

Op weg naar een veiligere chemische industrie door middel van inherent veilig ontwerpen

Santiago Echeverri, Genserik Reniers, Pieter van Gelder
17 December 2019
Technische Universiteit Delft

Samenvatting

Om inherent veilig ontwerpen (Inherently Safer Design - ISD) op operationeel niveau in de chemische industrie in te voeren, zijn verschillende methoden, indices en instrumenten ontwikkeld. De bijbehorende filosofie en principes dienen echter op strategisch niveau te worden versterkt om obstakels vanuit managementperspectief te overwinnen. Zo hebben onderzoekers onder meer ontdekt dat het ontbreekt aan bewustzijn en kennis van ISD, dat er een tekort is aan innovatie, onderzoek en ontwikkeling met betrekking tot ISD, en dat ISD wordt verwaarloosd bij de onderzoeksrapportage van incidenten. Het invoeren van een ISD-filosofie en de bijbehorende principes in de intellectuele, gedragsmatige en procedurele dimensie zou een garantie zijn voor de stabiliteit van de ISD-mentaliteit in de totale procescyclus (onderzoek, concept- en detailontwerp, bediening & onderhoud en buitengebruikstelling). In dit onderzoek stellen we een benadering voor om de ISD-filosofie concreet te maken voor bedrijven. Daartoe hebben we verschillende mechanismen en dimensies geanalyseerd om bedrijven aan te moedigen deze filosofie op strategisch niveau in te voeren. Als eerste presenteren we de obstakels voor het implementeren van ISD op strategisch niveau als uitgangspunt voor ons onderzoek. Als tweede hebben we op basis van literatuuronderzoek de voornaamste capaciteiten vastgesteld om inherent veilig ontwerpen in de chemische industrie te implementeren: leiderschap, strategische eenheid, talent, kennis, samenwerking, innovatie en efficiëntie. Als derde stellen we een routekaart voor om de principes van inherent veilig ontwerpen op de korte, middellange en lange termijn in te voeren. Op basis van de genoemde capaciteiten omvatte onze analyse het identificeren van integratiemogelijkheden tussen bijvoorbeeld programma's voor innovatie en veiligheidsverbeteringen om mogelijkheden voor product- en bedrijfsprocessen wat betreft inherent veiliger ontwerpen te opperen. Om de betreffende ideeën door de hele organisatie te verspreiden, hebben we de relatie tussen actoren op het gebied van planning, fabricage en bediening & onderhoud geanalyseerd. We stellen een uitgebreide stapsgewijze benadering voor om veiligere technologische en niet-technologisch opties te definiëren gedurende de verschillende stadia in de procescyclus, waaronder: het selecteren van knooppunten, het selecteren van teamprojecten, het identificeren van risico's, het identificeren van ISD-alternatieven, het identificeren van mogelijke combinaties, het creëren van een voorlopig portfolio met ISD-mogelijkheden, het beoordelen van veiligheidsgerelateerde en economische aspecten en het rangschikken van ISD-alternatieven. Ten slotte hebben we een onderzoeks casus geanalyseerd bij een proces voor kooldioxideafvang, waarbij procesmatige en organisatorische initiatieven zijn geïdentificeerd, met inbegrip van menselijke factoren.

Sleutelwoorden: Inherent veilig ontwerpen, Inherently Safer Design (ISD), veiligheidsbeheer, strategie.

1. Inleiding

De chemische industrie in Nederland is een toonaangevende bedrijfssector, waarbij 19 van de 25 grootste chemische bedrijven zijn verdeeld over acht chemische clusters. In 2017 waren er negen sterfgevallen te betreuren in de productiesector (de sector waar de chemische verwerkingsindustrie onder valt) (Eurostat, 2019). Om precies te zijn vonden in de verwerkingsindustrie in Nederland tussen 2005 en 2009 de volgende incidenten plaats: explosies bij PerkinElmer (Groningen, 2005), Nerefco (Rotterdam, 2006) en Vopak (Rotterdam, 2008), en brand bij Kelco (Nijmegen, 2009) (Swuste et al., 2020). Vanuit het perspectief van inherente veiligheid zijn er dus strategieën nodig om de verwerkingsindustrie veiliger te maken.

Het concept van inherent veilig ontwerpen werd begin jaren '70 voor het eerst geïntroduceerd door prof. Trevor Kletz om risico's tijdens de vroege ontwerpstadia van chemische processen permanent uit te sluiten of te beperken in plaats van deze te beheersen. Inherente veiligheid hangt in feite samen met de intrinsieke eigenschappen van het proces. Het idee is om risico's uit te sluiten in plaats van ze te beheersen door middel van later toegevoegde beveiligingssystemen (Khan & Amyotte, 2002). ISD is gebaseerd op de principes van minimaliseren, vervangen, matigen en vereenvoudigen (Hendershot, 1997, 2011; T. A. Kletz, 1985). Maar de ISD-principes alleen zijn niet genoeg om een goed

functionerend kader voor ontwerp en gebruik te creëren; ze moeten vergezeld gaan van een basisfilosofie, tactische oplossingen en een scala van specifieke indicatoren en instrumenten.

Om de vruchten van ISD te plukken, dient het al in de eerste fase van het procesontwerp te worden toegepast, hoewel een optimaal procesontwerp op basis van de ISD-filosofie nog steeds moet worden aangevuld met uitbreidingen, beveiligingsvoorzieningen en standaardprocedures (Jafari et al., 2018). De inherent veiligere manier van werken moet een mentaliteit en een automatisme worden (Hendershot, 1997). Derhalve *willen wij vaststellen hoe een combinatie van competenties en middelen kan worden ontwikkeld om ISD-opties te implementeren in producten, processen en organisatiestructuren om zo de chemische industrie veiliger te maken.*

De volgende hoofdstukken zijn daarom bedoeld om oplossingen op strategisch niveau te identificeren die kunnen bijdragen aan het concretiseren van de filosofie van inherent veilig ontwerpen ten behoeve van de chemische industrie. In **hoofdstuk 2** presenteren we eerst de probleemstelling en de verschillende obstakels vanuit strategisch oogpunt. In **hoofdstuk 3** worden vervolgens de methodieken beschreven voor alle stappen die we in ons onderzoek hebben geformuleerd. In **hoofdstuk 4** presenteren we de resultaten van het literatuuronderzoek naar de betreffende capaciteiten. Naast een routekaart om de ISD-filosofie in te voeren, bevat dit hoofdstuk een analyse van de stimuli en integratiemogelijkheden van diverse actoren die moeten worden geïntroduceerd zodat ideeën zich door de organisatie kunnen verspreiden. Daarnaast is aan dit hoofdstuk een onderzoekscasus over kooldioxideafvang toegevoegd. Ten slotte worden in **hoofdstuk 5** de conclusies gepresenteerd aan de hand van de vragen die we in ons onderzoek hebben gesteld.

