaarlijke vorm;
- Beperk de effecten: Beperk de effecten bij vrijkomen van de gevaarlijke stof door ontwerpveranderingen.

De procesindustrie was lange tijd een gesloten sector. Informatie en resultaten van onderzoek naar oorzaken van grote ongevallen en rampen werden niet gepubliceerd in toegankelijke media. Juridische beperkingen, vertrouwelijkheid van gegevens, angst voor negatieve publiciteit speelden daar in meer of mindere mate een rol. Volgens Kletz had meer openheid enkele grote voordelen. Vanuit een moreel oogpunt gold de regel 'als we het weten moeten we het zeggen'. Pragmatische gezien kunnen andere bedrijven leren van gemaakte fouten. En vanuit een economisch oogpunt kost veiligheid geld en functioneert als een zelfopgelegde belasting voor bedrijven; bovendien zijn kosten van rampen altijd een veelvoud van preventiekosten en dit werd gezien als een argument ten gunste van preventie. En als laatste is er sprake van een reputatieaspect. Een groot ongeval bij één bedrijf heeft nu eenmaal een uitstralend effect op de gehele bedrijfstak (Kletz, 1988c).

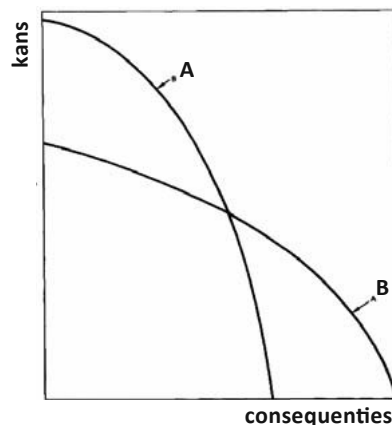
In de Verenigde Staten werden risico's op een iets andere manier beschreven dan in de Britse en Scandinavische literatuur. Hier werd het risico-triplet geïntroduceerd waarmee informatie over scenario's werd toegevoegd. Zo werd duidelijk wat er kon gebeuren of wat er fout kon gaan (Kaplan en Garrick, 1981).

$$R = \{ \langle s_i, p_i, x_i \rangle \}$$

- s_i : scenario, wat kan er gebeuren, wat kan fout gaan?
 p_i : hoe groot is de kans dat dit gebeurt?
 x_i : als het gebeurt, wat zijn de consequenties?

Na de definitie van risico volgde de vraag naar de aanvaardbaarheid van risico's. Daar zijn een aantal problemen aan verbonden. Allereerst de vergelijkbaarheid van risico's. Het risico van actie, of ontwerp A verschilt van risico B in kans en consequenties, maar het is niet duidelijk welk risico groter is (figuur 6).

Een ander punt was de context van het risico. Discussies over risico hebben zin als de context helder is, wie heeft welke baten, of voordelen, kunnen deze voordelen ook op andere manieren bereikt worden en welke kosten zijn aan de risico's verbonden. Zonder context heeft een discussie over risico's geen zin, doordat weinig mensen een risico willen lopen als het hun niet duidelijk is welke voordelen aan het nemen van risico verbonden zijn ((Conrad, 1980; Fischhoff e.a., 1981; Short, 1984; Covelio e.a., 1987). Een uitgebreide verhandeling over risico-inventarisatie, -evaluatie, -acceptatie, -communicatie en -beheersing is weergegeven in een eerder deel van deze serie (zie Oostendorp e.a., 2013).



Figuur 6. Vergelijkbaarheid van risico's (Kaplan en Garrick, 1981)

In de procesindustrie werd in navolging van de nucleaire industrie de probabilistische analysetechnieken geïntroduceerd, functionele analyses in combinatie met fouten- en gebeurtenissen bomen, consequentieanalyses en risicoprofielen. Nadrukkelijk werd gewezen op de onzekerheden die deze technieken introduceren, onzekerheden die analytisch van aard zijn en gerelateerd aan de gehanteerde modellen en aan de kwaliteit van de beschouwde parameters. Foutenbomen zouden niet alle relevante scenario's voor grote ongevallen signaleren en toxicologische modellen voor effecten van chemicaliën waren of niet voorhanden of slechts rudimentair ontwikkeld. De kwantitatieve benadering van procesveiligheid, waarmee een absoluut niveau van veiligheid werd gesuggereerd, verschoof langzamerhand naar de best beschikbare technologie en naar een afweging van kosten en baten (zie risicodeel van deze serie; Paté-Cornell, 1987). Uitgebreid onderzoek naar de oorzaken van grote ongevallen in de Verenigde Staten leidde tot theorievorming. De grote naam daarbij was Charles Perrow (1984). Perrow was socioloog en evenals Barry Turner (1978, zie ook deel 1, Swuste e.a., 2014) was hij op zoek naar indicatoren van grote ongevallen. Perrow had vanuit een systeemmethodiek onderzoek gedaan in een aantal sectoren, waaronder de procesindustrie, de lucht- zee- en ruimtevaart, dammen, mijnen, wapens en DNA-recombinant-onderzoek. De directe aanleiding voor zijn werk was de bijna-ramp bij de kerncentrale van Three Mile Island. Ongevallen bij kerncentrales waren een belangrijk onderdeel van zijn werk.

In overeenstemming met Kletz kwam Perrow tot de conclusie dat '*great events may have small beginnings*' en dat zogenaamde hoge-risico-bedrijven speciale kenmerken hebben, nog afgezien van risico's van aanwezige toxische of explosiegevaarlijke stoffen, of andere risico's. Het zijn niet de fouten van individuele werknemers, of hun motieven, de kenmerken van productiesystemen die terug te voeren waren op twee indicatoren: de mate van koppeling van een productieproces en de complexiteit van de interacties. Deze kenmerken zorgen ervoor dat grote ongevallen onvermijdelijk zijn en als '*normal accidents*' gekarakteriseerd kunnen worden.

Koppeling is een technische term en verwijst naar de

Tabel 2 Strakke en losse koppeling (Perrow, 1984)

<i>Tight Coupling</i>	<i>Loose Coupling</i>
Delays in processing not possible	Processing delays possible
Invariant sequences	Order of sequences can be changed
Only one method to achieve goal	Alternative methods available
Little slack possible in supplies, equipment, personnel	Slack in resources possible
Buffers and redundancies are designed-in, deliberate	Buffers and redundancies fortuitously available
Substitutions of supplies, equipment, personnel limited and designed-in	Substitutions fortuitously available

aanwezigheid van een buffer of van ruimte tussen twee elementen in een systeem. Bij een strak gekoppeld systeem is er geen buffer. Ontstaat er in één systeemelement een fout, of een processtoring, dan is er geen tijd voor correctie en zal de storing zich direct voortzetten naar alle volgende elementen. Tabel 2 geeft enkele kenmerken van deze koppeling. Tijdsafhankelijke productiesystemen zijn strak gekoppeld. De verschillende processtappen moeten in een voorgeschreven tijd worden afgewerkt om de kwaliteit van het product te garanderen. Hoe strakker een systeem gekoppeld is, hoe minder buffers en hoe minder redundantie het systeem heeft. Geautomatiseerde productieprocessen zijn doorgaans strak gekoppeld.

Losgekoppelde systemen daarentegen hebben 'slack' en kunnen zo voorkomen dat een heel systeem in de greep komt van fouten die ergens beginnen en zich door het

gehele systeem verspreiden. Handmatig uitgevoerde processen zijn losgekoppeld. Tijds- en productiedruk kunnen productiesystemen die oorspronkelijk losgekoppeld zijn, strak gekoppeld maken.

Interacties worden net als bij koppeling, ingedeeld tussen twee extremen, de lineaire en de complexe interacties. Kenmerken van deze interacties zijn weergegeven in tabel 3. Complexe interacties bestaan in ingenieurstermen uit zogenaamde 'common mode'-functies.

Als een onderdeel van een proces meer dan één component aanstuurt, is er sprake van een common-mode-functie. Bij een common-mode failure vermenigvuldigen de effecten van deze interacties zich als andere delen, of eenheden, of subsystemen zijn bereikt. In systemen met veel common mode-functies zijn de interacties complex. De common-mode-functies hebben niet alleen betrekking op de relatie tussen procesonderdelen. Chemische

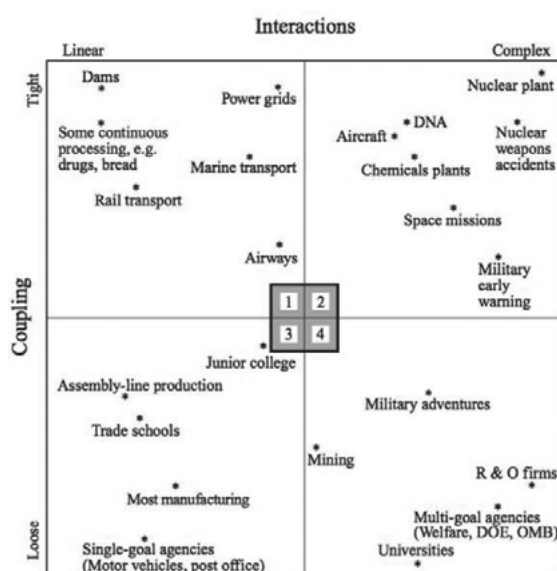
Tabel 3 Complexe en lineaire interacties in systemen (Perrow, 1984)

<i>Complex Systems</i>	<i>Linear Systems</i>
Tight spacing of equipment	Equipment spread out
Proximate production steps	Segregated production steps
Many common-mode connections of components not in production sequence	Common-mode connections limited to power supply and environment
Limited isolation of failed components	Easy isolation of failed components
Personnel specialization limits awareness of interdependences	Less personnel specialization
Limited substitution of supplies and materials	Extensive substitution of supplies and materials
Unfamiliar or unintended feedback loops	Few unfamiliar or unintended feedback loops
Many control parameters with potential interactions	Control parameters few, direct, and segregated
Indirect or inferential information sources	Direct, on-line information sources
Limited understanding of some processes (associated with transformation processes)	Extensive understanding of all processes (typically fabrication or assembly processes)
<i>Summary Terms</i>	
<i>Complex Systems</i>	<i>Linear Systems</i>
Proximity	Spacial segregation
Common-mode connections	Dedicated connections
Interconnected subsystems	Segregated subsystems
Limited substitutions	Easy substitutions
Feedback loops	Few feedback loops
Multiple and interacting controls	Single purpose, segregated controls
Indirect information	Direct information
Limited understanding	Extensive understanding

of fysische transformaties zijn van nature complex als de transformaties niet volledig duidelijk zijn, zoals in een kernreactor, of bij weerstandsgedrag van de lucht tijdens vluchten op zeer grote hoogte. Hetzelfde fenomeen geldt voor de procesindustrie, indien chemische reacties onvoorspelbaar zijn en dus complexe transformaties kunnen veroorzaken. Productiesystemen met complexe interacties kenmerken zich door sterk vertakte pathways en ongebruikelijke feedback-loops en onverwachte sequenties van gebeurtenissen. De complexiteit vertaalt zich in de controle. Dat laat zich aflezen aan het grote aantal controle-parameters en procesindicatoren, die nodig zijn om de status van het proces te volgen. Dit werd zichtbaar in de controlekamer van de Three Mile Island kerncentrale (figuur 1). Lineaire systemen kennen geen of nauwelijks common mode-functies. De productie sequentie is bekend, evenals de mogelijke storingen die vrijwel direct zichtbaar zijn.

Een systeem met een lineaire interactie heeft weinig feedback-loops nodig en een beperkt aantal procesindicatoren om de status van het systeem te kunnen volgen. De meeste productielijnen in de productindustrie hebben lineaire interacties. Figuur 7 geeft een aantal voorbeelden van sectoren, ingedeeld volgens de kenmerken van Perrow.

In navolging van Perrow presenteerde Reason (1987) een analyse van de kernramp bij Tsjernobyl uit 1986. Hij introduceerde de medische metafoor van 'resident pathogen', een inherente ziektekiem. Net als in het menselijke lichaam dragen alle technologische systemen de kiemen van hun eigen destructie in zich. Grote ongevallen en rampen worden zelden maar door één factor veroorzaakt. Op enig moment kunnen systeemfouten, menselijke fouten en andere onvoorziene condities samenkomen, terwijl geen van deze factoren op zichzelf een ramp kan veroorzaken.



Figuur 7 Verschillende sectoren ingedeeld naar de mate van koppeling en van interactie (Perrow, 1984)

Rampen ontstaan door niet-geobserveerde en doorgaans onvoorziene aaneenschakelingen van een aantal van deze afwijkingen, die bij Tsjernobyl aanwezig waren. De maatschappij had gekozen voor een grootschalige nucleaire industrie, met een strak gekoppeld productiesysteem van de reactoren. Tunnelvisie verhinderde dat signalen dat de reactor tijdens een experiment buiten zijn veiligheidsgrenzen ging lopen, werden opgemerkt. De structuur van het management was monolithisch, het bleef op afstand en reageerde traag en de operators hadden slechts een beperkte kennis van het systeem dat ze moesten besturen. Dit maakte fouten onvermijdelijk en de auteur gaf aan dat deze condities eveneens voor westerse landen golden.

Twee jaar na Tsjernobyl gebeurden er twee rampen die wat betreft het aantal slachtoffers en omvang van de schade op dat moment tot de grootste gerekend konden worden: Mexico City, San Juan Ixhuatepec en Bhopal, India (Lees, 1996; Pietersen, 2009; Shrivastava e.a., 1988; Shrivastava, 1992). Deze rampen kregen veel aandacht van de media door het grote aantal dodelijke slachtoffers. De vele slachtoffers werden in beide gevallen veroorzaakt door de directe nabijheid van dichtbevolkte woonwijken rond de locaties. In Mexico City was een LPG-gaswolk ontstaan uit een lekkende flens op het LPG-depot. De gaswolk was in de nabijgelegen woonwijk tot ontsteking gekomen waardoor het leidingwerk naar de LPG-opslagtanks beschadigd werd. Vrij snel daarna volgde een serie van explosies, veroorzaakt door zogenaamde BLEVE's - Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion. Deze verwoestten de LPG-opslag en lanceerden de opslagtanks als raketten de woonwijk in. Naar schatting hebben 500 mensen de ramp niet overleefd en is het aantal gewonde slachtoffers onbekend.

In Bhopal was er geen explosie, maar een gaswolk van methyl-isocyanaat (MIC) die zich in alle stilte verspreidde over de stad. Deze gaswolk ontsnapte uit een fabriekspijp van een Union Carbide-fabriek aldaar, bleef urenlang doorstromen en maakte in korte tijd 2000 dodelijke slachtoffers en tienduizenden gewonden. MIC was in contact gekomen met spoelwater van leidingen. Dit leidde tot een exotherme reactie met een sterke druktoename, waardoor het gas via een pijp ontsnapte. Union Carbide heeft altijd een alternatieve verklaring voor de ramp verdedigd: het zou een sabotageactie van een ontevreden werknemer zijn geweest. Tien jaar na dato was het aantal dodelijke slachtoffers verdubbeld en waren 30.000 mensen blijvend invalide.

