



European  
Commission

# JRC TECHNICAL REPORT

## Natech risicobeheer

*Leidraad voor exploitanten  
van gevaarlijke industriële  
inrichtingen en nationale  
autoriteiten*

Necci A., Krausmann E.

2023

*Dit betreft een Nederlandse vertaling door het*



landelijk expertise centrum  
industriële veiligheid



Deze publicatie is een vertaling van een technisch rapport van de Joint Research Centre (JRC), een kennis- en wetenschap dienst van de Europese Commissie. Het doel van dit originele rapport is het verlenen van evidence-based wetenschappelijke ondersteuning voor het Europese beleidsvorming proces. De wetenschappelijk output hier gepresenteerd impliceert geen beleidspositie van de Europese Commissie. Zowel de Europese Commissie als personen die optreden namens de Commissie aanvaarden geen aansprakelijkheid voor problemen als gevolg van het gebruik van deze publicatie. Voor informatie omtrent de methodologie en kwaliteit van onderliggende data ten aanzien van dit rapport dient de gebruiker – indien de bron noch Eurostat noch andere Commissie diensten is – contact op te nemen met de aangegeven bron. Met de keuze voor bepaalde aanduidingen of een bepaalde presentatie van kaartmateriaal neemt de Europese Unie geen standpunt in over de wettelijke status van een land, gebied, stad of regio, noch over de autoriteiten en de grenzen ervan.

EU Science Hub  
<https://ec.europa.eu/jrc>

JRC129450

EUR 31122 NL

PDF ISBN 978-92-76-58595-4 ISSN 1831-9424 doi:10.2760/15297

Luxemburg: Bureau voor publicaties van de Europese Unie, 2023

© Europese Unie, 2023



Het hergebruiksbeleid van documenten van de Europese Commissie wordt uitgevoerd op basis van Besluit 2011/833/EU van de Commissie van 12 december 2011 betreffende het hergebruik van documenten van de Commissie (PB L 330 van 14.12.2011, blz. 39). Tenzij anders vermeld, is het hergebruik van dit document toegestaan onder een Creative Commons [Attribution 4.0 International \(CC-BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) licentie. Dit betekent dat hergebruik is toegestaan op voorwaarde dat er op passende wijze mee wordt omgegaan en eventuele wijzigingen worden aangegeven.

Dit document is een vertaling van het originele document door het Landelijke Expertisecentrum Industriële Veiligheid. Het originele document is hier te vinden: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC129450>

Voor elk gebruik of reproductie van elementen die niet in het bezit zijn van de Europese Unie, kan het nodig zijn om toestemming rechtstreeks van de respectieve rechthebbenden te vragen.

Alle materiaal © Europese Unie, 2023 (tenzij anders aangegeven). De bronvermelding is bij de betreffende figuren in dit rapport opgenomen.

Omslagfoto: Een olietank die los is gekomen van zijn fundering door stormvloed tijdens orkaan Katrina in 2005. (Photo: B. McMillan, FEMA).

Hoe dit rapport te citeren: A. Necci, E. Krausmann, "Natech risicobeheer - Leidraad voor exploitanten van gevaarlijke industriële locaties en nationale autoriteiten", EUR 31122 NL, Bureau voor publicaties van de Europese Unie, Luxemburg, 2023, ISBN 978-92-76-58595-4, doi:10.2760/15297, JRC129450.