2. Probleemstelling: welke obstakels kent de chemische industrie bij het invoeren van inherent veilig ontwerpen in haar strategie?

Onderzoekers en de industrie zelf hebben een aantal obstakels op strategisch vlak geïdentificeerd om de ISD-filosofie in te voeren. De volgende obstakels hebben rechtstreeks impact op het managementperspectief (Jafari et al., 2018): (a) het ontbreken van bewustzijn en kennis (van managementniveau tot werkvloer), (b) het ontbreken van geschikte (bij)scholingsmogelijkheden, (c) zwakke veiligheidscultuur, (d) zwak veranderingsmanagement, (e) het ontbreken van uitgebreide systemen voor veiligheidsbeheer, (f) gebrek aan innovatie, onderzoek en ontwikkeling, (g) het ontbreken van geschikte beoordelingsinstrumenten voor ISD, (h) moeilijkheden bij het implementeren van ISD in bestaande installaties, en (i) de verwaarlozing van een 'ISD-mentaliteit' in de onderzoeksrapportage van incidenten.

Op basis van deze obstakels zijn we tot de volgende onderzoeksvraag gekomen: *hoe kan een combinatie van competenties en middelen worden ontwikkeld om ISD-opties te implementeren in producten, processen en organisatiestructuren om de chemische industrie veiliger te maken?* Dat leidde tot onderstaande subvragen om specifieke strategieën en verbanden te identificeren.

- i. *Welke managementcapaciteiten zijn vereist om ISD in de strategie van een onderneming te implementeren?*
- ii. *Hoe kunnen bedrijven de ISD-filosofie in hun ondernemingsstrategie integreren? En wat voor interne programma's kunnen op basis van deze benadering bijdragen aan het implementeren van ISD in de levenscyclus? Welke methodiek kan worden gebruikt om betere ideeën ten aanzien van inherent veilig ontwerpen te genereren?*
- iii. *Welke stimuli en integraties dienen te worden geïntroduceerd om te zorgen dat ISD-opties door de hele keten - van de organisatie zelf tot leverancier en afnemer - kunnen doordringen? En is er enig verband tussen interne programma's en ISD-strategieën?*

In de volgende hoofdstukken ontwikkelen we op basis van de gestelde subvragen een benadering die de chemische industrie moet aansporen om de ISD-filosofie in te voeren.

3. Methodiek

In de literatuur is inherent veilig ontwerpen vanuit verschillende perspectieven onderzocht. Sommige onderzoekers hebben zich gericht op de definitie van ISD-principes en op specifieke toepassingen van de ISD-filosofie. Andere onderzoekers hebben zich gericht op methodieken en indicatoren. Wij waren geïnteresseerd in het identificeren van

veelbelovende initiatieven bij bedrijven om ISD vanuit strategisch oogpunt te implementeren. Daartoe hebben we de onderstaande stappen gevolgd.

- a) Het identificeren van managementcapaciteiten is gebaseerd op literatuuronderzoek conform de PRISMA-procedure (Moher, Liberati, Tetzlaff, Altman, & Group, 2009), waarbij de belangrijkste onderzoekspapers via de volgende stappen zijn geselecteerd: selectie, screening, geschiktheid en opname. Bij het bepalen van de literatuur is naast suggesties door experts gebruik gemaakt van de citatie-indices Scopus en Web of Science. In dit stadium zijn de volgende sleutelwoorden gebruikt: ‘inherent veilig ontwerpen’, ‘strategie’ en ‘veiligheidsbeheer’, in samenhang met de volgende industrieën: ‘chemische industrie’ en ‘verwerkingsindustrie’, ‘chemie’, ‘kernenergie’, ‘luchtvaart’, ‘ruimtevaart’ en ‘spoorwegen’, met inbegrip van daaraan gerelateerde synoniemen. Gedurende de screeningsfase zijn de samenvattingen bestudeerd. Ten slotte zijn in de laatste fase de belangrijkste onderzoekspapers geselecteerd. Deze analyse is aangevuld met onderzoeken op het gebied van organisatorische capaciteiten (Teece, Pisano, & Shuen, 1997; Ulrich & Smallwood, 2004).
- b) In de voorgestelde routekaart zijn activiteiten benoemd voor elke capaciteit die in de voorafgaande analyse was geïdentificeerd. Vervolgens zijn deze activiteiten op een tijdschaal uitgezet om de betreffende competenties met betrekking tot ISD te ontwikkelen of te versterken. Het verband tussen de obstakels op managementniveau en de organisatorische capaciteiten droeg bij aan het selecteren van de kenmerken van iedere activiteit.
- c) In het geval van stimuli en integratie van diverse actoren die moeten worden geïntroduceerd om te zorgen dat ISD-opties zich door de organisatie kunnen verspreiden, hebben we ons in onze analyse gericht op het verbinden van de innovatiestructuur zoals beschreven in het Oslo-handboek (OECD/Eurostat, 2018) met de bronnen voor technische innovatie zoals onderzocht door Hucheson *et al.* (Hucheson, Pearson, & Ball, 1996).
- d) Als illustratie voor het herkennen van risico's en van de relevante ISD-opties is een chemisch proces uitgekozen. Op basis van deze analyse is een aantal inherent veiligere alternatieven geopperd. Er is echter aanvullend onderzoek nodig om deze alternatieven te rangschikken.

4. Resultaten

De ISD-filosofie is zowel vanuit technisch oogpunt als vanuit managementperspectief geanalyseerd. De studie legde de nadruk op de managementstrategieën die kunnen bijdragen aan het succesvol invoeren van de filosofie in de chemische verwerkingsindustrie. De resultaten worden gestuurd door de vragen die we in ons onderzoek hebben voorgesteld.

4.1 Welke managementcapaciteiten zijn vereist om ISD in de strategie van een onderneming te implementeren?

Ervan uitgaande dat het management de ISD-filosofie wil invoeren, is het vanuit strategisch oogpunt relevant om de bijbehorende managementcapaciteiten te identificeren die in de chemische industrie zijn vereist. Organisatorische capaciteiten stellen een onderneming in staat kennis in resultaten om te zetten (Ulrich & Smallwood, 2004). “De term ‘capaciteiten’ benadrukt de sleutelrol van strategisch management in het adequaat aanpassen, integreren en herconfigureren van interne en externe organisatorische vaardigheden, middelen en functionele competenties om tegemoet te komen aan de eisen van een veranderende omgeving” (Teece et al., 1997).

Tabel 1. Managementcapaciteiten die de invoering van de ISD-filosofie ondersteunen.

Capaciteit	Verwijzingen
Leiderschap	<ul style="list-style-type: none"> ✓ “Op alle niveaus van de onderneming moeten managers de voordelen van inherente veiligheid inzien en hun toewijding aan dergelijke programma's concreet maken: door middelen beschikbaar te stellen en beleid en procedures vast te stellen om de toepassing van inherente veiligheid in de context van het algehele programma voor veiligheidsbeheer van de onderneming te integreren” (CCPS, 2009). ✓ Een veiligheidscultuur waarin veiligheid als fundamentele waarde wordt bevorderd en versterkt is inherent veiliger dan een cultuur waarin dit niet het geval is (CCPS, 2009). ✓ Het management dient te zorgen voor een toepasselijke cultuur voor procesveiligheid (Amyotte & Eckhoff, 2010; T. Kletz & Amyotte, 2010).