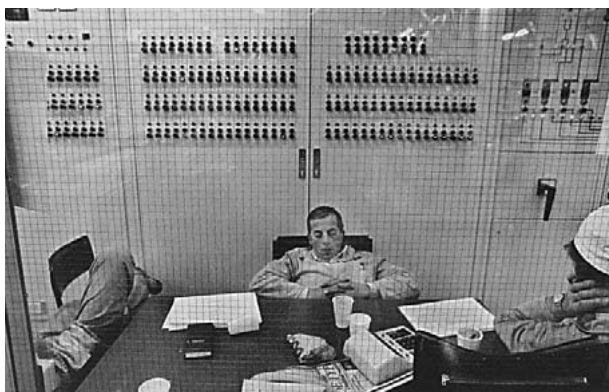
De hoge frequentie van deze rampen maakte de 'defence in depth'-benadering populair, eerst in de nucleaire industrie en daarna gevolgd door andere sectoren. Hiermee wordt bedoeld op meerdere lagen van veiligheidsbarrières rond gevaarlijke systemen, waardoor fouten in of het falen van één laag kunnen worden opgevangen door volgende lagen. Met name Rasmussen (1988a, b) waarschuwde voor een dergelijke benadering. Verwijzend naar Reason (1987) was het argument dat

één of meer falende barrières geen direct zichtbaar effect hoeven te hebben voor operators. Het gevolg is dat rampscenario's in gang gezet worden en tot consequenties kunnen leiden als andere systemen het tegelijkertijd, of later begeven. In de literatuur werd dit bekend onder de naam *'fallacy of defence in depth'*.

Mens-machine-interacties in complexe technologische systemen

De hierboven genoemde rampen leidden tot meer aandacht voor het menselijk functioneren en menselijke fouten tijdens processtoringen. In de Verenigde Staten en in Europa werden verschillende benaderingen ontwikkeld. Bij Human Factors (HF) uit de Verenigde Staten is de kwantificering van menselijke fouten dominant, terwijl in het Verenigd Koninkrijk en Scandinavië modellen en theorieën ontwikkeld werden over menselijk functioneren in complexe technologische omgevingen (meer informatie staat in deel 1 van deze serie, zie Swuste e.a., 2014). Ook ontstaat tegen het eind van de periode tot 1988 de multidisciplinaire studiegroep 'New Technologies and Work (NeTWork)'. Deze studiegroep van experts en wetenschappers uit verschillende vakgebieden kwam in Duitsland bij elkaar en werd ondersteund door de Werner-Reimers-Foundation (Bad Homburg) en de Maison des Sciences de l'Homme (Parijs). Twee publicaties van de jaarlijks bijeenkomsten vallen binnen de periode; 'New technologies and human error' (Rasmussen e.a., 1987) en 'The meaning of work and technological options' (Keyzer e.a., 1988).

In de ingenieursbenadering moest de werknemer of operator zoveel mogelijk gescheiden worden van risico-bronnen, door middel van automatisering of afstands-bediening van het proces. In een aantal bedrijfstakken, waaronder de automobiellindustrie en bij 'hoge-energie-, hoge-risico-bedrijven' was deze automatisering vanaf de jaren zestig al gebruikelijk. In de jaren tachtig werden processen in andere sectoren geautomatiseerd. Computers besturen en controleren nu de machines en de installaties van het primaire proces. De mens kwam daarmee op een grotere afstand en verloor een deel van zijn vakmanschap en de kennis van het proces (figuur 8) (Singleton, 1984; Rasmussen, 1980; Hollnagel e.a., 1981).



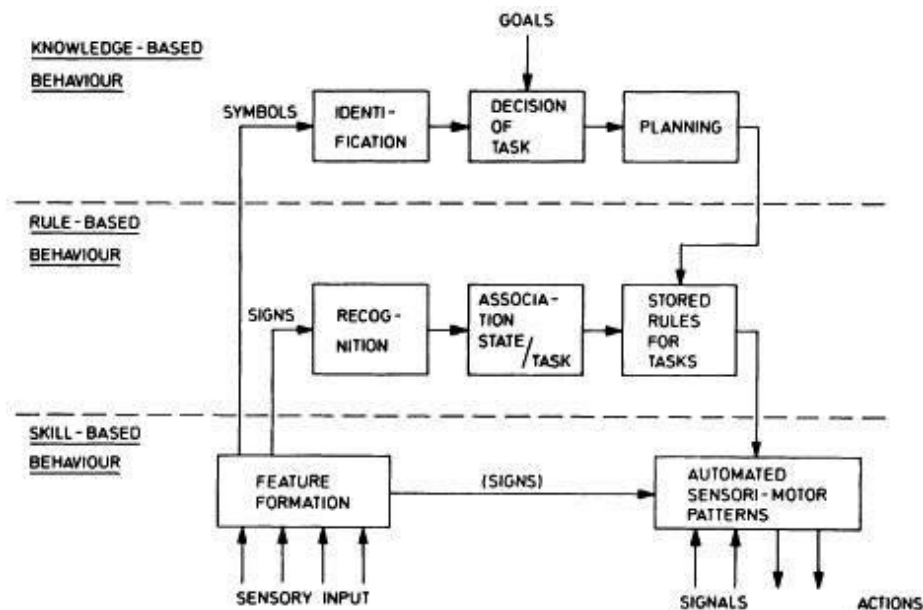
Figuur 8 Controlekamer meelconcern (© Michel Pellanders 1980)

Het menselijk functioneren in complexe technologische systemen was in de jaren tachtig een nog weinig begrepen onderwerp (Eberts en Salvendy, 1986). Publicaties over fouten genererende psychologische mechanismen waren beperkt en menselijke fouten werden altijd nog gezien als zwakheden en incompetentie van de operator. Maar volgens Rasmussen (1982) moesten deze fouten opgevat worden als normale variaties van menselijk gedrag. Deze variabiliteit is niets anders dan een mechanisme voor operators om het systeem dat ze bedienen te leren begrijpen en, als dat nodig is, aan te kunnen passen en te corrigeren tijdens ongewenste procesomstandigheden. Menselijke fouten kunnen begrepen worden als 'niet-succesvolle experimenten met onacceptabele uitkomsten'. Voor Rasmussen zijn het fouten die in een mens-onvriendelijke werkomgeving ontstaan, waar een operator niet in staat is om afwijkingen van het productiesysteem te analyseren, te begrijpen en te herstellen voordat onacceptabele consequenties zich voordoen. Een van de problemen van mens-machine-interactie was het traditionele ontwerp van één sensor, één indicator. Van de operator wordt dan een actie verwacht, waarbij hij of zij zelf moest uitvinden wat de toestand van het systeem is, aan de hand van de aangeboden signalen en de ontvangen training over het systeem.

Bij het ontwerp van interfaces werd te weinig rekening gehouden met de informatie die een operator nodig heeft om afdoende te kunnen reageren op processtoringen. Het eerder besproken controlepaneel van de Three Mile Island-kerncentrale was daar een voorbeeld van. De informatie moest daarom gepresenteerd worden in termen van menselijke mentale functies om hun controlefuncties naar behoren uit te kunnen voeren en niet alleen in termen van systeemeisen. Een mens reageert op een totale situatie: hij of zij heeft een holistische benadering van de toestand van een proces en is in staat om ongelijkwaardige data te integreren en daarin patronen te herkennen. Maar de mens handelt minder adequaat op incidentele gebeurtenissen of systeemtoestanden die voortkomen uit de één sensor, één indicator technologie (Rasmussen, 1983; Rochlin, 1986).

Rasmussen kwam tot een taxonomie van gedrag voor operators, gebaseerd op empirisch onderzoek uit de jaren zeventig naar de manieren waarop onderhoudstechnici problemen oplossen. In zijn publicaties uit 1982 en 1983 kreeg deze theorie zijn uiteindelijke vorm in de bekende *'skill-rule-knowledge'* indeling (figuur 9) en in de jaren 90 bekend geworden als de Rasmussen-Reason-theorie (Rasmussen en Reason, 1987). Het uitgangspunt waren ongevallen in complexe technologische systemen met potentieel grote consequenties. Voor het gedrag van een operator werden drie categorieën onderscheiden:

1. Het op vaardigheden gebaseerd (skill-based) gedrag functioneert via automatische of onderbewuste processen, die geïnternaliseerd zijn door ervaring;
2. Regelgestuurd (rule-based) gedrag correspondeert met expliciete regels die een operator gebruikt om



Figuur 9 Vereenvoudigde weergave van prestaties van een geschoolde vakman. De verschillende niveaus zijn geen alternatieven, maar interacteren op een manier die slechts beperkt is weergegeven in het figuur (Rasmussen 1983)

- een specifieke taak uit te voeren;
3. Kennisgestuurd (knowledge-based) gedrag verwijst naar het vermogen om in nieuwe situaties oplossingen te vinden die niet direct onderdeel zijn van het repertoire van de operator en veel aandacht en concentratie vereisen.

Een uitgebreide bespreking van de oorsprong van deze indeling is recent gepubliceerd (Le Coze, 2014). Deze benadering werd ook aangeduid met de term cognitieve engineering en heeft een relatie met het ontwerp van het proces. Als operators met een hoge mate van complexiteit werden geconfronteerd bij processtoringsen of andere afwijkende condities, dan moest het ontwerp van de mans-machine-interface deze operator ondersteunen in de taak die van hem of haar verwacht werd. De taxonomie van gedrag was een eerste aanzet om menselijk functioneren onderdeel te laten worden van ontwerpopties van mens-machine-interfaces.

De bovenstaande benadering van menselijk functioneren verschilde wezenlijk van een in Amerikaanse bedrijven dominant werkwijze, waarbij menselijke fouten gekwantificeerd werden. De 'Technique for Human Error Rate Prediction (THERP)' is een welbekende techniek uit de Human Reliability Assessment (HRA) stroming uit de jaren 60. Deze techniek modelleert de kans op menselijke fouten tijdens de uitoefening van taken met behulp van een foutenboom-benadering die overeenkomt met een technische risicoanalyse. Voor deze kwantificering wordt gebruik gemaakt van een omvangrijke database, die door Swain en Guttman (1983) was ontwikkeld in de Sandia Laboratories voor de US Nuclear Regulatory Commission. De kwantificering van fouten bleef niet beperkt tot de Verenigde Staten. Ook in het Verenigd Koninkrijk werd geconstateerd dat veel menselijke fouten voorkomen in zogenaamde 'human factor'-arme arbeidsomgevingen

(Hawkins, 1987). Daar werd met behulp van een expertsysteem een HRA methode opgezet (Rafaat en Abdouni, 1987). Andere auteurs uit Europa kwamen met bezwaren tegen deze kwantificering. De betrouwbaarheid van de informatie werd ter discussie gesteld en daarmee de voorspellende waarde. Een dataverzameling van observeerbare en reversibele fouten is vrijwel onmogelijk en dat geldt ook voor de foutfrequenties. Maar meer fundamenteel was er bezwaar tegen de reductie van menselijk handelen tot een systeemelement. Er werd te weinig rekening gehouden met de manier waarop mensen in complexe technologische omgevingen reageren op afwijkende procescondities (Singleton, 1984; Rasmussen 1982).

Vanuit de organisatiepsychologie was kritiek op de systeembenadering, onder andere van de Amerikaan Karl Weick (1974, 1979) en de Nederlander Geert Hofstede (1978). Hofstede twijfelde aan de kwaliteit en effectiviteit van rationele systeemregelkringen in organisaties. Het managen en besturen van een bedrijf of organisatie was naar zijn mening een sociaal proces. Weicks argument lag in lijn met dat van Hofstede. Mensen in een organisatie werden geconfronteerd met de praktische puzzels van organiseren en probeerden zin te geven aan situaties waarin ze verkeerden en die ze deels zelf opriepen. Besluiten en acties waren hoogstens achteraf als rationeel en geordend te beschouwen. Daarom had het zin om organisaties te begrijpen in termen van processen die binnen de organisatie spelen (Daft en Weick, 1984; Rochlin, 1986; Weick, 1987). Evenwicht, controle, feedback, de gebruikelijke termen uit een systeembenadering, zeggen nauwelijks iets over de dynamiek van een organisatie.

Eind jaren tachtig startte het onderzoek naar wat de 'high reliability organisation (HRO)' werd genoemd. Dit zijn organisaties met zeer complexe processen, die doorgaans strak tot zeer sterk gekoppeld zijn, maar

waar naar verhouding weinig ongevallen plaatsvinden. Vliegmanoeuvres op vliegdekschepen en de begeleiding van aanvliegroures naar vliegvelden waren daar voorbeelden van. HRO was een label voor buitengewoon betrouwbare organisaties die zich met gevaarlijke activiteiten bezighielden. Betrouwbaarheid werd in deze context gekenmerkt door het leren, begrijpen en corrigeren van complexe processen. De benadering stond haaks op de gangbare op mechanistische efficiency gerichte managementbenadering. Daarnaast bleek uit onderzoeksrapporten van de grote rampen uit de jaren tachtig dat fouten die gemaakt waren niet puur technisch of de puur menselijk waren, maar zogeheten interactieve of synergistische fouten. De mechanistische werkmethode zorgde ervoor dat operators volgens procedures werken, maar eenvoudigweg geen tijd hebben om problemen op te lossen (Weick, 1987; Roberts, 1988). *'We have third generation machines and first generation minds'* werd in de literatuur opgemerkt (Westrum, 1988). Dan gaat het niet alleen om de tijd als beperkende factor, maar om het feit dat mensen de complexiteit en variëteit van mechanistische proces niet meer kunnen managen. De feedback-controle, die vanuit de systeemtheorie een logische route van managen is, corrigeert de actuele toestand van een proces met een gewenste toestand. In dynamische processen van HRO-organisaties is de gewenste toestand een utopie en werkt het concept van feedback niet meer. Globaal zijn er dan twee opties: ofwel systemen moeten minder complex gemaakt worden, de boodschap van Kletz, ofwel de operator moet slimmer worden. Als een proces een grotere complexiteit en variëteit vereist dan een enkel individuele werknemer kon opbrengen, dan is een van de mogelijke oplossingen om in netwerken of in teams te gaan werken, die qua kennis en disciplines zo divers mogelijk zijn samengesteld. Diversiteit geeft een betere garantie voor betrouwbaarheid dan een team met een homogene samenstelling. Een voorbeeld was de ploegwisseling bij de Diablo Canyon-reactor in California. Deze reactor werd gebouwd in de nabijheid van vier breuklijnen, waaronder de San Andreas en de Hosgri en moest aardbevingen van 7,5 Richter weerstaan. Seismische registratie- en veiligheidssystemen zijn ontworpen om bij significante grondbewegingen de reactor direct buiten bedrijf te nemen. Bij de ploegwissel werd de overdracht van het reactorproces in de controlekamer verzorgd door een kleine ploeg met de voorman, die het overzicht hield, een technicus voor technische details en enkele operators die de laatste operationele wijzigingen aan de komende ploeg konden overdragen. Een dergelijke effectieve delegering van verantwoordelijkheden was cruciaal voor het functioneren van de reactor (Weick, 1987).