## Inhoudsopgave

Dankwoord .....	1
Samenvatting.....	2
1 Introductie.....	3
2 Kenmerken van Natech-gebeurtenissen en bijbehorende uitdagingen.....	4
3 Introductie tot Natech risicobeheer .....	6
3.1 Communicatie en consultatie .....	6
3.2 Vaststellen van de context .....	6
3.3 Risicobeoordeling .....	7
3.3.1 Risico identificatie.....	7
3.3.2 Risicoanalyse .....	7
3.3.3 Risico evaluatie .....	8
3.4 Risicobeheersing .....	8
3.5 Monitoring en review .....	8
4 Elementen van de Natech risicobeoordeling .....	9
4.1 Natuurgevaar: identificatie and karkterisering.....	9
4.2 Identificatie van kritieke apparatuur.....	11
4.3 Schade aan kritieke apparatuur vanwege natuurgevaar .....	12
4.4 Bijdragende factoren aan ongelukken: veiligheidsbarrières en nutsvoorzieningen.....	18
4.5 Identificatie van Natech-gevaar.....	19
4.5.1 Rechtstreeks effecten van natuurgevaar .....	19
4.5.2 Indirecte effecten.....	20
4.6 Natech-gevolgen analyse.....	20
4.6.1 Loss of containment (LOC) en kritieke gebeurtenissen.....	21
4.6.2 Natech-gevolgen scenario modellering.....	23
4.7 Natech waarschijnlijkheidsbeoordeling .....	26
4.7.1 De waarschijnlijkheid van een release/topgebeurtenis.....	27
4.7.2 Natech-specifieke beslisbomen .....	29
4.8 Natech risicoevaluatie .....	30
5 Maatregelen om Natech-risico te verminderen .....	31
5.1 Mitigerende maatregelen tegen impact van natuurgevaar.....	31
5.1.1 Fysieke maatregelen.....	31
5.1.2 Procedurele maatregelen.....	31
5.2 Apparatuur-ontwerp en modificaties (retrofitting) .....	33
5.3 Veiligheidsbarrières hulp-systemen .....	35
5.4 Emergency planning en reactie op Natech-ongevallen .....	35
5.5 Leren van voorgekomen Natech-ongevallen .....	36
Referenties .....	38
Lijst van afkortingen en definities .....	40
Lijst van boxen.....	43
Lijst van afbeeldingen.....	44
Lijst van tabellen.....	45

## **Dankwoord**

De auteurs bedanken Zsuzsanna Gyenes en Maureen Wood van het Joint Research Centre van de Europese Commissie voor hun zorgvuldige review van deze leidraad, voor hun opmerkingen en aanvullingen.

## **Auteurs**

Amos Necci

Elisabeth Krausmann

## **Samenvatting**

Natech incidenten zijn incidenten met betrekking tot industriële installaties die geïnitieerd zijn door een gevaar vanuit de natuurlijke omgeving (aardbevingen, overstromingen, stormen, natuurbrand). Dit document geeft inzicht in dit soort incidenten.

In het derde hoofdstuk wordt ingegaan hoe Natech risico's beheerd kunnen worden. Hiervoor wordt een traject van risico identificatie, risicoanalyse en risico evaluatie gebruikt. Uitwerking van dit traject vindt plaats in hoofdstuk 4. In hoofdstuk 5 wordt ingegaan op maatregelen om Natech risico's te voorkomen en/of te beperken.

Natech incidenten kunnen directe en indirecte gevolgen hebben. Directe gevolgen zijn -bijvoorbeeld- schade aan installatie en Loss Of Containment door storm of aardbeving. Bij indirecte gevolgen kun je denken aan uitval van stroomvoorziening o.i.d. waardoor chemische processen kunnen uitvallen of ontsporen. Daardoor kan vervolgens een LOC-scenario ontstaan

Met betrekking tot voorkomen en beperken van de effecten van een Natech scenario, moet terdege rekening gehouden worden met de kans dat het natuurgeweld preparatieve en/of repressieve voorzieningen heeft beschadigd. In het vijfde hoofdstuk wordt ingegaan op dit fenomeen en hoe een bedrijf hiermee het best kan omgaan.

# 1 Introductie

Natuurlijke gevaren kunnen leiden tot brand, ontploffingen en het vrijkomen van giftige stoffen na impact op industriële installaties met gevaarlijke stoffen. Dit type gebeurtenis heet een Natech (“natural hazard-triggered technological”) ongeval (Krausmann et al., 2017). Natech-ongevallen zijn daarom technologische ongevallen. De bijbehorende risicobeheersing valt onder de verantwoordelijkheid van de exploitant van de inrichting. Klimaatverandering en toenemend menselijk handelen (verstedelijking en industrialisatie), zorgen ervoor dat het Natech-risico in de toekomst zal toenemen.