Capaciteit	Verwijzingen
	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Het management zet zich in om technologische en niet-technologische veiligheidsinitiatieven door te voeren, waaronder proposities met betrekking tot menselijke factoren (CCPS, 2009). ✓ De cultuur van de organisatie beïnvloedt menselijke prestaties (CCPS, 2009).
Strategische eenheid	<p>‘Strategische eenheid’ omvat drie dimensies: de intellectuele, de gedragsmatige en de procedurele dimensie (Ulrich & Smallwood, 2004).</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Intellectuele dimensie: medewerkers van managementniveau tot werkvloer weten wat de strategie rondom ISD is en waarom het belangrijk is. ✓ Gedragsmatige dimensie: medewerkers steunen de strategie en passen de ISD-principes gedurende de procescyclus toe. ✓ Procedurele dimensie: de ISD-principes worden gereflecteerd in standaarden en/of daaraan verwante officiële documenten. Bij het opstellen en implementeren van ISD-standaarden hebben bedrijven als Dow hoge veiligheidsprestaties in hun operationele activiteiten verwezenlijkt (Overton & King, 2006). <p>✓ Een technologie wordt alleen inherent veiliger wanneer deze systematisch in het ontwerp van processen, apparatuur en (menselijke) systemen in een eenheid, installatie of bedrijf wordt geïntegreerd (CCPS, 2009).</p>
Talent	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Bekwaam personeel (Dalzell & Chesterman, 1997): zorg ervoor dat het juiste talent zich op de juiste plaats in de organisatie bevindt (Ulrich & Smallwood, 2004). ✓ Het personeel dat de installatie ontwerpt en bedient, moet geschikt, getraind en bekwaam zijn (Dalzell & Chesterman, 1997). ✓ Het proces vereist teams die bestaan uit ervaren operators en procesingenieurs. Bij ontwerpevaluaties dient gebruik te worden gemaakt van ervaren operators met kennis van menselijke factoren (CCPS, 2009).
Kennis	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Een programma voor inherente veiligheid moet gericht zijn op het creëren van bewustzijn van inherente veiligheid bij een grote groep chemici en engineers die in de gehele organisatie betrokken zijn bij de ontwikkeling van producten en processen (CCPS, 2009). ✓ Er vinden trainingssessies plaats die zijn gericht op het vergroten van kennis over de praktische toepassingen van ISD (Amyotte, Macdonald, & Khan, 2011). ✓ Beheer van informatie: “ISD-kenmerken zijn feitelijk in gevaar gekomen omdat de redenen waarom ze waren ingevoerd niet duidelijk en adequaat waren gedocumenteerd” (Amyotte, Goraya, Hendershot, & Khan, 2007). ✓ Het vastleggen van lessen in een raamwerk voor veiligheidsbeheer maakt ze bruikbaar voor de preventie en inperking van andere potentiële procesincidenten (Amyotte & Khan, 2016).
Samenwerking	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Er is een netwerk van bedrijven en kennisinstituten die zijn gelieerd aan de verwerkingsindustrie. Opdrachtnemers, fabrikanten van apparatuur, leveranciers van grondstoffen, universiteiten, onafhankelijke R&D-laboratoria en gesubsidieerde faciliteiten voor onderzoek & ontwikkeling zijn sleutelspelers (Hutcheson et al., 1996) en fungeren als bron voor upstream-innovatie. ✓ Het samenstellen van interdisciplinaire teams draagt bij aan het genereren van een haalbaar ISD-portfolio (Hendershot, 2011).
Innovatie	<ul style="list-style-type: none"> ✓ De keuze voor het inherent veiligere proces is niet altijd eenduidig (CCPS, 2009). ✓ Risico's dienen niet uitsluitend beheerst te worden, maar inherent veiligere werkwijzen en de daarmee samenhangende innovatie die vaak is vereist voor minimalisatie en vervanging dienen in de overkoepelende cultuur voor procesveiligheid te worden geïntegreerd (CCPS, 2009). ✓ In plaats van extra barrières op te werpen om mensen tegen de risico's te beschermen, moet de procesontwerper worden uitgedaagd om methoden te bedenken om de met het proces samenhangende risico's uit te sluiten (Hendershot, 1997).
Efficiëntie	<ul style="list-style-type: none"> ✓ De opties dienen over de hele lijn te worden afgewogen, en de totale kosten en risico's voor de procescyclus dienen op volledigheid te worden geanalyseerd (Maher, Norton, & Surmelu, 2012; Moore, Hazzan, Heller, Hendershot, & Dowell, 2008). ✓ Onderzoek, ontwikkeling en ontwerp van processen dienen in een alomvattend proces te worden geïntegreerd, waarin veiligheids-, kapitaal- en milieukwesties in de gehele procescyclus evenveel aandacht krijgen (CCPS, 2009).

Capaciteit	Verwijzingen
	✓ Er dienen technologische oplossingen te worden geïdentificeerd, waarbij gezocht wordt naar de beste balans tussen kosten en inherente veiligheid (Helland, 2009).

Op basis van hun verschillende uitgangspunten zullen chemische bedrijven van nature meer of minder aandacht geven aan een bepaalde capaciteit. Een effectief ISD-programma dient daarom in meer of mindere mate de genoemde capaciteiten te bevatten. Door deze capaciteiten centraal te stellen, wordt vermeden dat leidinggevendenden op zoek gaan naar eenvoudige, eenduidige oplossingen voor complexe bedrijfsproblemen.

4.2 Hoe kunnen bedrijven de ISD-filosofie in hun ondernemingsstrategie integreren? En wat voor interne programma's kunnen op basis van deze benadering bijdragen aan het implementeren van ISD in de levenscyclus? Welke methodiek kan worden gebruikt om betere ideeën ten aanzien van ISD te genereren?

Vanuit managementperspectief heeft het bestuursniveau behoefte aan implementatiestrategieën die de acceptatie van de ISD-filosofie in de gehele organisatie verbeteren. De structuur van de organisatie dient concrete activiteiten te omvatten. Daartoe was de eerste analyse gericht op het koppelen van de in de industrie geïdentificeerde obstakels (*hoofdstuk 2 - probleemstelling*) aan de capaciteiten die zijn vereist om de ISD-filosofie in te voeren (*paragraaf 3.1 - capaciteiten*). In **Tabel 2** wordt geopperd welke capaciteiten het interne proces kunnen versterken om ieder obstakel te overwinnen.

Tabel 2. Het verbinden van capaciteiten met obstakels wat betreft inherent veilig ontwerpen vanuit strategisch oogpunt.