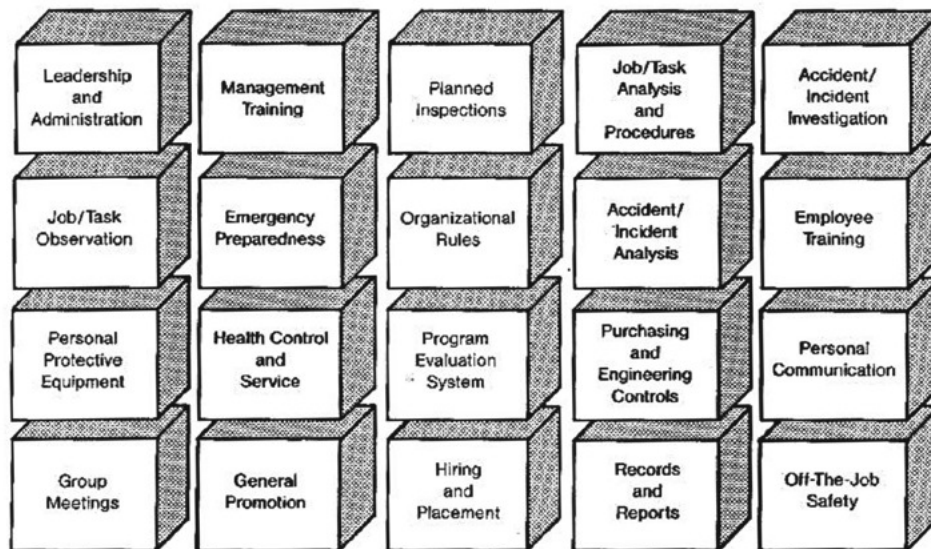
Een ander voorbeeld was de vliegoperaties op vliegdekschepen. De gang van zaken zondigde tegen bijna alle regels van veilige operaties. De organisatie op een vliegdekschip is complex. Er bestaat een horizontale structuur van squadrons, een verticale structuur van onderhoud en uitvoering en een commandostructuur van

gevechtseenheden in de lucht en de betrokken schepen. Iedere 40 maanden wordt 100% van de bemanning vervangen. Ook de gevaren zijn spectaculair. Het vliegdekschip heeft explosieven aan boord en vervoert grote hoeveelheden gevaarlijke vliegtuigbrandstof, voert riskante vliegmanoeuvres uit en worden voortgestuwd door een nucleaire reactor. Als er iets mis gaat, dan gaat het bijna altijd spectaculair mis. De enige manier om een hoge mate van betrouwbaarheid te garanderen is redundantie op allerlei gebied. Een voorbeeld is redundantie in autoriteit en hiërarchie. Er is geen strakke hiërarchie en de vluchtoperaties zijn plat georganiseerd waarbij de laagste man in rang de autoriteit kan hebben om een vlucht af te breken. Officiëren accepteren autoriteit van specialisten waar ze afhankelijk van zijn. Jonge officieren zijn zowel stagiair(e) als trainer. Het schip is één grote school. Er is ook sprake van een zogeheten fail-safe-redundantie waarbij gevaarlijke operaties door meerdere teams worden begeleid en een systeem van check-dubbel-check bij veiligheidskritische besluiten en acties. De organisatie is gericht op procesafwijkingen en al het personeel is multi-inzetbaar (Rochlin e.a., 1987; Roberts, 1988). In deze benadering heeft de organisatiecultuur een dominante betekenis. Een organisatiecultuur die een geaccepteerde manier van werken voorstaat, met gedeelde assumpties en vooronderstellingen over besluiten, geeft zingeving en betekenis aan de activiteiten en werkzaamheden voor de verschillende eenheden. Anders dan bij bedrijven met regel- en proceduregestuurde processen heeft volgens Weick (1987) een dergelijke organisatie met een op consensus gebaseerde cultuur nauwelijks enige vorm van toezicht nodig om betrouwbaar te kunnen functioneren.

De HRO benadering lijkt nauwelijks een extern veiligheidsmanagement en -systeem nodig te hebben. Echter de voorbeelden van high reliability organisaties zijn in de besproken periode beperkt en hoge en minder hoge risico bedrijven zullen vertrouwen hebben in enige vorm van veiligheidsmanagement. Het volgende hoofdstuk behandelt de kennisontwikkeling binnen het bovengenoemde domein.

Veiligheidsmanagement en veiligheidsmanagementsystemen

In de voorgaande periode (Swuste e.a., 2014) werden de principes van veiligheidsmanagement en -systemen ontwikkeld en in 1987 verschenen internationale normen voor kwaliteitsmanagement, de ISO 9000-serie (ISO, 1987). Hoewel ontwikkeld voor kwaliteit, vond deze norm ook toepassing in het veiligheidskundige domein. De noodzaak voor een adequaat functionerend veiligheidsmanagement werd keer op keer aangetoond in rapporten over grote industriële rampen. Ook de wetenschappelijke literatuur was betrekkelijk negatief over de rol die veiligheid speelde in de besluiten van managers in de verschillende bedrijfstakken, of over organisatorische reacties op aantoonbare onveiligheid. Dat werd niet alleen voor hoge-energie- hoog-risico-bedrijven geconstateerd, maar ook voor het domein van de arbeidsveiligheid. Veiligheid



Figuur 10 Elementen van Loss Control Management (Bird en Germain, 1985)

kreeg niet de terechte, nodige aandacht van managers. Ongevallen met verzuim waren de enige graadmeter voor veiligheid in bedrijven (Grondstrom e.a., 1980; Kjellén, 1982, 1984a, 1987; Robinson, 1982; Kletz, 1985b; HSE, 1985; Fischhoff e.a., 1987; Harms-Ringdahl 1987a). Managers konden in deze visie geen fouten maken, terwijl werknemers bijna als objecten werden gezien en als brokkenmakers werden bestempeld. De accident-proneness-theorie was ongekend populair als verklaring voor ongevallen en werd als leidraad gebruikt voor maatregelen (Tombs, 1988). Enkele malen klonk in de literatuur de verzuchting dat de kloof tussen de academische en de praktische ontwikkeling van het veiligheidskundige domein wel erg groot begon te worden (Purswell, 1984; Kjellén 1984a). Een ander aspect was de wetgeving. Na een groot ongeval volgde er een opeenstapeling van nieuwe regels, waardoor de wet onoverzichtelijk werd en er als een telefoonboek uit ging zien. De relatie tussen wetsovertreding en ongevallen was daarentegen nauwelijks eenduidig te noemen (Kletz, 1984b, 1986b; Benner 1985). Vervolg via het strafrecht was vanuit een veiligheidskundig perspectief contraproductief, preventie was veel beter (Kletz 1984a).

Halverwege de jaren tachtig werd een tweede audit-systeem voor veiligheidsmanagement ontwikkeld (het eerste systeem stamde uit 1971 en was ontwikkeld door Petersen, zie deel 1). Het systeem was het International Safety Rating System (ISRS) van Bird en Germain (1985). Beide auteurs hadden in de tweede helft van de jaren zestig al naam gemaakt met 'damage control', vanuit de gedachte dat schade aan constructies en voertuigen veel vaker voorkwam dan schade aan mensen en ook grotere financiële consequenties had. Het ISRS had een voorloper afkomstig uit de Chamber of Mines of South Africa. Daar werd het International Mining Safety Rating System ontwikkeld, primair om standaarden voor veiligheidsmanagement te ontwikkelen en om vorderingen op het gebied van mijnveiligheid meetbaar te maken. De audit bestaat uit 20 elementen (figuur 10) en deze bevatten elk

in enkele tientallen vragen. Het antwoord op de vragen geeft een score, waarmee bedrijven vergeleken kunnen worden en de negatief gescoorde vragen geven het management een duidelijke richting voor te ondernemen acties. Desondanks is de relatie tussen de score op de vragen en de incidentie van ongevallen bij bedrijven niet aangetoond (Eisner en Leger, 1988; Guastello, 1991).

De politieke wetenschapper Wildavsky (1988) introduceerde een hele andere benadering van risico beheersing en veiligheidsmanagement die in het verlengde ligt van de *high reliability organisations*. Voor bekende risico's in een stabiele omgeving is anticipatie, *trial without error*, de meest aangewezen en succesvolle strategie. In deze situatie zijn gevaren en risico's bekend en voorspelbaar en met veiligheidsbarrières, protocollen en oefeningen beheersbaar te maken. Deze strategie is risicowerend en gericht op de borging van de stabiliteit van een systeem. Zo'n risicowerende benadering is dominant in het veiligheidskundige domein en leidt tot uitgebreide wet- en regelgeving bij bedrijven en overheden. Stabiliteit is echter vaak een illusie en wanneer de voorspelbaarheid en kennis van gevaren en risico's beperkt is, is er een andere strategie nodig. Wildavsky introduceert hiervoor het begrip '*resilience*', oftewel veerkracht. Dit is de capaciteit van een organisatie om onder dynamische condities gevaren te herkennen, te begrijpen en adequaat te reageren voordat ze manifest worden. Deze benadering heeft grote overeenkomst met de HRO-benadering uit het vorige hoofdstuk 'Mens-machine interacties in complexe technologische systemen'.

Naast de verschillende managementbenaderingen ten opzichte van gevaren en risico's werd het duidelijk dat de kennis over het functioneren van complexe organisaties betrekkelijk gering was. Organisaties dienden opgevat te worden als zeer complexe eenheden (Daft en Weick, 1984). In zijn bijdrage aan de bijeenkomst van de Wereldbank 'Safety Control and Risk Management' presenteerde Westrum (1988) een typering van reacties van bedrijven

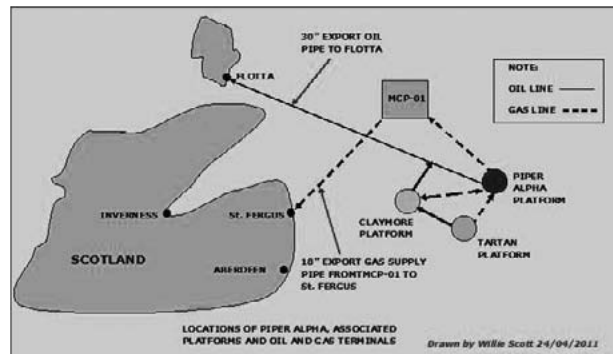
op veiligheidsissues die overeenkomsten had met de typering van Petersen uit 1975 (zie Swuste e.a., 2014). Westrum zag grote verschillen tussen bedrijven in hun reacties op veiligheidsproblemen:

- *Pathologische reactie*
Ook onder normale omstandigheden kunnen deze organisaties niet adequaat omgaan met risico's. Vaak onder zware economische druk worden regels en wetten ter reductie van gevaren welbewust omzeild. Boodschappers van risico's worden genegeerd, onderdrukt of gestraft. Bhopal was zo'n voorbeeld, waar het moederbedrijf sterke invloed uitoefende op het onderzoek naar de oorzaken van de ramp aldaar (Shrivastava e.a., 1988; Shrivastava 1992).
- *Berekenende reactie*
Deze organisaties werken 'volgens het boekje', in zekere zin een verbetering ten opzichte van pathologische organisaties, die zelfs illegale activiteiten uitvoeren. Voor periodes van een normale procesgang, zonder al teveel afwijkingen is deze benadering afdoende. Dat wordt anders tijdens crises, of bij grote procesafwijkingen. Tijdens onvoorziene condities is de organisatie niet meer in staat om adequaat te reageren. Analyses van de bijna-ramp van Three Mile Island lieten zien dat de organisatie voor een periode van vier dagen geen adequaat beeld hadden van de ernst en omvang van de gebeurtenissen die zich binnen de reactor afspeelden (Kemeny, 1979).
- *Generatieve reactie*
Deze organisaties zijn veerkrachtig. Ze worden gekenmerkt door een krachtig leiderschap en creativiteit en moedigen dit aan in alle delen van de organisatie. Een standaardmodel van een dergelijke organisatie was het Manhattan Project tijdens de Tweede Wereldoorlog. De *high reliability*-organisaties, beschreven in de paragraaf 'mens-machine interacties in complexe technologische systemen' waren een ander voorbeeld

Hierna volgt een hoofdstuk over de oorzaken van de ramp met de Piper Alpha, een voorbeeld van een bedrijf met een topmanagement met pathologische reacties op veiligheidsissues.

Piper alpha

Op het Noordzee-olieplatform Paper Alpha ontstond op 6 juli 1988 een explosie in de gascompressiemodule. Dit platform was met hogedrukleidingen verbonden met drie andere platforms (figuur 11). De explosie startte met een lekkende pomp die eerder voor onderhoud uit bedrijf was genomen en ten onrechte werd geactiveerd. Dit was een consequentie van een slecht functionerend 'permit to work systeem'. Bij de eerste explosie werden vuurbestendige schotten, de controlekamer met het communicatiesysteem, energievoorzieningen en noodsystemen verwoest. Daarna volgde een hele keten van explosies en branden, waardoor het platform vrijwel geheel werd verwoest. De Piper Alpha-explosie was het zwaarste ongeval ooit een



Figuur 11 De verbindingen tussen Occidental platforms

offshore-platform, 167 werknemers overleefden de ramp niet. Een en zestig werknemers ontsnapten aan de brand onder andere door via touwen van dertig meter hoogte in zee te springen. De ramp kon zich zo desastreus ontwikkelen, omdat de bluswaterinstallatie niet functioneerde. Die was op handmatig gezet ter bescherming van duikers, die in de buurt van de waterinvoer aan het werk waren. Een andere reden was de toevoer van olie en gas uit de pijpleidingverbinding tussen de Piper Alpha, Tartan en Claymore platformen, die pas heel laat werd afgesloten. Daardoor kon een verstikkende rookpluim, ontstaan, die de accommodatie-eenheid bereikte, een plek waar de meeste werknemers zich verzameld hadden.

De commissie die onderzoek naar de oorzaken van de ramp verrichtte, werd voorgezeten door Lord Cullen (1990). Dit rapport bevatte het meest uitgebreide onderzoek dat tot dan toe in het Verenigd Koninkrijk werd uitgevoerd. Naast de technische details van het meest aannemelijke rampscenario was er vernietigende kritiek op de kwaliteit van het veiligheidsmanagement van Occidental, de exploitant van Piper Alpha en op het toezicht waar het Departement of Energy verantwoordelijk voor was. Managers van het bedrijf hadden nauwelijks enige veiligheidstraining gehad en de noodzakelijke kennis van en training voor majeure brandscenario's waren afwezig. Veiligheidsstudies van het platform en werkzaamheden op het platform waren niet uitgevoerd en maatregelen tegen brand op het platform waren ontoereikend. Een ander belangrijk punt was de slechte kwaliteit van het 'permit to work'-systeem. Hierdoor werd het mogelijk dat de betreffende pomp, die voor onderhoud uit bedrijf was genomen, door een volgende ploeg weer werd geactiveerd. Meer algemeen was er een opvallend gebrek aan enige vorm van terugkoppeling van veiligheidsrelevante informatie, zowel in de onshore- als in de offshore-organisatie. Opvallend genoeg hadden audits, uitgevoerd door het Departement of Energy, de tekortkomingen in het management van Occidental en in de werkmethoden op het platform niet gezien, terwijl deze tijdens het onderzoek naar de ramp al snel naar boven kwamen. Deze omissie werd geweten aan de beperkte veiligheidsexpertise van het departement. Dit ongeval maakte pijnlijk duidelijk dat de sterke ontwikkelingen in het veiligheidsdomein nog te onvolwassen waren om catastrofes te voorkomen.