De ervaring leert dat een groot aantal Natech-ongevallen in het verleden voorkomen hadden kunnen worden door een beter zicht op dit soort risico's. Een aantal belangrijke Natech-ongevallen heeft het bewustzijn in de Europese Unie (EU) vergroot, en wordt het risico erkend in de betreffende wetgeving. De EU Seveso III-richtlijn (2012/18/EG)<sup>1</sup> vereist dat nationale autoriteiten toezicht houden op de implementatie van een effectief veiligheidsbeleid voor het beheersen van de gevaren van zware ongevallen met gevaarlijke stoffen. In dit kader zijn exploitanten van hogedrempelinrichtingen verplicht een veiligheidsrapport voor te leggen aan hun nationale autoriteiten om aan te tonen dat zij alle risico's hebben geëvalueerd, ook die als gevolg van natuurlijke gevaren, en dat zij alle maatregelen hebben genomen om zware ongevallen te voorkomen. De veiligheidsmaatregelen die in gevaarlijke inrichtingen worden genomen, moeten gebaseerd zijn op de in het veiligheidsrapport geïdentificeerde en beoordeelde risico's. De richtlijn stelt expliciet dat veiligheidsrapporten: “gedetailleerde scenariobeschrijvingen voor mogelijke zware ongevallen moeten beschrijven. Of de omstandigheden waarin die kunnen optreden, binnen of buiten de installatie liggen, is daarbij niet relevant” (bijlage II van de Seveso III-richtlijn).

Een onderzoek van Krausmann en Baranzini (2012) naar de status van Natech-risicobeheersing in de EU, liet zien dat de implementatie van effectieve risicobeheersing op dit gebied, wordt belemmerd door een gebrek aan richtlijnen. Daardoor kunnen de maatregelen die gebruikers nemen om risico's te beperken onvolledig of ontoereikend zijn. Nationale en internationale initiatieven hebben geleid tot specifieke richtlijnen voor Natech risico's (bijv. INERIS, 2014; OECD 2015; UNI, 2021; TRAS 310.320, 2022; DSB, 2022). Dit document vormt een aanvulling op deze initiatieven en functioneert daardoor als een technische handleiding. Het beschrijft op een systematische manier het proces van Natech-risicoanalyse.

Dit document is gericht op exploitanten van Seveso bedrijven en inspecteurs van de overheid. De verstrekte informatie is echter ook gericht aan de nationale autoriteiten die verantwoordelijk zijn voor de naleving van de wetgeving ter voorkoming van zware ongevallen.

---

<sup>1</sup> <https://ec.europa.eu/environment/seveso/legislation.htm>

## 2 Kenmerken van Natech-gebeurtenissen en bijbehorende uitdagingen

Natech-ongevallen treden op als technologische systemen worden beïnvloed door de impact van natuurlijke gevaren. Natech-ongevallen hebben in het verleden vaak aanzienlijke gevolgen gehad voor de volksgezondheid, de natuurlijke- en bouwkundige omgeving en de economie (Krausmann et al., 2017). In tegenstelling tot heersende opvattingen kunnen Natech-ongevallen ook worden veroorzaakt door “mini” natuurrampen. Zo vonden Krausmann en Baranzini (2012) in een onderzoek naar het risicobeheer van Natech in de Europese Unie, dat het aantal ongevallen door bliksem en lage temperatuur werden veroorzaakt, aanzienlijk hoger lag dan het aantal ongevallen veroorzaakt door storm en aardbevingen.

Bij risicobeheersing m.b.t. Natech-ongevallen dient rekening te worden gehouden met:

1. Sommige natuurlijke gevaren kunnen een groot effectgebied hebben en meerdere industriële locaties en installaties simultaan treffen (bijv. aardbevingen, overstromingen, stormen). Ze kunnen meerdere Natech-ongevallen tegelijkertijd veroorzaken. Een dergelijk scenario kan leiden tot meerdere, elkaar overlappende ongevallen. Hierdoor kan een tekort aan hulpcapaciteit ontstaan.
2. Natuurlijke gevaren kunnen beschermingsmaatregelen nadelig beïnvloeden; (bijv. dijken, gasdetectoren, alarmsystemen, noodstroomgeneratoren, sprinklersystemen) die bedoeld zijn om een eerstelijnsbescherming te bieden. Natuurlijke gevaren kunnen veel maatregelen ontregelen of vernietigen, waardoor de betrouwbaarheid d.m.v. redundantie ongedaan wordt gemaakt.
3. Natuurlijke gevaren kunnen nutsvoorzieningen (bijv. stroom, water, communicatielijnen) verstoren en daardoor een ongeval veroorzaken of verergeren. Bij industriële processen kan het verlies van nutsvoorzieningen leiden tot ongewenste gebeurtenissen, bijv. verlies van controle over een industrieel proces, uitval van veiligheidsapparatuur of uitval van communicatie met lokale hulpdiensten.
4. Standaard noodmaatregelen zijn mogelijk niet geschikt tijdens een ongeval dat veroorzaakt wordt door natuurlijke gevaren. Evacuatie of het vinden van tijdelijk onderdak is mogelijk niet haalbaar. Infrastructuur kan onbruikbaar zijn waardoor hulpdiensten niet ter plaatse kunnen komen (Steinberg et al., 2008). Bovendien is bescherming tegen het vrijkomen van chemische stoffen door binnen te blijven ("shelter-in-place") niet mogelijk als de structurele integriteit van een gebouw is aangetast door natuurgeweld.
5. Natuurlijke gevaren en gewone ongevallen kunnen elkaar verergeren. Lekkages van gevaarlijke stoffen kunnen bij een overstroming leiden tot het verspreiden van vervuiling of brandrisico's over grote gebieden. Ook kunnen de eigenschappen van chemicaliën veranderen bij contact met water (stormvloed, regen); er kunnen giftige of ontvlambare dampen ontstaan.
6. Vergeleken met (gewone) technologische ongevallen, hebben Natech-ongevallen een grotere kans op domino-effecten (uitbreiding naar naastgelegen installaties of inrichtingen) (Krausmann et al., 2017, blz. 4). Dit komt vooral door uitval of beperkte effectiviteit van maatregelen bij Natech-incidenten (zie hiervoor de bovengenoemde aandachtspunten).
7. Natuurlijke gevaren kunnen andere natuurlijke gevaren veroorzaken (bijv. zware regenval die een aardverschuiving veroorzaakt; een aardbeving die een tsunami veroorzaakt). Natuurlijke

gevaren en hun vervolg-effecten kunnen afzonderlijk schade veroorzaken, maar ook in gecombineerde vorm. In het geval van de aardbeving in Tohoku in 2011 was de tsunami de belangrijkste bron van schade en droeg deze ook bij aan de verspreiding van gevaarlijke stoffen in het milieu (BARPI, 2013).

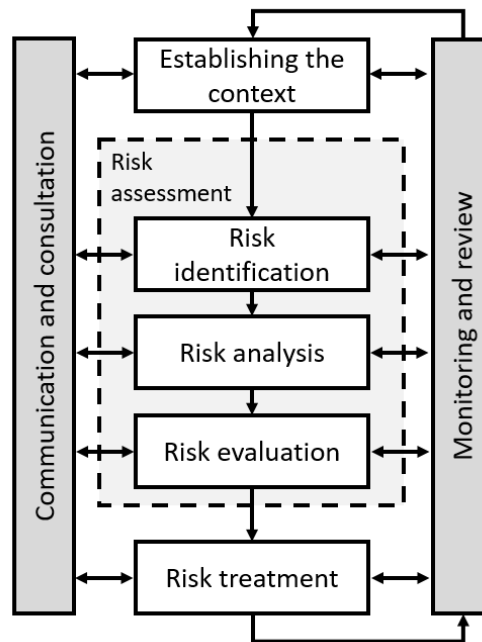
8. Natuurlijke gevaren veranderen qua tijd en locatie als gevolg van klimaatverandering. Anticipatie op, en aanpassing aan dergelijke veranderingen is nodig voor effectieve Natech-  
risicobeheersing. Nieuwe inzichten, ervaringen en bestrijdingsstrategieën moeten ingepast worden in de bestaande risicoanalyse en risicobeheersing.