Obstakels (Jafari et al., 2018) / capaciteiten	Verwijzingen						
	Talent	Samenwerking	Kennis	Leiderschap	Strategische eenheid	Innovatie	Efficiëntie
(a) Onvoldoende bewustzijn en kennis			•	•	•		
(b) Onvoldoende (bij)scholingsmogelijkheden	•		•		•		
(c) Zwakke veiligheidscultuur			•	•	•		
(d) Zwak veranderingsmanagement		•		•	•		•
(e) Ontbreken van een uitgebreid systeem voor veiligheidsbeheer	•		•	•	•		
(f) Onvoldoende innovatie, onderzoek en ontwikkeling	•	•	•	•		•	
(g) Geen geschikte beoordelingsinstrumenten voor ISD	•		•		•	•	
(h) Moeilijkheden bij het implementeren van ISD in bestaande installaties		•	•			•	•
(i) Niet toepassen van ISD in de onderzoeksrapportage van incidenten		•	•		•	•	

Op basis van deze ‘verbandsanalyse’ is een routekaart geïntroduceerd met veelbelovende alternatieven om het interne proces voor het implementeren of verbeteren van ISD te versterken. In **Tabel 3** wordt daarom een aantal alternatieven opgevoerd die de chemische industrie zou kunnen adopteren om de ISD-filosofie vanuit strategisch oogpunt in te voeren.

Tabel 3. Het vergroten van ISD-capaciteiten op basis van veelbelovende alternatieven.

Capaciteit	Fase I (korte termijn)	Fase II (middellange termijn)	Fase III (lange termijn)
Leiderschap	<ul style="list-style-type: none"> - Stel middelen beschikbaar voor training, pilotprojecten en de benodigde professionele functies (‘ambassadeurs’ of coördinatoren) met betrekking tot ISD¹. - Definieer de vaardigheden die de ISD-ambassadeur of -coördinator nodig heeft. 	<ul style="list-style-type: none"> - Benoem een ISD-ambassadeur of -coördinator. 	
Strategische eenheid	<ul style="list-style-type: none"> - Ontwikkel een ISD-procedure of -standaard. 	<ul style="list-style-type: none"> - Pas de ISD-procedure of -standaard toe. - Ontwikkel een beoordelingsinstrument voor ISD. 	<ul style="list-style-type: none"> - Verwijs naar de ISD-procedure in de relevante ontwerp- en veiligheidsstandaarden.
Talent	<ul style="list-style-type: none"> - Zorg voor op managers en leidinggevendenden/coördinatoren gerichte ISD-training om een ISD-mentaliteit te stimuleren en ISD centraal te stellen in de organisatiecultuur. 	<ul style="list-style-type: none"> - Voeg ISD-professionals aan het team toe om bij te dragen tijdens het ontwerp en de bewaking van de levenscyclus. 	<ul style="list-style-type: none"> - Betrek MSc- en PhD-studenten bij pilotprojecten of conceptueel onderzoek met betrekking tot ISD.
Kennis		<ul style="list-style-type: none"> - Bied training op basis van de ISD-procedure of -standaard aan. - Verzamel casestudies uit verwante industrieën (benchmarking) - Analyseer de onderzoeksrapportage van incidenten om mogelijke aanpassingen op basis van de ISD-principes te identificeren. - Voer een ‘ISD-week’ in voor trainingssessies voor de hele organisatie. 	<ul style="list-style-type: none"> - Analyseer de ISD-beoordeling. - Ga periodiek op zoek naar ISD-alternatieven.
Samenwerking	<ul style="list-style-type: none"> - Versterk de integratie van de afdeling die verantwoordelijk is voor veiligheidsbeheer en overige cruciale afdelingen binnen de onderneming (zoals de voor bediening en 	<ul style="list-style-type: none"> - Ga samenwerking aan met (overheids-)instellingen die zich bezighouden met veiligheidsonderzoek om ISD te stimuleren. 	<ul style="list-style-type: none"> - Stimuleer samenwerking op het gebied van ISD in de toeleveringsketen (implementeer bijvoorbeeld ISD-analyse bij fabrikanten of

¹ De rol van ISD-ambassadeur of -coördinator vereist expertise in het veiligheidsdomein en kennis van technische processen. Leidinggevendenden moeten de competentie bezitten om het genereren van nieuwe ideeën te begeleiden. Deze leidinggevendenden moeten in staat zijn te communiceren met teams uit verschillende lagen in het ecosysteem van de onderneming.

Capaciteit	Fase I (korte termijn)	Fase II (middellange termijn)	Fase III (lange termijn)
Innovatie	onderhoud verantwoordelijke afdeling). - Neem een hoofdstuk over inherent veilig ontwerpen op in het innovatieprogramma van de onderneming.	- Introduceer checklists en benchmarkprocedures om de ISD-opties te identificeren wat betreft product, proces en organisatie (inclusief menselijke factoren). - Stel een portfolio van ISD-alternatieven samen met relevante rangschikking (de beoordeling dient rekening te houden met veiligheidsgerelateerde en economische factoren). - Voer een 'ISD-week' in om ideeën voor inherent veilig ontwerpen te genereren.	bij bedrijven uit het chemische cluster). - Voer ISD-pilotprojecten door (projectdemonstratie).
Efficiëntie	- Integreer verandermanagement binnen de veiligheidsafdeling.	- Creëer een portfolio met ideeën waarin milieu- en veiligheidsgerelateerde en economische aspecten in balans zijn.	- Geef opdracht voor voorbereidend haalbaarheidsonderzoek.

Het idee is om de strategie stapsgewijs in te voeren. Het opstellen van de strategie moet in feite gezien worden als een traject, niet als een project.

4.3 Welke stimuli en integraties dienen te worden geïntroduceerd om te zorgen dat ideeën door de hele keten - van de organisatie zelf tot leverancier en afnemer - kunnen doordringen? En is er enig verband tussen interne programma's en ISD-strategieën?

Ten eerste is de chemische industrie een complex systeem met diverse actoren. Verschillende opdrachtnemers, fabrikanten van apparatuur, engineers, onderzoekscentra en universiteiten dragen bij aan een veiligere en duurzame industrie. *Afbeelding 1* toont de stroom van technologische en niet-technologisch kennis, de apparatuurstroom en de grondstoffenstroom. Dit diagram is ontwikkeld vanuit het perspectief om elke actor rond de uitvoerende onderneming te verbinden. Dit punt is uitgewerkt om te benadrukken dat niet alleen de uitvoerende onderneming een portfolio van ISD-projecten kan genereren. Wanneer netwerkinteractie wordt ingezet om tot een veiliger proces te komen, ontstaat de mogelijkheid dat innovatieve technologische en organisatorische oplossingen komen bovendrijven.