Het volgende hoofdstuk behandelt voorafgaande aan de discussie en conclusies de ontwikkeling in Nederland. Hier wordt ingegaan op de consequenties van de internationale ontwikkelingen op het gebied van arbeidsveiligheid, procesveiligheid en dito management voor de discussie binnen het Nederlandse veiligheidskundige vakgebied. Ook is er aandacht voor de zelfstandige kennisontwikkeling in ons land.

Ontwikkeling in Nederland

Arbeidsveiligheid was in deze periode in het vakblad *De Veiligheid* een terugkerend onderwerp van publicaties. Daarnaast werden ontwikkelingen in de ergonomie, met ideeën over het (her)ontwerp van processen, installaties, werkplekken en handgereedschap, regelmatig in artikelen besproken (Stassen, 1981; Poll, 1983; Jong en Poll, 1984). 'Als we een gezonde mens ongezond werk laten doen kunnen we moeilijkheden verwachten' (Boudri, 1979) was het uitgangspunt en er werd een verschuiving zichtbaar van 'aan wie overkomt het ongeval?' naar 'in welke situatie vindt het ongeval plaats' (Keyser, 1979; Redactie, 1986). In artikelen werd verwezen naar de taakdynamiek van Winsemius (Kraan, 1981; Zuuren, 1983a), een benadering die in eerdere artikelen van deze serie is besproken (zie Swuste e.a., 2011, 2014). Ook kwam regelmatig de rol van het ontwerp en van de tekentafel aan bod waar, volgens de auteurs, veiligheid begint (Comeche, 1979; Zwam, 1979b).

Een tweede onderwerp was de organisatie van veiligheid binnen bedrijven en de opzet van veiligheidsmanagementsystemen. Overeenkomstig de gangbare inzichten over oorzaken werden de 'zachtere, organisatorische factoren' van het ongevalsproces benadrukt, zoals de perceptie van en de verantwoordelijkheid voor veiligheid. Deze inzichten werden reeds ontwikkeld eind jaren zeventig (zie Swuste e.a., 2014) en werden als percepties van werknemers meetbaar gemaakt in de studie van Dov Zohar (1980) naar het veiligheidsklimaat, een onderdeel van het construct veiligheidscultuur dat later ontwikkeld zou worden. In hetzelfde jaar verscheen een vertaling van Zohars studie in *De Veiligheid*. Andere publicaties vestigden de aandacht op vergelijkbare items, zoals de noodzaak van werkoverleg en opleiding voor veiligheid, voor veiligheid audits en toezicht en voor het veiligheidsbeleid van een onderneming (Zwam, 1979a; Putman, 1986). Er verscheen een publicatie met een voorstel voor de kwantificering van niveaus van veiligheid van bedrijven. Dit idee is op te vatten als een voorloper van veiligheidsindicatoren, waarbij de aantallen veiligheidsinspecties, frequenties van werkoverleg en van ongevallen, gevolgde opleiding en uitgevoerde taakveiligheidsanalyses als maat genomen worden (Leij, 1979). Over de verantwoordelijkheid voor veiligheid liepen de meningen van verschillende auteurs nogal uiteen. Eén groep sloot aan bij de Amerikaanse Human Factor benadering. Het Swain-veiligheidsproject dat in Nederlandse bedrijven werd geïntroduceerd, is een voorbeeld van die benadering. De kerngedachte is dat een werknemer verantwoordelijk is

voor zijn of haar eigen veiligheid en voor de veiligheid van minder ervaren collega's. Dit veiligheidsbewustzijn kan worden verhoogd door ze te trainen onveilige situaties te melden en hun ervaringen via een ideeënbus kenbaar te maken (Anoniem, 1982; Blijswijk en Mutgeert, 1987). Een andere groep refereerde aan het Britse Robens-rapport uit 1972 waar de verantwoordelijkheid voor veiligheid bij de managers van bedrijven wordt gelegd en de achterliggende factoren van onveiligheid hun oorsprong vinden in een falend managementsysteem (Oirbons, 1981).

In dezelfde periode speelde de introductie van de Arbeidsomstandighedenwet, kortweg de Arbowet genoemd. De filosofie van de wet was gebaseerd op harmonie, samenwerking en overleg en ademt de geest van de jaren zeventig. 'Humanisering van de arbeid' was het parool, het streven om arbeid, arbeidsomstandigheden en -verhoudingen te veranderen zodanig dat de kans op schade aan lichaam en geest, de lichamelijke en psychische belasting, zo laag mogelijk is (Roos, 1979). Het begrip welzijn wordt geïntroduceerd. De lasten van arbeid moeten niet worden afgewenteld op zwakkere groepen, zoals vrouwen en buitenlanders, aldus de mening van toenmalig minister Alberda. Werkoverleg en zelfontplooiing staan centraal, monotone arbeid moet vermeden worden en het werk aangepast worden aan het vakmanschap van de werknemer (Anoniem, 1979, 1980a; Sluis, 1984). Dat de praktijk weerbarstig bleek en dat veel bedrijven hun arbeidsomstandigheden niet of nauwelijks onder controle hadden, was te lezen in de vele publicaties in het vakblad *Risikobulletin*, uit de uitgaven van de Industriebond FNV en uit de promotie van Buitelaar en Vreeman. Vaak waren de publicaties gebaseerd op onderzoek van bedrijfsledengroepen van dezelfde bond, in samenwerking met chemie- en wetenschapswinkels van universiteiten en de Adviesgroep Stichting Arbeid en Gezondheid uit Utrecht, zoals het onderzoek bij het Amerikaanse bedrijf Cyanamid naar blootstelling aan proceschemicaliën (Beek e.a., 1982).

Ook de uitgaven van de Industriebond omvatten een indrukwekkende lijst van onderzoeksrapporten afkomstig uit middelgrote en grote bedrijven uit de metaal, de chemie, de rubberverwerkende bedrijven, de transport- en de voedingssector, de bouw en de elektrotechnische en grafische industrie (Vreeman, 1982; Buitelaar en Vreeman, 1985). Arbeidsomstandigheden, onveilige installaties en processen, hoge tot zeer hoge blootstelling aan chemicaliën, carcinogene stoffen waaronder asbest, vulkanisatiedampen, trillen en schokken, lawaai, stof waren volgens bedrijfsledengroepen onaanvaardbaar en moesten beter gemanaged worden. Behalve blootstelling aan gevaren en risico's waren bij veel bedrijven onderwerpen als loon, werktijden en kwaliteit van werkoverleg frequente pijnpunten (Hattem, 1980).

In *De Veiligheid* kreeg vooral het onderzoek van de wetenschapswinkel Leiden bij Dupont veel aandacht. Wat voor de directeur van het Amerikaans chemiebedrijf in Dordrecht vanzelfsprekend was, de uitbreiding van bedrijfsveiligheid naar de privésfeer van werknemers

(Duyvis, 1979), stuitte in Nederland op verzet. De directeur rechtvaardigde zijn benadering door te wijzen op de veel hogere incidentie van ongevallen in de privésfeer en de negatieve invloed van deze ongevallen op de bedrijfsvoering. In het Leidse onderzoek 'veiligheid tot welke prijs?' werd de behaviouristische benadering, in Amerika dominant, gehekelde. Deze benadering was gericht op gedrag van individuele werknemers en werd door straf en beloning gestuurd. Door werknemers werd deze klassieke visie op veiligheid als disciplinerend ervaren (Anoniem, 1980b). Niet alleen in de huissituatie, maar ook op vakantie werden werknemers aangespoord zich te houden aan veiligheidsnormen van het bedrijf (Sluis, 1983). Het veiligheidsmanagement van het bedrijf was sterk regel- en inspectiegestuurd. Overal waren regels voor opgesteld, zowel algemeen als afdelings- en sectie-specifiek, zodat altijd wel een regel werd overtreden bij een incident of ongeval. Verder introduceerden wekelijkse inspecties, die resulteerden in 'unsafe act index scores', ongewenste competities tussen ploegen met consequenties voor beoordelingen en voor loon. Het veiligheidsbeleid van Dupont richtte zich vooral op arbeidsveiligheid, met een sterke voorkeur voor persoonlijke beschermingsmiddelen. Ook dat was een van de kritiekpunten van werknemers. De state of the art beschermingsmiddelen werden aangeschaft, maar technische aanpassingen aan productielijnen en herontwerp van processen voor een veilige productie waren niet bespreekbaar (Boonstra, 1983, 1983/4).

In deze periode veranderde de vak- en wetenschappelijke pers in Nederland. Het vakblad *De Veiligheid* werd omgedoopt in *Maandblad voor Arbeidsomstandigheden*, kortweg MAO genoemd en het wetenschappelijk tijdschrift, het *Tijdschrift voor toegepaste Arbeidwetenschap* (TtA), werd geboren. Eerst verscheen het tijdschrift als een katern van het maandblad met een frequentie van vijf tot zes keer per jaar, tien jaar later als zelfstandig tijdschrift. De redactie signaleerde een groeiende kloof tussen de wetenschappelijke ontwikkeling van arbeid, veiligheid en gezondheid en het professionele veld, omdat academici doorgaans in Engelstalige tijdschriften publiceerden die door de beroepsgroep nauwelijks werden gelezen. Met TtA werd gepoogd de kloof te dichten door onderzoekers uit te dagen hun publicaties toegankelijk te maken voor een meer praktisch georiënteerd forum van lezers en professionals te stimuleren om hun onderzoek volgens een wetenschappelijk format te publiceren (Korstjens, 1988; Vernooij, 1988).

Procesveiligheid en de QRA-technieken (kwantitatieve risicoanalyse) zijn uitgebreid aan bod gekomen in de al eerder genoemde serie artikelen over de geschiedenis van veiligheidskunde (zie Oostendorp e.a., 2013). Hierin is de opkomst van reliability engineering, operations research, risicoanalyses voor ruimtelijke-orderingsbesluiten en het politieke antwoord in Nederland met de Commissie voor Preventie van Rampen (CPR) besproken. Deze commissie publiceerde de serie unieke gekeurde boeken, die een belangrijke input waren voor de Seveso richtlijnen

en aanpassingen. De eerste richtlijn werd in 1982 van kracht en omvatte een lijst met industriële activiteiten en gevaarlijke stoffen met drempelwaarden. In dezelfde periode was de Arbeidsinspectie zeer actief en publiceerde in haar voorlichtingsreeks, de V- en de R-serie, onder andere publicaties over de HAZOP-techniek, over procesveiligheidsanalyses en over gevaardetectiesystemen (DGA 1979, 1981, 1984a, b). Ook in het vakblad *De Veiligheid* (later MAO) werd, net als in de voorafgaande periode, regelmatig over procesveiligheid en probabilistische risicotekniken gepubliceerd (Hanken en Andreas, 1980; Leeuwen, 1982; Dop, 1981; 1984, 1985). In 1983 verscheen een artikel over de Management Oversight and Risk Tree (MORT), een Amerikaanse diepte-analysetechniek van systeemfalen die tien jaar eerder was gepubliceerd (Zuuren, 1983b). Opvallend genoeg kwamen de theorieën en metaforen van Perrow (normal accidents), Weick (high reliability organisations) en Reason (resident pathogens) niet in het tijdschrift aan de orde. Wel werd de discussie over de kwaliteit en de consequenties van uitkomsten van risicoanalyses voortgezet. Op de experts na, begreep niemand de getallen die uit een QRA verschenen, was het commentaar (Bjordan, 1980). QRA werd opgevat als een verwetenschappelijking van de angst van burgers (Irwin, 1984; Eindhoven, 1984). Behalve de getallen was risicoperceptie, de mate waarin groepen bereid zijn om risico's accepteren, een onderwerp waar veel onderzoek naar werd gedaan en dat deels zijn weg naar het vakblad vond (Stallen, 1980; Stallen en Vlek, 1980; Andreas, 1981). Een ander onderwerp was het gedrag van werknemers in geautomatiseerde procesomgevingen. De taxonomie van het gedrag van operators en onderhoudstechnici in complexe technologische systemen, het skill-rule-knowledge-model van Rasmussen en Reason werden een aantal keren in het vakblad behandeld (Kolkman, 1980, 1981; Stassen, 1981). Dit onderwerp was eveneens het thema van Andrew Hale, die in 1984 aangesteld werd als hoogleraar Veiligheidskunde aan de toenmalige Delftse Technische Hogeschool (Hale 1985) en die later met een co-auteur het veiligheidskundige handboek 'Individual behaviour in the control of danger' uitbracht (Hale en Glendon, 1987). Informatieverwerking wordt, volgens dit handboek, gezien als een sterk punt van operators en onderhoudstechnici en soms worden er fouten gemaakt waardoor systemen af konden wijken van hun ontwerpvelop. Maar dezelfde operator is ook goed in het oplossen van complexe problemen en kan via detectie en herstelactiviteiten het systeem weer in zijn normale functionaliteit terug krijgen. Een systeem kan ook te ver uit controle raken. De oorzaken moeten dan volgens de auteurs niet primair bij de mens worden gezocht, maar bij onvoldoende kennis en beheersing van het systeem, of bij een overbelasting aan informatie, of bij managementbeslissingen die geen of onvoldoende rekening houden met dominante rampscenario's. Procesveiligheid werd een dermate ingewikkeld onderwerp dat er behoefte ontstond aan een academische opleiding voor veiligheid en aan veiligheid in de reguliere academische chemie en

scheikundige technologie (Lemkowitz en Zwaard, 1988). De TH Delft en de Universiteit van Amsterdam hebben hierin het voortouw genomen (Sectie Veiligheidskunde, 1983; Hale 1987). De volgende paragraaf bespreekt in detail de ontwikkelingen die door Shell zijn geïnitieerd.