### 3 Introductie tot Natech risicobeheersing

“Risicobeheersing” omvat alle gecoördineerde activiteiten ter voorkoming van incidenten. Het proces loopt van risico-identificatie en -analyse tot maatregelen ter voorkoming of beperking van die risico's. Risico's worden gedefinieerd als de kans op een bepaald effect. In procesveiligheid wordt dit weergegeven in een matrix; enerzijds de ernst van de effecten, anderzijds de mate van waarschijnlijkheid. Organisaties gebruiken risicobeheersing om om te gaan met interne en externe risico's voor de bedrijfscontinuïteit en de risico's op zware ongevallen. Het risicobeheersingsproces is opgebouwd uit een aantal generieke stappen (Figuur 1).

Figuur 1. Het proces risicobeheersing



Bron: ISO 31000:2009(E)

#### 3.1 Communicatie en consultatie

Communicatie en consultatie met interne en externe stakeholders is van belang in alle fasen van de risicobeheersing. Alle mogelijke risico's moeten worden meegenomen; van oorzaak tot gevolg en van effecten tot mitigatie. Overleg zorgt ervoor dat alle belangen worden meegewogen. Let wel: percepties omtrent risico kunnen verschillen tussen belanghebbenden onderling in termen van waarden, belangen, behoeftes, aannames, vooroordelen en zorgen.

#### 3.2 Vaststellen van de context

In deze stap formuleert een organisatie haar doelstellingen, definieert zij de interne en externe parameters m.b.t. risicobeheersing en stelt zij de reikwijdte en risicocriteria voor het resterende proces vast. Hierbij is het hoofddoel van Seveso-bedrijven het beheersen van het risico voor werknemers, omwonenden en het milieu. Seveso-bedrijven zijn verplicht om de effecten van zware ongevallen op het terrein te beperken (waaronder Natech-ongevallen). De risico's moeten derhalve worden geïdentificeerd, beoordeeld en beheerst. De exploitant dient een preventiebeleid voor zware ongevallen (PBZO) op te stellen en een veiligheidsbeheersysteem (VBS) implementeren. De

verzamelde informatie, wordt o.a. gebruikt om een intern en extern noodplan op te stellen.

“Land Use Planning” (LUP) is een belangrijk onderdeel van ongeval-risicobeheer. Het heeft tot doel om vast te stellen of de risico's van een gevaarlijke industriële locatie verenigbaar zijn met het omliggende grondgebied. Conform Seveso III moet er rekening worden gehouden met de aanwezigheid van woonwijken, commerciële activiteiten, openbaar vastgoed (bijvoorbeeld ziekenhuizen en scholen), transportroutes, andere industrieën, landbouwgebieden en ecologisch beschermde gebieden. Elk van deze entiteiten kan bij een ongeval anders worden geraakt, daarom is het belangrijk om ze afzonderlijk te bestuderen. Voor Natech-risicobeheersing is LUP ook relevant om te bepalen waar natuurlijke gevaren zich kunnen voordoen. In dat geval kan worden besloten om een industrieel project elders te ontwikkelen of aanvullende beschermingsmaatregelen te treffen. Meerdere gevaarlijke inrichtingen in eenzelfde risicogebied, zouden moeten samenwerken om domino-effecten te voorkomen.

Elk bedrijf moet een eigen veiligheidsbeleid opstellen in overeenstemming met de bestaande regelgeving. Door uiteenlopende doelstellingen, kunnen risicocriteria en beoordelingsmethoden aanzienlijk verschillen tussen bedrijven onderling. Binnen één en dezelfde locatie kunnen verschillende methoden worden toegepast bij het beoordelen van verschillende soorten risico's. Bij het definiëren van risicocriteria moet rekening worden gehouden met de volgende factoren (ISO 31000:2009(E)):

- Oorzaaktype en karakter, de mogelijke gevolgen daarvan en de wijze waarop deze zullen worden gemeten;
- Hoe 'waarschijnlijkheid' wordt gedefinieerd;
- De tijdsblok(ken) van het(de) gevolg(en);
- Hoe het risiconiveau wordt bepaald;
- Stakeholder standpunten;
- Het niveau van acceptabel of aanvaardbaar risico;
- Of er rekening moet worden gehouden met gecombineerde risico's en, zo ja, hoe, en in welke combinaties.