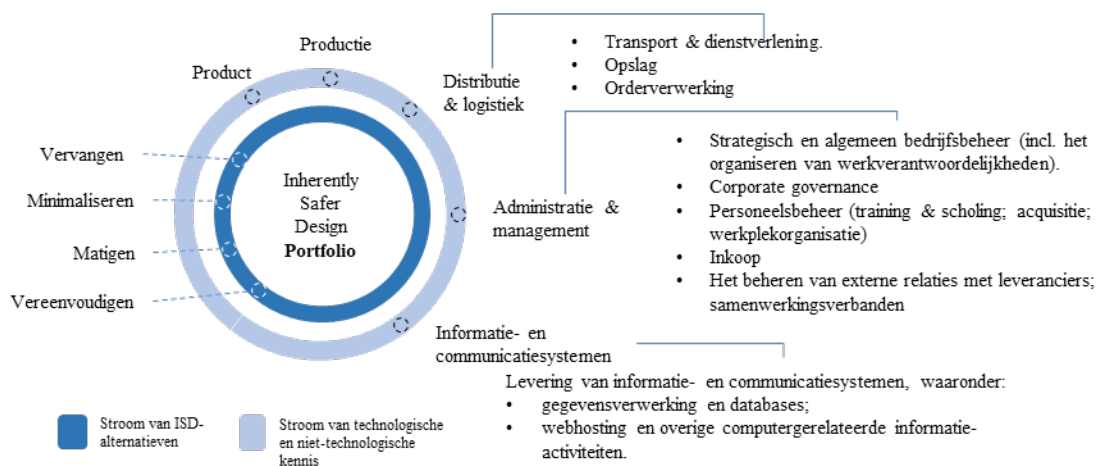
Afbeelding 1. Stromen waarlangs technische innovatie in het netwerk van bedrijven kan plaatsvinden (naar Hutcheson *et al.* (Hutcheson et al., 1996)).

Gedurende de levenscyclus, en in het bijzonder tijdens de ontwerpfase, dienen de uitvoerende ondernemingen duidelijk de verwachtingen te definiëren voor inherent veiligere overwegingen in het ontwerpproces, voordat contracten worden gegund (CCPS, 2009). Het ontwerpen of aanschaffen van apparatuur die eenvoudig kan worden onderhouden en waarvan het moeilijk of onmogelijk is deze onjuist te assembleren of te installeren, verbetert de inherente veiligheid van zowel de apparatuur als het proces (CCPS, 2009). Via contractuele afspraken kan een agenda worden vastgesteld om mogelijkheden voor pilotprojecten te vinden. Volgens Tanabe *et al.* is sprake van de volgende typische problemen bij dergelijke complexe projecten (Tanabe, Turco, & Miyake, 2017): verschillen in probleemstellingen en optimale uitkomsten wanneer er sprake is van meerdere stakeholders, afwijkende filosofieën, onvoldoende coördinatie en inefficiënte beheersing van ontwerpwijzigingen, hetgeen bij elkaar leidt tot inconsistenties in het ontwerp wat betreft veiligheid, gezondheid en milieu. Het samenstellen van een team met ISD-ambassadeurs kan de samenwerking met de toeleveringsketen, de organisatie en de afnemers verbeteren. De rol van ISD-professionals is om het voortouw te nemen bij het voorstellen, analyseren, beoordelen en implementeren van ISD-initiatieven gedurende de volledige levenscyclus. Aan de andere kant - binnen de uitvoerende onderneming - zijn de industrieel hygiënist/toxicoloog, chemicus, procesontwerper, veiligheidsingenieur, hoofd procestechnologie, milieukundig specialist/ingenieur, besturingsingenieur, operator, operationeel toezichthouder en onderhoudstechnicus verantwoordelijk voor het voorstellen, analyseren, beoordelen en implementeren van ISD-initiatieven (CCPS, 2009). Zoals eerder gezegd kunnen de ISD-ambassadeurs/coördinatoren de ISD-principes gedurende de fases voor onderzoek, concept- en detailontwerp, bediening & onderhoud en buitengebruikstelling coördineren, doorgeven en benadrukken.

Ten tweede bestaat er een direct verband tussen innovatie en ISD-proposities. Erkend wordt dat de keuze van een inherent veiliger proces niet altijd eenduidig is (CCPS, 2009). Principes als minimalisatie en vervanging vereisen dat zowel bescheiden als forse ontwikkelingsstappen worden onderzocht. Volgens het Oslo-handboek voor innovatie (OECD/Eurostat, 2018) bestaan er twee soorten innovatie: 'productinnovatie' en 'bedrijfsprocesinnovatie'. 'Productinnovatie' omvat goederen en diensten, terwijl 'bedrijfsprocesinnovatie' is onderverdeeld in (a) de productie van goederen en diensten (inclusief chemische verwerking in deze categorie), (b) distributie & logistiek, (c) boekhouding & management, (d) ontwikkeling van product- en bedrijfsprocessen, (e) informatie- en communicatiesystemen, en (f) marketing & sales. **Afbeelding 2** toont de categorieën die in verband kunnen worden gebracht met vervangen, minimaliseren, matigen en vereenvoudigen en die kunnen worden omschreven als integratie van kennis.

Zoals **Afbeelding 2** laat zien, dragen niet alleen technologische initiatieven bij aan het veiliger maken van de chemische industrie. Niet-technologische initiatieven op het gebied van logistiek, personeelsbeheer, inkoop, informatie en communicatie zouden ook deel uit kunnen maken van het portfolio. Een aantal auteurs (Amyotte et al., 2007; CCPS, 2009; Hendershot, 2011; Maher et al., 2012) kent een bijzondere connotatie toe aan menselijke factoren (met betrekking tot de categorie boekhouding & management, zie **Afbeelding 2**). In plaats van mensen te dwingen zich sterk aan te passen om het werk te kunnen uitvoeren, kan een analyse van menselijke factoren ervoor zorgen dat

de omgeving zo natuurlijk mogelijk functioneert (CCPS, 2009). Het domein ‘menselijke factoren’ omvat het beschouwen van individuele kenmerken, vaardigheden en opvattingen, evenals factoren met betrekking tot fitheid, stress en vermoeidheid (Attwood *et al.*, 2006). Volgens Hendershot is beschouwing van menselijke factoren bij het ontwerp van de apparatuur noodzakelijk om de kans op onjuiste bediening te minimaliseren (Hendershot, 2011). Menselijk handelen is een van de belangrijkste oorzaken van ongelukken (Maher *et al.*, 2012). Factoren die bijdragen aan ongelukken hangen onder meer samen met inadequate communicatie, training, apparatuur, beslissingen, procedures en gebruikersinterfaces, en met gebrekkig onderhoud (Attwood *et al.*, 2006).



Afbeelding 2. De integratie van ISD-programma’s en de categorieën ‘productinnovaties’ en ‘bedrijfsprocesinnovaties’ volgens het Oslo-handboek (OECD/Eurostat, 2018).