Casus Shell

De ontwikkeling in het denken over veiligheid kreeg een sterke impuls door het werk van Wagenaar (1941-2011). In de jaren zeventig deed hij onderzoek aan het Instituut voor Zintuigfysiologie TNO naar beslisprocessen en factoren die het nemen van een beslissing konden beïnvloeden. In 1982 maakte hij de overstap naar de Universiteit Leiden waar hij als hoogleraar functioneel onderzoek startte naar de aard en oorsprong van menselijke fouten. Zijn oratie ging over de vraag wie er nu eigenlijk verantwoordelijk was voor de ramp met het Leidse kruischip in 1807 (Wagenaar, 1983). Zijn conclusie was dat de verantwoordelijkheid leggen bij een onoplettende schipper niet de optimale strategie was om dergelijke rampen te voorkomen. De Stichting Coördinatie Maritiem Onderzoek gunde aan TNO en de Universiteit Leiden onderzoek om een nadere analyse te maken van menselijk falen in de scheepvaart. Er werden 100 scheepvaartongevallen, die al door de Raad voor de Scheepvaart waren onderzocht, opnieuw geanalyseerd met behulp van een checklist voor de luchtvaart, ontwikkeld door Feggetter (1982). De bijdragende factoren werden geclassificeerd in drie subsystemen: het cognitieve, sociale en situationele systeem. Het bleek dat bij 28% van alle ongevallen een menselijke fout de hoofdoorzaak was en een menselijke fout ook altijd mede-oorzaak was wanneer er technische oorzaken waren (Wagenaar en Groeneweg, 1987). Dit maakte het de moeite waard om de rol van de mens nader te beschouwen. Uit deze onderzoeken bleek ook dat de ongevallen zo complex van aard waren dat het de individuele betrokkenen niet kon worden aangerekend dat ze de consequenties van hun gedrag niet (helemaal) konden voorzien. Het begrip 'onmogelijke ongevallen' werd geïntroduceerd: de ongevallen waren zo divers van aard, ernst en omvang, dat het vooraf niet te voorspellen was wat er zou gebeuren als mensen een fout zouden maken. Hun aandeel in de gebeurtenis kan hoogstens achteraf worden vastgesteld. Veel effectiever bleek het om op zoek te gaan naar de oorzaak van de menselijke fouten: de conclusie daarvan was, dat op het niveau van oorzaken van ongevallen veel minder diversiteit was. Doordat men die oorzaken heeft kunnen rubriceren en elimineren konden hele klassen van ongevallen worden voorkomen. De bron van deze oorzaken bleek vooral op managementniveau in de organisatie te liggen. Deze analyse is vervolgens met telkens de zelfde conclusies herhaald op industriële ongevallen bij de NAM en foutieve geweldsaanwendingen door de politie (Groeneweg, 2002).

Het scheepvaartonderzoek trok de aandacht van de Koninklijke Olie/Shell groep, afdeling Exploratie en Productie. Een van de topmanagers, Van Engelshoven,

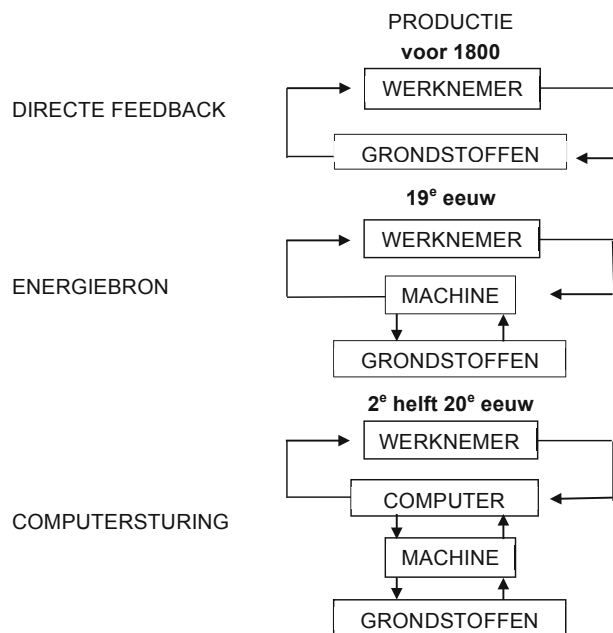
vond met name het aantal doden die vielen door de activiteiten van Shell volstrekt onacceptabel. Hij gaf een van zijn managers, Koos Visser, de opdracht een aanpak te vinden om dit aantal te verminderen. Geïnspireerd door de presentaties van Wagenaar op dit gebied besloot hij in 1988 de Universiteit Leiden samen met Reason van de Victoria Universiteit in Manchester een driejarig contract aan te bieden voor onderzoek: 'Proposal for a research project Safety in the field: From Jungle to Board Room'. Er moest een theorie ontwikkeld worden over hoe ongevallen ontstaan, instrumenten ontwikkeld om informatie te krijgen van de werkvloer over de aanwezigheid van wat destijds 'local triggers' en 'resident pathogens' werden genoemd en tenslotte moesten er methoden worden ontwikkeld om veiligheid te managen. Het project kreeg de naam 'Tripod', naar een driepotige hond uit een Shell auditrapport uit Gabon die ten onrechte werd afgemaakt omdat hij verdacht werd van het hebben van hondsdoelheid. Deze naam inspireerde Wagenaar tot een tekening op een bierviltje van het model dat voor het eerst gepubliceerd werd in een rapport over het al in 1987 gestarte onderzoek naar oorzaken en achtergronden van ongevallen bij de NAM (Groeneweg en Wagenaar, 1989). Volgens dit model zijn ongevallen het gevolg van onveilige handelingen in specifieke omstandigheden. Hoewel deze vrijwel niet voorspelbaar zijn, zeker niet tot in detail, hebben ze slechts een beperkt aantal onderliggende oorzaken: de 'General Failure Types' (GFT's). De GFT's zijn gebaseerd op een uit de literatuur gedestilleerde lijst van door de organisatie te beheersen factoren. Als deze GFT's niet goed gemanaged zijn, verhogen ze de kans dat mensen fouten maken. Enkele voorbeelden zijn: ergonomisch ontwerp, procedures en regels, opleiding en communicatie. Van de elf GFT's waren er tien die te maken hebben met 'normale bedrijfsvoering' en hebben nauwelijks direct betrekking op veiligheid. Veiligheid wordt gezien als het eindresultaat van optimaal beheerde bedrijfsprocessen. Het model was dan ook generiek toepasbaar: elke organisatie kon zelf invulling geven aan wat voor hen relevante aspecten van de GFT's waren. Een koekjesfabriek is geen boorplatform, maar slecht ontwerp is slecht ontwerp. De elfde GFT, Defences, was er om de veiligheidsinspanningen van een bedrijf in kaart te brengen. Het eerste deel van het onderzoek was vooral een zoektocht naar indicatoren waaruit de mate van beheersing van de GFT's bleek (Tripod Delta). Later werd ook een instrument ontwikkeld om uit analyses van ongevallen te achterhalen welke GFT's een rol gespeeld hadden (Tripod Beta). In 1987/1988 was Reason al bezig met het schrijven van zijn boek 'Human error' (Reason, 1990). In de eerste versie gaf hij in hoofdstuk 7 een overzicht van het veiligheidsdenken vanaf de oude Grieken. Zijn collega Brehmer merkte op dat dit een saai stuk was en Reason besloot een nieuw hoofdstuk te schrijven, 'Latent errors and system disasters' (Reason, 2013), waarin hij deze nieuwe kijk op human error-preventie presenteerde aan de hand van analyses van bekende rampen uit die periode zoals de Herald of Free Enterprise en Tjernobyl. Wagenaar groeide

uit tot 'bekende Nederlander' en werd daarmee een van de eerste experts op het gebied van menselijk falen en veiligheid die de status van 'media-ster' kreeg. Veel van het denken over de rol van de organisatie als mogelijke bron van menselijke fouten en het ontstaan van rampen, dat ook nu nog actueel is, was dus al ontwikkeld voor de explosie op Piper Alpha.

Discussie en conclusie

Dit literatuuroverzicht geeft inzicht in de kennisontwikkeling van het managen van veiligheid en van het ongevalsproces, voor zowel het domein van de arbeidsveiligheid als van de procesindustrie, of meer in het algemeen de high-energy-high-risk-bedrijven. Het betekent niet per definitie dat die kennis en denkbeelden in het wetenschappelijke en het professionele domein gangbaar zijn in de periode waarin ze zijn ontstaan. Soms sterft kennis, soms duurt het jaren of decennia voordat denkbeelden worden geaccepteerd. Dit geldt bijvoorbeeld voor het concept veiligheidsklimaat, voor het afwijkgingsmodel en voor de IJEM risicofactoren. Deze drie voorbeelden komen uit de arbeidsveiligheid. In vergelijking met procesveiligheid, dat gestuurd wordt door de majeure ongevallen, is de kennisontwikkeling in de arbeidsveiligheid beperkter van omvang. De tabellen 4 (arbeidsveiligheid) en 5 (procesveiligheid) geven hier een overzicht van. Deze tabellen geven eveneens een antwoord op de gestelde onderzoeksvragen.

In het arbeidsveiligheidsdomein zijn de menselijke foutmodellen populair in de vakpers. Dat blijkt niet alleen uit Nederlandse publicaties van de vakbeweging en wetenschapswinkels. Volgens Scandinavische en Amerikaanse bronnen en uit publicaties van de British Society for Social Responsibility in Science (BSSRS) gold dat voor verscheidene landen (Kjellén, 1984c; Purswell en Rumar, 1984). In deze periode drong het besef door van de complexiteit van arbeidsongevallen en de relatie met processtoringen. Een vergelijkbare ontwikkeling werd zichtbaar in de hoge-risico bedrijven en activiteiten, waar de term 'socio-technische systemen' uit de voorgaande periode gemeengoed werd en het begrip 'latente factoren' zijn intrede deed. Bijlage 1 laat een indrukwekkend overzicht zien van majeure ongevallen die geen of slechts lokale publiciteit hebben gekregen. Het was de periode van de opkomst van Loss Prevention, een onderzoeksgebied dat door de Brit Frank Lees een volwaardige wetenschappelijke aanzien heeft gekregen. Zijn landgenoot Trevor Kletz was een voorvechter van inherente veiligheid in de procesindustrie. Zijn publicaties blonken uit in praktische toepasbaarheid, de vele voorbeelden en de aansprekende one-liners. De systeembenadering uit de procesveiligheid vond zijn toepassing in de arbeidsveiligheid. Menselijke fouten zijn geen oorzaken van ongevallen, maar consequenties van interacties tijdens processtoringen. In deze benadering klinken de opvattingen door van Winsemius uit de jaren vijftig en de ergonomische benadering uit het Verenigd Koninkrijk uit de jaren zestig (zie Swuste e.a., 2014), hoewel slechts spaarzaam naar deze auteurs wordt



Figuur 12 Evolutie van de industrie, naar Purwell en Rumar 1984

gerefereerd. Later werden de termen 'latente fouten' en 'onmogelijke ongevallen' geïntroduceerd. De organisatie kwam in beeld en de menselijke fout werd opnieuw gedefinieerd. Deze verandering is schematisch weer-gegeven in figuur 12.

Van een directe terugkoppeling van werknemer naar taak, het handwerk waar de snelheid van productie door de werknemer wordt bepaald, veranderde de relatie fundamenteel in de 19^e eeuw. Met de mechanisering, de introductie van een externe krachtbron, steeg de productie enorm en bepaalde de machine de productiesnelheid. De werknemer werd nu bediener van de machine, die ook storingen moest verhelpen. Mentale taken zoals aandacht namen toe als gevolg van een hogere snelheid. De kennis van de manager zat onder de pet van de werknemer. De afstand tussen de werknemer en de energiebron bleef kort en veroorzaakte grote aantallen machine-gerelateerde ongevallen, zoals in het eerste deel van de artikelenreeks is beschreven.

Deze mechanisering van de productie heeft een enorme technologische ontwikkeling doorgemaakt. De menselijke schakel in het systeem is nauwelijks veranderd. De veiligheid wordt bepaald door de interacties in het systeem en niet door slechts één component, de werknemer. Veiligheid is nu de verantwoordelijkheid geworden van de ontwerper van de machines en van het productieproces en van de manager die het proces beheert.

De tweede helft van de 20^e eeuw was de tijd van de afstandsbediening en automatisering van processen. Met de introductie van de nieuwe technologie (nt), zoals de industriële ontwikkeling wordt aangeduid, veranderde de taak wederom aanzienlijk. De controle van de geautomatiseerde processen kwam in handen van computers, de productievolumes stijgen evenals de complexiteit van

het proces. De invloed van de mens beperkte zich tot het diagnosticeren van procesvorderingen en ingrijpen tijdens processtoringen. De afstand tot een potentiële gevaarbron werd weliswaar groter, maar ook de cognitieve taken van de front line operator, die slechts sporadisch wordt aangesproken. Dit leidt tot serieuze vormen van onderbelasting. Tegelijkertijd is het de vraag of werknemers, die slechts beperkt worden uitgedaagd een adequaat mentaal model hebben van de complexe processen

en van de storingen die mogelijk zijn. De relatie tussen cognitieve fouten en ongevallen is niet duidelijk. Net als tijdens mechanisering is de theorie van fouten feitelijk een theorie van interacties, van variabele menselijke beperkingen en situationele factoren. Veiligheid is nog steeds een verantwoordelijkheid van managers, de beheerders van processen. Maar grote ongevallen hebben consequenties buiten fabriekspoorten, waardoor veiligheid ook een politiek onderwerp wordt.

Tabel 4 Arbeidsveiligheid, theorieën, modellen, metaforen en managementstromingen in de periode 1979-1988

jaar	theorieën	modellen, metaforen	veiligheidsmanagement	management stromingen
1979				
1980		Positieve feedback Sulzer-US Systeemmodel Shannon-UK Veiligheidsklimaat Zohar-Israël		
1981		Afwijkingsmodel Kjellén-Zweden		
1982	Risico homeostase Wilde-Canada			Total Quality Management Deming-US
1983		IJEM risicofactoren Faverge-ILO		In search for excellence Peters-US
1984		Informatiemodel Saari-Finland		The change masters Kanter-US
1985			ISRS Bird & Germain-US	
1986				Images of organizations Morgan-US
1987		Ongevalsepidemiologie Stout-US Menselijk gedrag Hale, Glendon-Nederland Classificatie gedrag Rasmussen-Bad Hombrug		
1988				

Tabel 5 Procesveiligheid, theorieën, modellen, metaforen en managementstromingen (1979-1988)

jaar	grote ongevallen	theorieën, modellen, metaforen	veiligheidsmanagement	management stromingen
1979	3 Mile Island Harrisburg PA			
1980		System Safety Lees-UK		
1981		Risico triplet $R = \{<s_i, p_i, x_i>\}$ Kaplan-US		
1982		Skill-rule-knowledge Rasmussen-Den		Total Quality Management Deming-US
1983				In search for excellence Peters-US
1984	Bhopal, Mexico City	Normal Accidents Perrow-US		The change masters Kanter-US
1985		Inherent veilig ontwerp Kletz-UK	Loss Control Management	
1986	Challenger, Tjernobyl			Images of organizations, Morgan-US
1987	Zeebrugge	Resistent pathogeen Reason-UK High reliability organisations Weick-US Onmogelijke ongevallen Wagenaar-NI		
1988	Piper Alpha, Clapham Junction	3E's (equipment-equations-experiments) Kletz-UK Fallacy of defence in depth Rasmussen-Den	Resilience Wildavsky-US Classificering bedrijfsreacties	

De dominante benadering in Amerika, die ook van invloed was in Europa, was wezenlijk anders. Daar werden databestanden van faalkansen van componenten en van menselijke fouten opgezet. Er waren tegenstrijdige reacties op deze vorm van kwantificering van veiligheid. In dichtbevolkte gebieden met hoge risico bedrijven, zoals in Nederland, werd de kwantificering van veiligheid onderdeel van het ruimtelijke ordeningsproces (zie voor details Oostendorp e.a., 2013). De kritiek betrof de acceptatie van risico's en meer in het algemeen de consequenties van kwantificering. Lage faalkansen zullen in de tijd toenemen, omdat een kleine kans geen aandacht krijgt, terwijl een hoge faalkans zal dalen als gevolg van de aandacht die een organisatie eraan besteedt.