Bestaande faciliteiten en huidige praktijken dienen daarom regelmatig te worden geëvalueerd op mogelijkheden om menselijke factoren op een inherent veiligere manier te verbeteren, terwijl nieuwe faciliteiten dienen te worden onderzocht op kwesties met betrekking tot ergonomie en menselijke factoren (CCPS, 2009). Ergonomie is één aspect van die menselijke factoren, en daar dient dan ook rekening mee te worden gehouden bij de inrichting van apparatuur, kranen, bediening en alle overige elementen waar bedienings- en onderhoudspersoneel toegang toe dient te hebben (CCPS, 2009; Kariuki & Löwe, 2006). Dat moet leiden tot de ontwikkeling van een veiliger taak- en interface-ontwerp, een veiligere taakomgeving en werkplekinrichting en effectiever toezicht. Wanneer voldoende rekening wordt gehouden met menselijke factoren, neemt de kans op menselijke fouten af, nemen productiviteit en kwaliteit toe, en daalt het risico op werkgerelateerde aandoeningen aan het bewegingsapparaat (Attwood *et al.*, 2006).

Ten derde vereisen chemische bedrijven specifieke methodieken om het bedenken van ISD-alternatieven met betrekking tot product, proces en organisatie te stimuleren. De combinatie van diverse actoren in een collaboratieve omgeving met stakeholders en toeleveringsketen, specifieke (innovatie-)programma’s en multidisciplinaire teamprojecten kan bijdragen aan de uiteindelijke invoering van veiligere oplossingen. Een succesvolle ISD-filosofie is dus afhankelijk van een creatieve omgeving met kleine, middelgrote en grote veranderingen binnen verschillende dimensies in de onderneming. Op basis van de categorieën en structuren die we eerder in ons onderzoek hebben geïdentificeerd, stellen we een uitgebreide stapsgewijze benadering voor om ISD-alternatieven gedurende de verschillende stadia van de procescyclus te integreren. Het gaat om de volgende stadia (**Afbeelding 3**): (1) het selecteren van knooppunten in de gehele procescyclus, (2) het selecteren van teamprojecten, (3) het identificeren van risico’s, (4) het identificeren van ISD-alternatieven, (5) het identificeren van mogelijke combinaties, (6) het creëren van een voorlopig portfolio met ISD-mogelijkheden, (7) het beoordelen van veiligheidsgerelateerde en economische aspecten, en (8) het rangschikken van ISD-alternatieven.



Afbeelding 3. Procesdiagram van besluitvorming rondom ISD gedurende de verschillende stadia van de procescyclus.

De structuur van *Afbeelding 3* komt overeen met een algemene beschrijving van de belangrijkste stappen die nodig zijn in het ontwerp. Voor verder onderzoek moeten procesdiagrammen worden ontwikkeld voor elke procescyclus om het bedenken van ISD-alternatieven in stap 4 te verbeteren. Daarnaast is aanvullend onderzoek nodig voor de parameters voor stap 7. Normaal gesproken worden voor de economische factor indicatoren als rendement (ROI) en netto contante waarde (NPV) gebruikt, en voor de factor veiligheid de Dow Fire and Explosion Index.

Samenvattend: de overdracht van kennis van fabrikanten van apparatuur, verschillende afdelingen binnen het bedrijf, onderzoekscentra en universiteiten is essentieel om het ontstaan van silo's binnen het ecosysteem van de onderneming te voorkomen. Bij chemische bedrijven is de medewerking van interdisciplinaire ontwerpteam - waaronder ISD-ambassadeurs en diverse actoren uit de toeleveringsketen - noodzakelijk om ISD-alternatieven te bedenken. Meestal zijn deze ISD-opties gericht op technologische proposities. Maar ook domeinen als boekhouding & management, distributie & logistiek en informatie- en communicatiesystemen kunnen een bron vormen van kleine, middelgrote en grote veranderingen wat betreft veiligheid. Het integreren van deze factoren in een algemene methodiek zou de stroom van kennis door de gehele keten - van de organisatie zelf tot leveranciers en afnemers - stimuleren.

4.4 Op weg naar een ISD-strategie voor CO₂-afvang in het Botlek-gebied (Haven van Rotterdam)

In principe zouden bedrijven hun chemische processen zo moeten ontwerpen dat de uitstoot van koolstofdioxide minimaal is. Huidige technologische ontwikkelingen, complexe infrastructuren (padafhankelijkheid), politieke afwegingen, lage CO₂-prijzen en een gebrek aan inzet hebben echter geleid tot vertraging van de duurzaamheidsformatie. De maatschappij verlangt oplossingen die veilig en economisch haalbaar zijn en die een geringe milieu-impact hebben. Tegenwoordig is het proces om kooldioxide af te vangen, te gebruiken of op te slaan een van de opties om de uitstoot van kooldioxide door de chemische industrie te verlagen.

In het geval van een naverbrandingsproces is de technologie om kooldioxide af te vangen al vanaf 1970 in ontwikkeling. Een deel van de Nederlandse chemische industrie is van plan om deze oplossing te implementeren. Specifiek zijn studies ontwikkeld voor industriële installaties in het Botlek-gebied (Haven van Rotterdam), waar zich zo'n 16 bedrijven bevinden die zich bezighouden met raffinage, afvalverwerking, energie-opwekking en de productie van industriële gassen, chemicaliën en biobrandstoffen, met een totale emissie van 7,1 Mt CO₂ per jaar (Berghout, van den Broek, & Faaij, 2017). De belangrijkste problemen die in het huidige proces voor CO₂-afvang zijn geïdentificeerd, zijn (Krzemień, Więckol-Ryk, Duda, & Koterak, 2013): (i) corrosie van materialen, (ii) degradatie van monoethanolamide, (iii) geen of lagere stroomsnelheid naar de absorber veroorzaakt door een verstopte leiding, defecte apparatuur of menselijke fout, (iv) verlies van oplosmiddel en/of rookgas door een leidinglek, overloop of omgekeerde stroom als gevolg van een menselijke fout of defecte apparatuur, (v) verhoogde druk als gevolg van een excessieve ophoping van gas in het systeem, en (vi) verandering in de samenstelling van rookgas als gevolg van een fout in het gasvoorzieningssysteem of de leidingsamenstelling.

Met het doel om het proces voor CO₂-afvang veiliger te maken, zijn technologische en niet-technologische opties geanalyseerd die vanuit ISD-perspectief kunnen worden geïmplementeerd. **Tabel 4** bevat een samenvatting van een aantal alternatieven die naar voren zijn gekomen uit eerder onderzoek naar het risico van het 'vrijkomen van gevaarlijke en brandbare stoffen' en 'vorming van giftige subproducten en emissie in de atmosfeer'. Er zal een nadere beoordeling nodig zijn om een portfolio met opties te definiëren die zijn gerangschikt op milieu- en veiligheidsgerelateerde en economische factoren.

Tabel 4. Inherent veiligere alternatieven voor het proces van koolstofopvang.

Categorie	Alternatief	Principe
Proces	Ammonia (Luis, 2016) ² .	Vervangen
Proces	Rotating Packed Bed (RTB) (Wang, Joel, Ramshaw, Eimer, & Musa, 2015).	Vervangen
Proces	Gecentraliseerd proces (Berghout et al., 2017).	Minimaliseren en vereenvoudigen
Proces	Algemene nutsdienst voor reboiler.	Minimaliseren en vereenvoudigen
Organisatorisch	Overeenkomst voor het clusteren van het 'stripproces' en de 'nutsdienst' (samenwerkingsovereenkomst). Met gecentraliseerde apparatuur (absorber) is een duidelijk proces van communicatie en taakimplementatie tussen de bedrijven in het cluster vereist.	Vereenvoudiging
Organisatorisch	Leasen van oplosmiddel.	
Organisatorisch	Flexibele dataverwerking (digitale oplossingen met tekst- en spraakherkenning middels NLP [Natural Language Processing]) ³ .	
Organisatorisch (taakontwerp)	Roteren van medewerkers (voorkomen van vermoeidheid) (Amyotte et al., 2007).	Vereenvoudiging
Organisatorisch	Training met Virtual en Augmented Reality.	Vereenvoudiging

² In dit onderzoek zijn de voor- en nadelen van ammonia meegenomen (Luis, 2016).

³ Gegevens m.b.t. veiligheid en gezondheid op het werk: ongelukken en bijna-ongelukken, veiligheidsobservaties en audits en inspecties.

Categorie	Alternatief	Principe
(informatie)		
Organisatorisch (taak- en interface-ontwerp)	Bewaking op afstand gedurende de inspectie (m.b.v. drones) van 'absorber' en 'striptoren' ⁴ .	
Organisatorisch	Predictief onderhoud (Hu, Zhang, & Liang, 2012).	Vereenvoudiging
Organisatorisch (taakontwerp)	Reduceren van inspectietijd (digitale oplossing kan bijdragen aan kortere blootstellingsduur).	Minimaliseren en vereenvoudigen
Organisatorisch (interface-ontwerp)	Dashboard met hoofdfuncties en begrijpelijke visualisatie voor bedienings- en onderhoudspersoneel (zonder overmaat aan waarschuwingssignalen).	Vereenvoudiging
Organisatorisch (informatie en interface-ontwerp)	Digitale oplossingen voor bedienings-, onderhouds-, veiligheids- en noodprocedures ⁵ (flexibel verandermanagement). Duidelijke en begrijpelijke handleidingen, richtsnoeren en instructiematerialen (Amyotte et al., 2007).	Vereenvoudiging

Wat menselijke factoren betreft: installaties en processen die zijn ontworpen en gebouwd met bijzondere aandacht voor menselijke factoren, zijn inherent veiliger dan installaties en processen waarbij dit niet geval is (CCPS, 2009). Om de kans op fouten te minimaliseren, is bij sporadische taken meer aandacht voor menselijke factoren vereist, bijvoorbeeld door het gebruik van administratieve controlemechanismen zoals direct beschikbare checklists, opschriften, informatiepanelen en/of kleurcodering (CCPS, 2009). Volgens Attwood *et al.* zullen mensen in een socio-technisch systeem meer geneigd zijn proactief te reageren in plaats van slechts te reageren op problemen die ontstaan wanneer principes met betrekking tot menselijke factoren proactief zijn geïntegreerd in de gehele levenscyclus van een bedrijfsmiddel (Attwood et al., 2006).

5. Conclusie

Hoe kan een combinatie van competenties en middelen worden ontwikkeld in de chemische industrie om de implementatie van ISD-alternatieven in producten, processen en organisatiestructuren te stimuleren?

Om de chemische industrie veiliger te maken, dienen bedrijven inherent veiligere principes toe te passen in zowel hun chemische processen als hun product- en bedrijfsprocessen. Industrieën hebben echter te maken met strategische obstakels bij het bereiken van dit doel. Onvoldoende bewustzijn en kennis van ISD, van managementniveau tot werkvloer, onvoldoende geschikte (bij)scholingsmogelijkheden met betrekking tot ISD, te weinig innovatie, onderzoek en ontwikkeling op het gebied van ISD, en het niet inzien van de waarde van ISD in de onderzoeksrapportage van incidenten zijn een aantal van de obstakels die bij bedrijven zijn geïdentificeerd. Het management speelt een belangrijke rol bij het aanpakken van deze obstakels. Daarom is het noodzakelijk om de vereiste managementcapaciteiten en bijbehorende activiteiten te identificeren om de implementatie van ISD in het DNA van de ondernemingsstrategie te bewerkstelligen. Daartoe hebben we de volgende capaciteiten geïdentificeerd: leiderschap, strategische eenheid, talent, kennis, samenwerking, innovatie en efficiëntie. Om iedere capaciteit te implementeren of te versterken, dienen op de korte, middellange en lange termijn concrete activiteiten te worden geïmplementeerd die zijn samengevat in een routekaart. Strategische eenheid in het ISD-programma speelt een essentiële rol bij het bereiken van harmonie tussen de intellectuele, gedragsmatige en procedurele dimensie in een onderneming. Binnen de intellectuele dimensie dienen medewerkers van managementniveau tot werkvloer te weten wat de strategie rondom ISD is en waarom die belangrijk is. Binnen de gedragsmatige dimensie dienen medewerkers de strategie te steunen en de ISD-principes gedurende de procescyclus toe te passen. Bovendien dienen de ISD-

⁴ Apparatuur die goed bereikbaar is voor inspectie, reparatie of monitoring vanaf permanente platforms wordt vaker geïnspecteerd dan apparatuur die beklommen moet worden met behulp van steigers of veiligheidstuig (CCPS, 2009).

⁵ Documentbeheer is noodzakelijk om ervoor te zorgen dat alleen de meest actuele procedures voorhanden zijn (CCPS, 2009).

principes te worden gereflecteerd in standaarden en/of daaraan verwante officiële documenten, hetgeen overeenkomt met een procedurele dimensie.

In onze analyse hebben we een direct verband tussen innovatie en ISD-proposities vastgesteld. Chemische bedrijven kunnen mogelijkheden vinden voor het implementeren van inherent veilige ontwerpen in processen voor product- en bedrijfsinnovatie, waaronder productie, distributie & logistiek, personeelsbeheer (menselijke factoren), inkoop en informatie- en communicatiesystemen. Daarnaast maakt de interactie tussen uitvoerende ondernemingen met de verschillende bronnen van technische innovaties (zoals fabrikanten van procesapparatuur, de exploitant van de hoofdprocesinstallatie, grondstoffenleveranciers, R&D-laboratoria en universiteiten) het mogelijk dat ideeën in de gehele organisatieketen komen bovendrijven. Daarnaast hebben we een uitgebreide stapsgewijze benadering voorgesteld om ISD-alternatieven gedurende de verschillende stadia van de procescyclus te integreren, waaronder de volgende stappen: het selecteren van knooppunten, het selecteren van teamprojecten, het identificeren van risico's, het identificeren van ISD-alternatieven, het identificeren van mogelijke combinaties, het creëren van een voorlopig portfolio met ISD-mogelijkheden, het beoordelen van veiligheidsgerelateerde en economische aspecten, en het rangschikken van ISD-alternatieven. Daarnaast hebben we een vereenvoudigde onderzoekscasus naar het proces van CO₂-afvang ontwikkeld om een aantal mogelijkheden op technisch en managementvlak voor inherent veilig ontwerpen te opperen. Zoals gezegd zal er een nadere beoordeling nodig zijn om een portfolio met opties voor CO₂-afvang te definiëren die zijn gerangschikt op zowel milieu- en veiligheidsgerelateerde als economische factoren.