Een relatie tussen algemene managementontwikkelingen, veiligheidstheorieën en -modellen en het managen van veiligheid is niet vanzelfsprekend en zal voor de periode niet altijd aantoonbaar zijn. Algemene managementontwikkelingen zijn gebaseerd op marktontwikkelingen en op productie-efficiëntie, terwijl de andere twee onderwerpen hun oorsprong vinden in de arbeids- of procesveiligheid. Veiligheidsmanagement is in deze periode meegelift met kwaliteitsmanagement en pas serieus genomen na de ramp bij Piper Alpha, die feitelijk als een 'wake-up call' heeft gefunctioneerd. Modellen zijn overgenomen, evenals argumenten waarom veiligheid, net als kwaliteit, een belangrijk onderwerp zou zijn. Dat lijkt slechts ten dele gelukt. Ongevalse- en rampscenari's vonden maar moeilijk ingang in veiligheidsmanagement. De kwaliteitskringen uit de TQM benadering kregen geen veiligheidskundige navolging om bijvoorbeeld frequenties van processtoringen te beperken. Wel kreeg veiligheidskundig onderzoek en onderwijs in Westerse landen een academische status. Zo werd in Nederland veiligheid wetenschappelijk volwassen met de aanstellingen van Willem Wagenaar in 1982 aan de Rijksuniversiteit van Leiden, in 1984 gevolgd door Andrew Hale aan de Technische Universiteit Delft. Dat ging niet zonder slag of stoot. Beide leerstoelen ondervonden veel weerstand van de bestaande faculteiten.

Literatuur

- Andersen R Langeröf E (1983). Accident data in the new Swedish information system on occupational injuries. *Ergonomics* 26(1):33-42
- Andreas H (1979). Veiligheid en systeembenadering. *De Veiligheid* 55(11):605-609
- Anoniem (1979). Democratiseren en humanisering van de arbeid. Arbeidsomstandighedenbeleid van Minister Albeda zoals neergelegd in de Memorie van Toelichting op de Begroting van het ministerie van Sociale Zaken voor 1980. *De Veiligheid* 55(10):505-508
- Anoniem (1980a). Zorg voor menswaardige arbeid. Arbeidsomstandighedenbeleid van Minister Albeda zoals neergelegd in de Memorie van Toelichting op de Begroting van het ministerie van Sociale Zaken voor 1981. *De Veiligheid* 56(10):495-499
- Anoniem (1980b). U speelt te wild met uw kinderen en verrekt een spier – ga drie plaatsten terug. *Mare*, weekblad Rijksuniversiteit Leiden 18 september p. 9-11
- Anoniem (1982). Het Swain veiligheidsproject. *De Veiligheid* 58(11):21-24
- Anoniem (1983). Veiligheid tot welke prijs. *De Veiligheid* 59(4):189-191, 199
- Baker A (1982). The role of physical simulation experiments in the investigation of accidents. *Journal of Occupational Accidents* 4:33-45
- Barnett R Brickman D (1986). Safety hierarchy. *Journal of Safety Research* 17:49-55
- Beek F ter Fransen R Kerklaan P Swuste P (1982) Cyanamid. *Risicobulletin* 4(1):5-8
- Benner L (1975). Accident investigation. Multilinear events sequencing methods. *Journal of Safety Research* 7(2):67-73
- Benner L (1985). Rating accident models and investigation methodologies. *Journal of Safety Research* 16:105-126
- Bird F Germain G (1985). Practical loss control leadership. International Loss Control Institute, Loganville, Georgia
- Björdal E (1980). Zijn risicoanalyses verouderd? *De Veiligheid* 56(12):627-629
- Blijswijk M van Mutgeert B (1987). Al denkend en pratend worden mensen meer veiligheidsbewust. Swain project DSM. *Maandblad voor Arbeidsomstandigheden* 63(4):232-237
- Boonstra J (1983). Een paradox in veiligheids- en gezondheidszorg. *Tijdschrift voor Sociale Gezondheidszorg* 61(13):450-457
- Boonstra J (1983/4). Veiligheid tot welke prijs. *Risicobulletin* 5(5-6):15-18; 6(1):12-16; 6(3):8-13; 6(5):12-15
- Boudri H (1979). Ergonomie en veiligheid, een veelzijdige benadering. *De Veiligheid* 55(4):183-184
- Buitelaar W Vreeman R (1985). Vakbondswerk en kwaliteit van de arbeid, voorbeelden van werknemersonderzoek in de Nederlandse industrie. PhD thesis, TH Delft
- Chhokar J Wallin J (1984). Improving safety through applied behaviour analysis. *Journal of Safety Research* 15:141-151
- Clarke D (2008). A Tribute to Trevor Kletz. *Journal of System Safety* 44(6), http://www.system-safety.org/ejss/past/novdec2008ejss/spotlight1_p1.php
- Cohen H Jensen R (1985). Measuring the effectiveness of an industrial lift truck safety training program. *Journal of Safety Research* 15:125-135
- Collins J Pizatella T Etherton J Trump T (1986). The use of simulation for developing safe workstation design for mechanical power presses. *Journal of Safety Research* 17:73-79
- Comeche S (1979). Veiligheidsproblemen bij het ontwerpen van machines. *De Veiligheid* 55(3):109-113
- Compes P (1982). Perspectives of accident research by safety science. *Journal of Occupational Accidents* 4:105-119
- Conrad J (1980) (ed). *Society Technology and risk assessment*. Academic Press London
- Covello V Lave L Moghissi A Uppuluri V (1987). Uncertainty in risk assessment, risk management and decision making. *Advances in risk analysis*, Plenum Press, New York
- Cullen W (1990). *The Public Inquiry into the Piper Alpha Disaster*. Department of Energy, Her Majesty's Stationary Office, London
- Daft R Weick K (1984). Model of organisations as interpretation systems. *Academy of Man Review* 9(2):284-295
- Deming W (1982). *Out of crisis, quality, productivity and competitive position*. Cambridge University Press, Cambridge
- DGA Directoraat generaal van de Arbeid – Arbeidsinspectie (1979). Hazard and operability study, why? when? how? Report R nr 3E of the Directorate General of Labour of the Ministry of Social Affairs, Voorburg
- DGA Directoraat Generaal van de Arbeid – Arbeidsinspectie (1981). *Storingsanalyse, waarom, wanneer, hoe*. Directoraat generaal van de Arbeid. Voorlichtingsblad V2
- DGA Directoraat generaal van de Arbeid – Arbeidsinspectie (1984a). *Instrumentele beveiligings- en gevaardetectiesys-*

- teemen in de procesindustrie. Enkele principes en grondslagen. Voorlichtingsblad V6. Directoraat –Generaal van de Arbeid, Voorburg
- DGA Directoraat generaal van de Arbeid – Arbeidsinspectie (1984b). Procesveiligheidsanalyse. Aanzet tot het opsporen van inherente procesgevaaren. Voorlichtingsblad V7. Directoraat –Generaal van de Arbeid, Voorburg
- Dop G (1981). Catastrofe theorie (1-3). De Veiligheid 57(4):165-168, 57(5):217-220, 57(6):273-276
- Dop H (1984). Bedrijfszekerheid en technische veiligheid. Leven met de wet van Murphy. De Veiligheid 60(9):433-437
- Dop H (1985). Kansberekening toepassing in techniek en veiligheid. De Veiligheid 61(4):179-180; Toeval en kansberekening. De Veiligheid 61(6):299-301
- Duyvis J (1979). Raakvlakken bedrijfsveiligheid – privéveiligheid. De Veiligheid 55(6):309-310
- Eberts R Salvendy G (1986). The contribution of cognitive engineering to safe design of CAM. Journal of Occupational Accidents 8:49-67
- Eindhoven J (1984). Wetenschappelijke benadering van risico een meta controverse. Wetenschap en Samenleving (3):17-22
- Eisner H Leger J (1988). The International Safety Rating System in South African Mining. Journal of Occupational Accidents 10:141-160
- Faverge, F (1983). Accidents, human factor. In: Parmeggiani L (ed) Encyclopaedia of Occupational Health and Safety, 3rd revised edition. International labour Office, Geneva
- Feggetter A (1982). A method for investigating human factor aspects of aircraft accidents and incidents. Ergonomics 25:1065-1075
- Fellner D Sulzer B (1984). Increasing industrial safety practices and conditions through posted feedback. Journal of Safety Research 15:7-21
- Fischhoff B Lichtenstein S Slovic P Derby S Keeney R (1981). Acceptable risk. Cambridge University Press, Cambridge
- Fischhoff B Furby L Gregory R (1987). Evaluating voluntary risk of injury. Accident Analysis & Prevention 19(1):51-62
- Frijters A Swuste P Yperen (2008). Is veiligheid in de bouw meetbaar te maken. Tijdschrift voor toegepaste Arbowedenschap 21(2):39-46
- Greisler D (1999). William Edward Deming: the man. Journal of Management History 5(8):434-453
- Groeneweg J (2002). Controlling the Controllable, preventing business upsets 5th revised edition, Leiden: Global Safety Group
- Groeneweg J Wagenaar W (1989). Ongevalspreventie bij de NAM, een geïntegreerde aanpak Leiden: Werkgroep Veiligheid, Rijksuniversiteit te Leiden, R-89/30
- Grondstrom R Jarl T Thorson J (1980). Serious occupational accidents – an investigation of causes. Journal of Occupational Accidents 2:283-289
- Guastello S (1991). Some further evaluations if the International Safety Rating System. Safety Science 14:253-259
- Gulijk C van Swuste P Zwaard W (2009). Ontwikkeling van veiligheidskunde in het interbellum en de bijdrage van Heinrich. Tijdschrift voor toegepaste Arbowedenschap 22(3):80-95
- Haddon W (1968). The changing approach to the epidemiology, prevention, and amelioration of trauma: the transition to approaches etiologically rather than descriptive based. American Journal of Public Health 58(8):1431-1438
- Haddon W (1973). Energy damage and the ten countermeasure strategies. Human Factors 15(4):355-366
- Haddon W (1980). Advances in the epidemiology of injuries as a basis for public policy. Public Health Reports 95(5):411-421
- Häkkinen K (1982). The progress of technology and safety in materials handling. Journal of Occupational Accidents 4:157-163
- Hale A (1985). De menselijke paradox in technologie en veiligheid. Inaugurale rede THDelft
- Hale A (1987). Opleidingen in veiligheid. Risicobulletin 9(4):11-12
- Hale A Glendon A (1987). Individual behaviour in the control of danger. Industrial safety Series Volume 2, Elsevier, Amsterdam
- Hanken A Andreas H (1980). Systeemleer en veiligheid. De Veiligheid 56(12):603-609
- Harms-Ringdahl L (1987a). Safety analysis in design. Evaluation of a case study. Accident Analysis & Prevention 19(4):305-317
- Harms-Ringdahl L (1987b). Safety Analysis. Elsevier Applied Science, London
- Hattem B van (1980). Het veiligheids- en gezondheidswerk in de industriebond NVV. De Veiligheid 56(11):583-587
- Hauer E (1980). Bias by selection Overestimation of the effectiveness of countermeasures. Accident Analysis & Prevention 12:113-117
- Hauer E (1983). Reflection on methods of statistical inference in research on the effect of countermeasures. Accident Analysis & Prevention 15(4):275-285
- Hawkins F (1987). Human Factors in flight. Gover Technical Press, Aldershot, Hant, UK
- Heinrich W Petersen D Roos N (1980). Industrial Accident Prevention, a safety management approach. McGraw-Hill Books, New York
- Hofstede G (1978). The poverty of management control philosophy. Academy of Management Review 3(3):450-461
- Hollnagel E Pedersen O Rasmussen J (1981). Notes on human performance analysis. Risø-M-2285, Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark
- Hollnagel E (1983). Human error. Position paper NATO conference on human error, Bellagio Italy
- Hovden J Sten T (1984). The workers as a safety resource in modern production systems. Journal of Occupational Accidents 6(1-3):213-214
- HSE (1985). Health and Safety Executive. Monitoring safety. Occasional Paper Series OP9. HMSO London
- Hubbard R Neil J (1985). Major and minor accidents at the Thames barrier construction site. Journal of Occupational Accidents 7:147-164
- ILO (1988). International Labour Office, Major Hazard Control, a practical manual. ILO, Geneva
- Irwin A (1984). Risico analyse Wie kiest er in wetenschap en technologie. Wetenschap en Samenleving (3):7-9
- ISO 9000 (1987) International Organisation for standardisation, Quality Management and Quality Assurance Standards, Geneva
- Jong M de Poll K (1984). Ergonomische normen en richtlijnen voor aangedreven handgereedschap. De Veiligheid 60(12):609-612
- Judt T (2012). Thinking the twentieth century. Penguin books, London
- Juran J (1951). Quality control handbook. McGraw-Hill Book Company New York
- Juran J Barish N (1955). Case studies in industrial management. McGraw Hill Book Company New York
- Kaplan S Garrick J (1981). On the quantitative definition of risk. Risk Analysis 1(1):11-27
- Kemeny J (1979). Report of the Presidential Commission on the accident at Three Mile Island, the need for change: the legacy of TMI, Washington DC
- Keyser V de (1979). De menselijke factor en het ongeval. De Veiligheid 55(12):633-637
- Keyser V de Qvale T Wilpert B Ruiz Quintanilla S (1988). The meaning of work and technological options. John Wiley & Sons Ltd, Chichester
- Kjellén U Larsson T (1981). Investigating accidents and reducing risk. Safety Science 3(2):129-140

- Kjellén U (1982). An evaluation of safety information systems at 6 firms. *Journal of Occupational Accidents* 3:273-288
- Kjellén U (1984a). The deviation concept in occupational accident control I definition and classification. *Accident Analysis & Prevention* 16(4):289-307
- Kjellén U (1984b). The role of deviations in accident causation. *Journal of Occupational Accidents* 6:117-126
- Kjellén U (1984c). The deviation concept in occupational accident control II data collection and assessment of significance. *Accident Analysis & Prevention* 16(4):307-323
- Kjellén U (1987). Simulating the use of computerised injury near miss information. An evaluation of safety information systems. *Journal of Occupational Accidents* 9:87-105
- Kletz T (1978). 'What You Don't Have Can't Leak'. *Chemistry and Industry*, 6:287-292
- Kletz T (1982). Human problems with computer control. *Plant/Operation Progress* 1(4):209-211
- Kletz T (1984a). Accident investigation How far should we go. *Plant/Operation Progress* 3(1):1-2
- Kletz T (1984b). The Flixborough explosion 10 years later. *Plant/Operation Progress* 3(3):133-135
- Kletz T (1984c). Cheaper, safer plants. Institute of Chemical Engineers, Rugby
- Kletz T (1985a). What went wrong? Gulf Publishing Company, Houston
- Kletz T (1985b). An engineer's view of human error. Institute Chemical Engineers, Rugby, Warwickshire, UK 1st edition 1985, 2nd edition 1991
- Kletz T (1985c). Inherently safer plants. *Plant/Operation Progress* 4(3):164-167
- Kletz T (1986b). Transportation of hazardous substances. *Plant Operation/Progress* 5(3):160-164
- Kletz T (1988a). Learning from accidents in industry. Butterworths, London
- Kletz T (1988b). Should undergraduates be instructed in loss prevention. *Plant/Operation Progress* 7(2):95-98
- Kletz T (1988c). On the need to publish more case histories. *Plant/Operation Progress* 7(3):145-147
- Kletz T (1988d). Fires and explosions of hydrocarbon oxidation plants. *Plant/Operation Progress* 7(4):226-230
- Kletz T (1999). The origins and history of Loss Prevention. *Process Safety* 77(3):109-116
- Kolkman H (1980). De menselijke fout in beveiligingssystemen. *De Veiligheid* 56(12):621-622
- Kolkman H (1981). Nogmaals, de menselijke fout in beveiligingssystemen. *De Veiligheid* 57(4):177-178
- Kortjens, G (1988). Tijdschrift voor toegepaste Arbowedenschap een voldongen feit. *Maandblad voor Arbeidsomstandigheden* 64(3):73
- Kraan (1981). Factor mensch. *De Veiligheid* 57(7/8):329-330
- Kuhlmann A (1986). Introduction to Safety Science Springer. Verlag, New York
- Le Coze J (2014) Reflecting on Jens Rasmussen's legacy. *Safety Science*, special issue WOS 2012 (in press)
- Leeuwen C van (1982). De veiligheidskundige op weg van fenomeen bestrijding naar systeembenadering. *De Veiligheid* 58(6):33-34
- Lees F (1980). Loss prevention in the process industry. Butterworth Heinemann, Oxford
- Lees F (1983). The relative risk from materials in storage and in production. *Journal of Hazardous Materials* 8(2):185-190
- Lees F (1996). Loss prevention in the process industry. Hazard Identification, assessment and control. Butterworth Heinemann, Oxford
- Leij van der (1979). Veiligheidsdoorlichting nuttig en haalbaar? *De Veiligheid* 55(5):269-272
- Leitner P (1999). Japans post-war economic success: Deming, quality and contextual realities. *Journal of Management History* 5(8):489-505
- Lemkowitz A Zwaard A (1988). Veiligheids- en milieu-onderwijs moet in het onderwijspakket. *Chemisch Magazine* (11):708-712
- Leplat J (1984). Occupational accidents research and system approach. *Journal of Occupational Accidents* 6:77-89
- Mannan S (2005) (ed). Lees' Loss prevention in the process industry. Hazard Identification, assessment and control. 3rd edition. Butterworth Heinemann, Oxford
- Mannan S (2012) (ed). Lees' Loss prevention in the process industry. Hazard Identification, assessment and control. 4th edition. Butterworth Heinemann, Oxford
- Marsh (2012). The 100 Largest Losses 1972-2011 22nd edition Marsh & McLennan Co
- McElroy F (1980). Accident Prevention Manual of Industrial Operations. Engineering and technology. National safety Council, Chicago, Ill
- McKenna F (1985a). Do safety measures really work. *Ergonomics* 28(2):489-498
- McKenna F (1985b). Evidence and assumptions relevant to risk homeostasis. *Ergonomics* 28(11):1539-1542
- Menckel E Carter N (1985). The development and evaluation of accident prevention routines, a case study. *Journal of Safety Research* 16:73-82
- Miller T Hoskin A Yalung D (1987). A procedure for annually estimating wage losses due to accidents in the US. *Journal of Safety Research* 18:101-119
- Monteau M (1983). In: Parmeggiani L (ed) Encyclopaedia of Occupational Health and Safety, 3rd revised edition. International labour Office, Geneva
- Morgan G (1986). Images of organizations. Sage Publications, London
- Moss Kanter R (1984). The change masters, corporate entrepreneurs at work. George Allen & Unwin, London
- Nye D (2013). America's assembly line. The MIT Press, Cambridge MA
- Oirbons J (1981). Arbeidscommissies voor veiligheid, gezondheid en welzijn. *De Veiligheid* 57(11):483-486
- Oostendorp Y Zwaard W Lemkowitz S Gulijk C van Swuste P (2013). Introductie van het begrip risico binnen de veiligheidskunde in Nederland. *Tijdschrift voor toegepaste Arbowedenschap* 26(3-4):75-91
- Paté-Cornell E Boykin R (1987). Probabilistic risk analysis and safety regulation in the chemical industry. *Journal of Hazardous materials* 15(1-2):97-122
- Perrow C (1984). Normal accidents. living with high-risk technologies. BasicBooks, US
- Peters T Waterman R (1982). In search for excellence, lessons from America's best-run companies. Harper & Row Publisher, New York
- Pietersen C (2009). 25 jaar later, de twee grootste industriële rampen met gevaarlijke stoffen. Het onderzoek naar de feiten, lessen voor veiligheid gevaarlijke stoffen en zijn de lessen geleerd? Gelling Publishing, Nieuwerkerk aan den IJssel
- Pindur W Rogers S Kim P (1995). The history of management: a global perspective. *Journal of Management History* 1(1):59-77
- Poll K (1984). Normen voor tillen. *De Veiligheid* 60(5):281-285
- Poll K (1983). Ergonomische arbeidsplaatsverbetering. *De Veiligheid* 59(12):615-618
- Purswell J Rumar K (1984). Occupational accident research: where have we been and where are we going? *Safety Science* 6:219-228
- Putman J (1986). Onvoldoende kennis en vaardigheden oorzaak van groot aantal ongevallen. *Maandblad voor Arbeidsomstan-*

- digheden 62(12):746-751
- Rafaat H Abdouni A (1987). Development of an expert system for human reliability analysis. *Journal of Occupational Accidents* 9:137-152
- Rasmussen J (1980). What can be learned from human error reports? In: *Changes in working life*. Duncan K (ed) John Wiley & Sons Ltd, London
- Rasmussen J Lind M (1982). A model for human decision making. *MP3 2:30 IEE Transactions on systems* 270-276
- Rasmussen J (1982). Human errors A taxonomy for describing human malfunctioning. *Journal of Occupational Accidents* 4(2-4):311-333
- Rasmussen J (1983). Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. *IEEE Transactions on systems man and cybernetics* SMC 13(3):257-266
- Rasmussen J Duncan K Leplat J (1987). *New Technology and human error*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester
- Rasmussen J Reason J (1987) *Causes, and human error, in New Technology and Human Error*, Wiley, London, 1987
- Rasmussen J (1988a). Human error mechanisms in complex working environments. *Reliability Engineering and System Safety* 22:155-167
- Rasmussen J (1988b). Human factor in high risk systems. *IEEE Transactions on systems man and cybernetics* SMC 18:43-48
- Redactie (1986). Het werkelijke gevaar van de menselijke fout. *Maandblad voor Arbeidsomstandigheden* 62(7/8):445
- Reason J (1987). The Chernobyl errors. *Bulletin of the British Psychological Society* 40:201-206
- Reason J (1990). *Human error* Cambridge University Press.
- Reason J (2013). *A life in error. From little slips to big disasters*, Asgate
- Roberts K (1988). Some characteristics of one type of high reliability organization. *Organization Science* 1(2):160-176
- Roberts A Pritchard D (1982). Blast effect of unconfined vapour cloud explosions. *Journal of Occupational Accidents* 3:231-247
- Robinson G (1982). Accidents and sociotechnical systems principles for design. *Accident Analysis & Prevention* 14(2):121-130
- Rochlin G (1986). High reliability organisations and technical change. Some ethical problems and dilemma. *IEEE Technology and Society Magazine*, September;3-9
- Rochlin G La Porte T Roberts K (1987). The self-designing high reliability organisation: aircraft carrier flight operation at sea. *Naval War College Review* 40:76-90
- Roos A (1979). Humanisering van de arbeid, wat houdt het in. *De Veiligheid* 55(7/8):384-387
- Saari J (1982). Summary theme accidents and progress in technology. *Journal of Occupational Accidents* 4:373-378
- Saari (1984). Accidents and disturbances in the flow of information. *Journal of Occupational Accidents* 6(1-3):91-105
- Sectie Veiligheidskunde (1983). *Verslag symposium veiligheidskundige opleiding in Nederland*. THDelft, 26 jan
- Short J (1984). The social fabric at risk: towards the social transformation of risk analysis. *American Sociological Review* 49(6):711-725
- Shrivastava P Mitroff I Miller D Miglani A (1988). Understanding industrial crises. *Journal of Management Studies* 25(4):285-303
- Shrivastava P (1992). *Bhopal anatomy of a crisis*. Paul Chapman Publishing Ltd London
- Shannon H (1980). The use of a model to record and store data on accidents. *Journal of Occupational Accidents* 3:57-65
- Shannon H Manning D (1980). Differences between lost time and non-lost-time accidents. *Safety Science* 2:265-272
- Shewhart W Deming W (1939). *Statistical methods quality control*. The Graduate School. The Department of Agriculture. Washington
- Singleton W (1984). Future trends in accident research in European countries. *Journal of Occupational Accidents* 6:3-12
- Sluis W (1983). Veiligheid tot welke prijs. Vrijheid verantwoordelijkheid en democratisering moeten de veiligheid tot stand brengen. *De Veiligheid* 59(10):519-521; Eigen initiatief moet meer ruimte krijgen. *De Veiligheid* 59(11):581-582; Hoe werken veranderingen in op de feitelijke veiligheid. *De Veiligheid* 59(12):606-607
- Sluis W (1984). Humanisering van de arbeid bevordert sociaal beleid en doelmatigheid in organisaties. *De Veiligheid* 60(5):267-269
- Stassen H (1981). Mens-machine systemen. *De Veiligheid* 57(9):391-396
- Stallen P (1980). De individuele beoordeling van risico's. *De Veiligheid* 56(1):3-7
- Stallen P Vlek C (1980). De individuele beoordeling van risico's. *De Veiligheid* 56(2):67-73
- Suokas J (1985). On the reliability and validity of safety analysis. Thesis Tampere University
- Suokas J (1988). The role of safety analysis in accident prevention. *Accident Analysis & Prevention* 20(1):67-85
- Stout N (1987). Characteristics of work related injuries involving forklift trucks. *Journal of Safety Research* 18:179-190
- Sulzer-Azaroff B Santamaria C de (1980). Industrial safety hazard reduction. *Journal of Applied Behavioural Analysis* 13:287-295
- Sulzer-Azaroff B (1987). The modification of occupational safety behaviour. *Journal of Occupational Accidents* 9:177-197
- Swain A Guttman H (1983). *Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications*. NUREG/CR-1278, USNRC
- Swuste P Gulijk C van Zwaard W (2009). *Ongevalscausaliteit in de negentiende en in de eerste helft van de twintigste eeuw, de opkomst van de brokkenmakers-theorie in de Verenigde Staten, Groot-Brittannië en Nederland*. Tijdschrift voor toegepaste Arbowedenschap 22(2):46-63
- Swuste P Gulijk C van Zwaard W Oostendorp Y (2011). Veiligheidstheorieën, -modellen en metaforen in de drie decennia na de Tweede Wereldoorlog, in de Verenigde Staten, Groot-Brittannië en Nederland. Tijdschrift voor toegepaste Arbowedenschap 24(3):79-91
- Swuste P Gulijk C van Zwaard W Oostendorp Y Groeneweg J (2014). *Veiligheidsmanagement en -systemen vanaf de 19e eeuw tot heden, een overzicht van Engels- en Nederlandstalige literatuur, deel 1: 19e eeuw tot 1979*. Tijdschrift voor toegepaste Arbowedenschap 27(3):84-105
- Templer J Archea J Cohen H (1985). Study of factors associated with risk of work related stairway falls. *Journal of Safety Research* 16:183-196
- Tuominen R Saari J (1982). A model for analysis of accidents and its application. *Journal of Occupational Accidents* 4(2-4):263-273
- Tombs S (1988). The management of safety in the process industry: a redefinition. *Journal of Loss Prevention in the process industry* 1:179-181
- Turner B (1978). *Man-made disasters*. Butterworth-Heinemann Oxford
- Vernooy A (1988). *Naar een tijdschrift voor Arbowedenschap*. Tijdschrift voor Arbowedenschap 1(1):1-2 wetenschappelijk katern behorend bij Maandblad voor Arbeidsomstandigheden 1988;64(5)
- Vinzant J Vinzant D (1999). Strategic management spin-offs of the Deming approach. *Journal of Management History* 5(8):516-531
- Vreeman R (1982). *De kwaliteit van de arbeid in de Nederlandse industrie*. SUN, Nijmegen (D, L) werknemersonderzoek naar de kwaliteit van de arbeid

Wagenaar W (1983). Menselijk falen. Nederlands Tijdschrift voor de Psychologie, 38:209 – 222

Wagenaar W Groeneweg J (1987). Accidents at sea Multiple causes and impossible consequences International. Journal of man-machine studies 27:587-598

Weick K (1974). Middle range theories of social systems. Behavioural Science 19(6):357-367

Weick K (1979). The social psychology of organizing. Addison-Wesley Publishing Company Readings, Massachusetts

Weick K (1987). Organisational culture as a source of high reliability. California. Man Review 29(2):112-127

Westrum R (1988). Organisational and inter-organisational thought. Contribution to the World Bank Conference Safety control and risk management, October

Wikipedia, Zwaailichten.org, geraadpleegd juni 2014

Wildavsky A (1988). Searching for Safety. Social Philosophy and Policy Center, Transaction Publishers, Rutgers The State University, Piscataway NJ

Wilde G (1982). The Theory of Risk Homeostasis: Implications for Safety and Health. Risk analysis 2(4):209-225

Wilde G (1986). Beyond the concept of risk homeostasis: suggestions for research and application towards the prevention of accidents and lifestyle-related disease. Accident Analysis & Prevention 18(5):377-401

Zohar D (1980a). Safety climate in industrial organisations. Journal of Applied Psychology 65(1):96-102

Zohar D (1980b). Het veiligheidsklimaat in bedrijfsorganisaties. De Veiligheid 56(11): 551-555

Zuuren P van (1983a). Veiligheidspsychologie. De Veiligheid 59(5):265-266

Zuuren P van (1983b). MORT een nieuwe benadering van de bedrijfsveiligheid. De Veiligheid 59(1):27-30

Zwam H van (1979a). Veiligheidsbeïnvloeding: de werker en zijn motieven. De Veiligheid 55(1):11-16

Zwam H van (1979b). De regulering van veiligheidsgedrag. De Veiligheid 55(5):215-221

Bijlage 1 Ernstige ongevallen in de olie- en procesindustrie, 1979-1988. (Lees 1996; Mannan, 2005; Marsh, 2012; Wikipedia, 2014)