Dankwoord

Dit onderzoek is uitgevoerd in het kader van het Safe-by-Design-programma dat financieel wordt ondersteund door het Nederlandse Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. Het onderzoek is opgezet binnen de sectie Safety & Security Science van de Technische Universiteit Delft.

Literatuur

- Amyotte, P. R., & Eckhoff, R. K. (2010). Dust explosion causation, prevention and mitigation: An overview. *Journal of Chemical Health and Safety*, 17(1), 15–28.
- Amyotte, P. R., Goraya, A. U., Hendershot, D. C., & Khan, F. I. (2007). Incorporation of inherent safety principles in process safety management. *Process Safety Progress*, 26(4), 333–346.
- Amyotte, P. R., & Khan, F. I. (2016). What do gas blows, iron dust accumulations and sulfidation corrosion have in common? *Chemical Engineering Transactions*, 48, 739–744.
- Amyotte, P. R., Macdonald, D. K., & Khan, F. I. (2011). An analysis of CSB investigation reports concerning the hierarchy of controls. *Process Safety Progress*, 30(3), 261–265.
- Attwood, D., Baybutt, P., Devlin, C., Fluharty, W., Hughes, G., Isaacson, D., ... Ormsby, B. (2006). Human Factors Methods for Improving Performance in the Process Industries. In *Human Factors Methods for Improving Performance in the Process Industries* (pp. i–xvi).
- Berghout, N., van den Broek, M., & Faaij, A. (2017). Deployment of infrastructure configurations for large-scale CO₂ capture in industrial zones a case study for the Rotterdam Botlek area (part B). *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 60, 24–50.
- CCPS. (2009). *Inherently Safer Chemical Processes. A life cycle approach* (Second). Hoboken: John Wiley & Sons.
- Dalzell, G., & Chesterman, A. (1997). Nothing, is safety critical. *Institution of Chemical Engineers*, 75, 152–156.
- Eurostat. (2019). Accidents at work by NACE Rev. 2 activity and size of enterprise. Retrieved October 20, 2019, from Eurostat website: https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=hsw_n2_05&lang=en
- Helland, A. (2009). Dealing with uncertainty and pursuing superior technology options in risk management-The inherency risk analysis. *Journal of Hazardous Materials*, 164(2–3), 995–1003.

- Hendershot, D. C. (1997). Inherently safer chemical process design. *Loss Prevention Process in the Process Industries*, 10, 151–157.
- Hendershot, D. C. (2011). *Inherently Safer Design An Overview of Key Elements*. Retrieved from www.asse.org
- Hu, J., Zhang, L., & Liang, W. (2012). Opportunistic predictive maintenance for complex multi-component systems based on DBN-HAZOP model. *Process Safety and Environmental Protection*, 90(5), 376–388.
- Hutcheson, P., Pearson, A. W., & Ball, D. F. (1996). Sources of technical innovation in the network of companies providing chemical process plant and equipment. *Research Policy*, 25, 25–41.
- Jafari, M. J., Nourai, F., Pouyakian, M., Torabi, S. A., Rafiee Miandashti, M., & Mohammadi, H. (2018). Barriers to adopting inherently safer design philosophy in Iran. *Process Safety Progress*, 37(2), 221–229.
- Kariuki, S. G., & Löwe, K. (2006). Increasing human reliability in the chemical process industry using human factors techniques. *Process Safety and Environmental Protection*, 84(3 B), 200–207.
- Khan, F. I., & Amyotte, P. R. (2002). Inherent safety in offshore oil and gas activities: a review of the present status and future directions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 15, 279–289.
- Kletz, T. A. (1985). Inherently Safer Plants. *Plant/Operations Progress*, 4, 164–167.
- Kletz, T., & Amyotte, P. (2010). *Process Plants A Handbook for Inherently Safer Design Second Edition*. Boca Raton, Florida: Taylor & Francis Group.
- Krzemień, A., Więkol-Ryk, A., Duda, A., & Koterak, A. (2013). Risk Assessment of a Post-Combustion and Amine-Based CO₂ Capture Ready Process. *Journal of Sustainable Mining*, 12(4), 18–23.
- Luis, P. (2016). Use of monoethanolamine (MEA) for CO₂ capture in a global scenario: Consequences and alternatives. *Desalination*, 380, 93–99.
- Maher, S., Norton, K., & Surmelu, S. (2012, January). Design an Inherently Safer Plant. *American Institute of Chemical Engineers*, 43–47.
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., & Group, T. P. (2009). Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. *PLOS Medicine*, 6(7).
- Moore, D. A., Hazzan, M., Heller, D., Hendershot, D. C., & Dowell, A. M. (2008). Advances in inherent safety guidance. *Process Safety Progress*, 27(2), 115–120.
- OECD/Eurostat. (2018). *Oslo manual 2018 : guidelines for collecting and interpreting innovation data on innovation*. (4th ed.). Luxembourg: OECD.
- Overton, T., & King, G. M. (2006). Inherently safer technology: An evolutionary approach. *Process Safety Progress*, 25(2), 116–119.
- Swuste, P., van Gulijk, C., Groeneweg, J., Zwaard, W., Lemkowitz, S., & Guldenmund, F. (2020). From clapham junction to macondo, deepwater horizon: Risk and safety management in high-tech-high-hazard sectors: A review of English and Dutch literature: 1988–2010. *Safety Science*, 121(November 2018), 249–282.
- Tanabe, M., Turco, C., & Miyake, A. (2017). Management system for enhancing chances to take inherently safer design options in LNG plant projects. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 49, 120–128.
- Teece, D. J., Pisano, G., & Shuen, A. (1997). Dynamic Capabilities and Strategic Management. In *Strategic Management Journal* (Vol. 18).
- Ulrich, D., & Smallwood, N. (2004). Capitalizing on Capabilities. *Harvard Business Review*, 82(6), 119–127.
- Wang, M., Joel, A. S., Ramshaw, C., Eimer, D., & Musa, N. M. (2015). Process intensification for post-combustion

CO₂ capture with chemical absorption: A critical review. *Applied Energy*, 158, 275–291.