Datum	Locatie	Plant/transport	Chemicaliën	Gebeurtenis	Gewonden- gew; doden-†	Kosten milj \$
1979, 11-dec	Australië – Geelong	Opslag	Olie	Brand		17.4
10-nov	Canada - Mississauga, Ont	Tankwagon	Cl ₂	Emissie		
6-jan	Duitsland – Burghausen	Chemisch bedrijf	H ₂ S	Emissie		
6-feb	Duitsland – Bremen	Meelfabriek	Meelstof	Explosie	14†, 17 gew	
	Duitsland – Hamburg	Graansilo	Graanstof	Stofexplosie	2 gew	
8-jan	Ierland - Bantry Bay	Olietanker	Ruwe olie	Explosie	50†	31.9
11-jan	Noorwegen - Rafnes	Chemie bedrijf	Cl ₂	Emissie		
15 feb	Poland Rotunda Bank			Gaswolk explosie	36†	
11-dec	Puerto Rico - Ponce	Tank	HC's	Explosie		23.3
17-okt	Spanje - Lerida	Graansilo	Graanstof	Stofexplosie	7†	
24-nov	Turkije - Danaciobasi			Gaswolk explosie	105†	
20-mrt	US - Linden, NJ	Cat Kraker	LPG	Gaswolk brand		27.1
8-apr	US - Crestview, FL	Tangwagon	Gevaarlijke stoffen	Emissie	14 gew	
19-apr	US - Port Neches, TX	Olietanker	Ruwe olie	Explosie		49.6
26-jun	US - Ypsilanti, MI	Opslag	C ₃ H ₈	Gaswolk explosie		
21-jul	US - Texas City, TX	Alkylering eenheid	C ₃ H ₈	Gaswolk explosie		37.2
18-jul	US - Bayonne NJ	Tankwagon	Cl ₂	Emissie	10†	
28-jul	US - Sauget, IL	Reactor	Mengsel	Explosie		11.9
30-aug	US - Good Hope, LA	Tank aak	C ₄ H ₁₀	Vuurbal	12†, 25 gew	16.4
Aug	US - Orange, TX	Buisleiding	LPG	Explosie	1†, 1 gew	
1-sep	US - Deer Park, TX	Tanker - Chevron	Destillaat	Explosie		105.4
4-sep	US - Pierre Port, LA	Buisleiding	LNG	Gaswolk brand		
8-sep	US - Paxton, TX	Tankwagon	Chemicaliën	BLEVE	8 gew	
18-sep	US - Torrance, CA	Cat Kraker	C ₃ C ₄ HC's	Gaswolk explosie		
6-okt	US - Cove Point, MD	Buisleiding	LNG	Explosie	1†, 1 gew	
1-nov	US - Galveston Bay, TX	Olietanker	Ruwe olie	Explosie	32	
1980, 26-jun	Australië - Sydney	Oven, raffinaderij	Olie	Explosie		25.0
26-feb	Canada - Brooks, AB	Compressie station	Aardgas	Explosie		55.6
18-aug	Iran - Gach Saran	Opslag	C ₃ H ₅ (NO ₃) ₃	Grote explosie	80†, 45 gew	
16-aug	Japan - Shizuoka			Gaswolk explosie	15†	
	Italië - Napels	Graan silo	Graan stof	Stofexplosie	0†, 8 gew	
8-okt	Mexico - Mexico City	Laadstation	NH ₄ OH	Emissie	9†, 28 gew	
26-mrt	Nederland - Enschede		C ₃ H ₈	Gaswolk explosie		
24-jul	Nederland - Rotterdam	Olietanker	Ruwe olie	Schip		
30-jan	Porto Rica - Bayamon	Buisleiding	Olie producten	Explosie	1†, 0 gew	
29-nov	Spanje - Ortuella	Opslag	C ₃ H ₈	Explosie	51†, 0 gew	
21-jan	UK - Barking	Opslag	NaClO ₃	Brand		
11-feb	UK - Longport	Opslag	LPG	Brand, explosie		
20-nov	UK - Wealdstone	Opslag	C ₃ H ₈	Emissie	0†, 1 gew	

Datum	Locatie	Plant/transport	Chemicaliën	Gebeurtenis	Gewonden- gew; doden-†	Kosten milj \$
3-jan	US - Acobn, CA	Raffinaderij		Sabotage		20.9
20-jan	US - Borger, TX	Alkylering eenheid	Lichte CH's	Gaswolk explosie	0†, 41 gew	48.5
3-mrt	US - Los Angeles. CA	Tankwagen	Benzine	BLEVE	2†, 2 gew	
17-mei	US - Deer Park, TX	Phenolaceton plant		Brand		28.8
15-jul	US - New Orleans, LA	Buisleiding	Aardgas	Brand		
23-jul	US - Seadrift, TX	C ₂ H ₄ O reactor	Reactie mengsel	Detonatie		16.4
26-jul	US - Muldraugh, KY	Tankwagon	H ₂ C=CHCl	Brand	0†, 4 gew	
21-okt	US - New Castle, DE	Polypropyleen plant	C ₆ H ₁₄ , C ₃ H ₆	Gaswolk explosie	5†, 25 gew	
29-okt	US - New Castle, DE	platform		Gaswolk explosie		
25-nov	US - Kenner, LA	Tankwagen	Benzine	Brand	7†, 6 gew	
31-dec	US - Corpus Christi, TX	H ₂ kraker	HC's	Brand		23.6
1981, 30-aug	Kuwait - Shuaiba	Opslag	Olie	Brand	1†, 1 gew	
1-aug	Mexico - Montana	Tankwagon	Cl ₂	Emissie	17†, 280 gew	
24-jun	Nederland - Rotterdam	Ore-Bulk-Oil Schip	Olie	Explosie	6†, 3 gew	
1-okt	Tsjecho-Slowakije	NH ₃ plant	Syngas	Gaswolk explosie		
6-sep	UK - Stalybridge	Oplosmiddel unit	C ₆ H ₁₄	Explosie		
11-feb	US - Chicago Heights, IL	Tank	Tank content	Explosie		17.4
19-jul	US - Greens Bay, TX	Reactor	Herbiciden	Explosie		13
15-mei	Venezuela - San Rafael	Buisleiding	LPG	Explosie	18†, 35 gew	
8-mei	Zweden - Gotenburg	Buisleiding	C ₃ H ₈	Gaswolk explosie	1†, 2 gew	
1982, 20-jan	Canada - McMurray, AB	Compressor	H ₂	Brand		24.6
18-apr	Canada - Edmonton, AB	Compressor	C ₂ H ₄	Explosie		24.6
17-jan	Frankrijk - Moselle rivier	Buisleiding	CO	Emissie	5†, 0 gew	
29-dec	Italië - Florence	Tankwagen	C ₃ H ₈	Explosie	5†, 30 gew	
31 mrt	Japan - Kashima	Ontzwavel eenheid	HC's	Brand		16.3
13-feb	UK - Morley	Opslag	Herbiciden	Brand, emissie		
25-sep	UK - Salford	Opslag	NaClO ₃	Explosie	0†, 60 gew	
9-mrt	US - Philadelphia, PA	Phenolplant	C ₆ H ₅ C ₃ H ₆	Gaswolk explosie		29.3
3-mei	US - Caldecott tunnel, CA	Tankwagon	Benzine	Brand	7†, 0 gew	
28-jun	US - Portales, NM	Buisleiding	Aardgas	Explosie	6†, 0 gew	
28-sep	US - Livingston, LA	Tankwagen	Mix	Detonatie, BLEVE		
1-okt	US - Pine Bluff, AR	Buisleiding	Aardgas	Gaswolk explosie		
4-okt	US - Freeport, TX	Transformator	Olie	Brand		17.2
4-nov	US - Hudson, IA	Buisleiding	Aardgas	Explosie	5†, 0 gew	
19-dec	Venezuela - Caracas	Tank	Olieschuim	Brand	150†, >500 gew	58.9
1983, 14-apr	India - Bontang	LNG plant	LNG	Explosie		
2-nov	India - Dhurabar	Tankwagon	Kerosine	Explosie	47†, 0 gew	
7-dec	Polen - Łódź			Gaswolk explosie	8†	
30-aug	UK - Milford Haven	Tank	Ruwe olie	Brand	0†, 20 gew	
25-sep	UK - Salford	Opslag	NaClO ₃	Explosie	0†, 60 gew	
7-jan	US - Port Newark, NJ	Tank	benzine	Gaswolk explosie	1†, 0 gew	40.3
15-mrt	US - West Odessa, TX	Buisleiding	LPG	Brand, explosie	6 †, 0 gew	
3-apr	US - Denver, CO	Tankwagon	HNO ₃	Emissie		
7-apr	US - Avon, CA	Cat Kraker	Slurry	Brand		56.3
26-mei	US - Bloomfiels, NM	Compressor station	Aardgas	Explosie	0†, 2 gew	
26-mei	US - Produoe Bay, AK	Drums	Vloeibaar aardgas	Brand		40.3
1-jul	US - Port Arthur, TX	Polyethyleen plant		Brand		17.8
30-jul	US - Baton Rouge, LA	Tankwagon	H ₂ C=CHCl	Brand		
30-sep	US - Basile, LA	Gas plant	HC's	Gaswolk brand		33.9
1984, 24-feb	Brazil - Cubatao	Buisleiding	Benzine	Brand	>100†, 150 gew	
16-aug	Brazil - Petrobas Campos			Explosie	49†	
20-apr	Canada - Sarnia, Ont	Benzeen plant	H ₂	Gaswolk explosie	2†, 0 gew	
15-aug	Canada - McMurray, AB	Kookeenheid	HC's	Gaswolk brand		85.9
8 mrt	India - Kerala	Kookeenheid	HC's	Explosie		13.6
3-dec	India - Bhopal	Tank	CH ₃ NCO	Emissie	>4000†, ? Gew	
19-nov	Mexico - Mexico City	Terminal	LPG	Gaswolk brand	650†, ? Gew	22.5
23-mei	UK - Abbeystead	Klep	CH ₄	Explosie	16†, 28 gew	
15-sep	UK - Cheshire	Chemische plant		Brand		

Datum	Locatie	Plant/transport	Chemicaliën	Gebeurtenis	Gewonden- gew; doden-†	Kosten milj \$
23-jul	US - Romeoville, IL	Absorptie kolom	C ₃ H ₈	Gaswolk explosie	15†, 22 gew	
25-sep	US - Phoenix, AZ	Buisleiding	Aardgas	Explosie		
2-dec	USSR - Tbilisi			Gaswolk explosie	200†	
13-dec	Venezuela - Las Piedras	Ontzwaveling	Olie	Brand		70.1
1985, 19-feb	Canada - Edmonton, AB	buisleiding	Vloeibaar aardgas	Gaswolk explosie		
18-jan	Duitsland - Keulen	Ethyleen plant	C ₂ H ₄	Gaswolk explosie		
19-mei	Italië - Priola	Ethyleen plant	HC's	Brand		72.8
21-dec	Italië - Napels	Terminal		Brand		
10-jan	Nederland - Den Helder	Visfabriek	Cl ₂	Emissie	0†, 31 gew	
23-jan	US - Wood River, IL	Asfalt unit	C ₃ H ₈	Gaswolk brand		25.2
23-feb	US - Jackson, SC	Tankwagen		Emissie		
23-feb	US - Sharpville, PA	Buisleiding	Aardgas	Explosie		
9 mrt	US - Lake Charles, LA	Reforming eenheid	C ₃ H ₈	Gaswolk explosie		
27-apr	US - Beaumont, KY	Buisleiding	Aardgas	Brand	5†, 3 gew	
9-jun	US - Pine Bluff, AR	Tankwagon	Gevaarlijke stoffen	Emissie		
25-jun	US - Hallet, OK	Vuurwerk		Explosie	21†	
6-jul	US - Clinton, IA	Ammonia plant	Syngas	Explosie		14.7
23-jul	US - Kaycee, WY	Buisleiding	Vliegtuigbrandstof	Explosie	1†, 6 gew	
5-nov	US - Mont Belvieu, TX	Zoutopslag	C ₂ H ₆ , C ₃ H ₈	Gaswolk explosie		44.8
21-nov	US - Tioga, ND	Gas productie	HC's	Gaswolk explosie		11.3
1986, 24-feb	Griekenland - Thessaloníki	Olie terminal	Olie	Brand		
21-feb	US - Lancaster, KY	Buisleiding	Aardgas	Brand	3†, 0 gew	
15-jun	US - Pascagoula, MS	Destillatie kolom	C ₆ H ₅ NH ₂	Explosie		
30-okt	Zwitserland - Basel	Opslag	Pesticiden	Emissie		
1987, 3-jul	België - Antwerpen	Destillatie kolom	C ₂ H ₄ O	Explosie		
23-jun	Can. - Mississauga, Ont	Waterstof	H ₂ , HC's	Brand		22.4
11-okt	Canada - McMurray, AB	Oliezand winning	Oliezand	Brand		39.7
17-dec	Canada - Rowan Gorilla	Platform		Gaswolk explosie	0†	
23-aug	China - Lanzhou	Tankwagon	Benzine	Brand	5†, 0 gew	
2-jun	Frankrijk - Port Herriot	Opslag	Olie	Brand	2†, 8 gew	
24-feb	Griekenl. - Thessaloníki	Olie terminal	Olie	Brand		
24-feb	Nederl. - Alphen a/d Rijn		Cl ₂	Emissie	0†, 30 gew	
10-jun	Nederland - Zeewolde	Zwembad	Cl ₂	Emissie	0†, 94 gew	
15-aug	Saoudi A. - Ras Tanura	Gas plant	C ₃ H ₈	Gaswolk explosie		67.2
22 mrt	UK - Grangemouth	Scheidingsschip	H ₂	Brand		87.9
4-nov	US - Golf van Mexico	Platform		Explosie		
14-nov	US - Pampa, TX	Azijnzuur plant	C ₄ H ₁₀ , CH ₃ COOH	Gaswolk explosie	3†, 0 gew	24.1
24-nov	US - Torrance, CA	Alkylering eenheid	HC's	Brand		16.4
20-dec	US - Cook Inlet, AK	Platform		Brand		
1988, 24-apr	Brazilië - Enchchova	Platform	Olie	Brand	0†	690
7-apr	Nederland - Beek	Polyethyleen plant	C ₂ H ₄	Gaswolk explosie		
8-sep	Noorwegen - Rafnes	Vinylchloride plant	C ₂ H ₃ Cl, C ₂ H ₄	Gaswolk explosie		12.0
25-okt	Singap. - Pulau Merlimau	Tanks	Nafta	Brand		13.1
7-july	UK - Piper Alpha	Olie-gas platform	Olie-gas	Explosie	167†, 61 gew	1800
2-jan	US - Floreffe, PA	Tank	Diesel	Emissie		14.5
4-mei	US - Hendersen, NV	CH ₄ ClO ₄ productie	CH ₄ ClO ₄	Explosie	2†, 372 gew	630
5-mei	US - Norco, IA	Cat kraker	HC's	Gaswolk explosie	7†, 28 gew	327
5-mei	US - Norco, LA	Raffinaderij	HC's	Gaswolk explosie	7†, 48 gew	600
8-jun	US - Port Arthur, IX	Opslag	C ₃ H ₈	Brand		17.4
30-jul	US - Altoona, IA	Tankwagon	Gevaarlijke stoffen	Emissie		
4-jun	USSR - Arzamas	Station	Explosieven	Explosie	73†, 230 gew	