### **3.3 Risicobeoordeling**

Risicobeoordeling is een complex proces van identificatie, analyse en evaluatie. Natech-  
risicobeoordeling vereist uitbreidingen, vergeleken met conventionele industriële risico's. Deze worden in hoofdstuk 4 in detail besproken.

#### **3.3.1 Risico identificatie**

De organisatie moet risicobronnen identificeren. Hierdoor ontstaat een lijst van risico's aanwezig op een locatie (inclusief oorzaken en gevolgen). Hierbij horen ook risico's waarop het bedrijf zelf geen invloed heeft.

#### **3.3.2 Risicoanalyse**

Risicoanalyse is gericht op het vaststellen van risico's (de ernst van de effecten en de kans van optreden). Zo'n analyse maakt gebruik van verschillende methoden om beide elementen (kans en effect) per scenario in te schatten. Deze methoden kunnen kwalitatief, semi-kwantitatief of kwantitatief

zijn (afhankelijk van beschikbaarheid van gegevens, tijd, middelen of de reikwijdte van de analyse. Hierbij wordt tevens gekeken naar factoren die van invloed zijn op kans en effect.

Risicoanalyse levert de input voor de risico-evaluatie en mitigerende maatregelen. Risicoanalyse kan ook input leveren voor besluitvorming bij bepaling van relevantie van risico's en prioritering van risicobeperkende maatregelen. Voor Natech-risicoanalyse moeten kans en effect van natuurlijke gevaren en technologische gevaren worden geanalyseerd en gecombineerd.

### **3.3.3 Risico evaluatie**

Risico-evaluatie is bedoeld als hulpmiddel bij het nemen van beslissingen; bijvoorbeeld bij keuzes tussen verschillende mitigerende maatregelen. Bij de evaluatie wordt het geanalyseerde risiconiveau vergeleken met de risicocriteria die eerder zijn vastgesteld (in de fase van context bepaling). Op basis van deze vergelijking kan de noodzaak voor mitigerende maatregelen worden vastgesteld.

## **3.4 Risicobeheersing**

Risicobeheersing bestaat uit het selecteren en uitvoeren van een of meer maatregelen om risico's te verminderen. Risicobeheersing omvat een iteratief proces van implementatie, monitoring en beoordeling dat wordt herhaald totdat een doel is bereikt.

Enkele voorbeelden van risicobeheersing zijn:

- Het risico vermijden door een activiteit te stoppen (of niet te starten);
- Het verwijderen van de risicobron;
- De mate van waarschijnlijkheid verkleinen;
- De effecten verzachten;
- Het risico delen met een andere partij of partijen (bijvoorbeeld in partnerschap, verzekering);
- Een weloverwogen beslissing nemen om het risico te aanvaarden.

Het bepalen en implementeren van een risicobeheersingsoptie vereist een kosten-baten analyse. Sommige mitigerende maatregelen zijn bijvoorbeeld onbetaalbaar. Daartegenover, sommige betaalbare opties, of combinaties daarvan, kunnen een grotere impact hebben op risicovermindering dan duurdere alternatieven.

Opties voor het behandelen van Natech-risico's worden besproken in hoofdstuk 5.

## **3.5 Monitoring en review**

Zowel de monitoring- als review vormen een integraal onderdeel van het risicobeheersingsproces. Deze activiteiten, die bijvoorbeeld worden uitgevoerd via inspecties of audits, zorgen ervoor dat de controles effectief zijn en helpen bij het verkrijgen van aanvullende informatie voor een risicobeoordeling. Ze ondersteunen de analyse en helpen om te leren uit gebeurtenissen, successen en fouten. Dat kan vervolgens leiden tot een aanpassing van de risicobeheersingsmethode. Deze stap helpt ook om de prestaties van het gehele risicobeheersingsproces te meten.

## 4 Elementen van de Natech risicobeoordeling

Een Natech-risico is een combinatie van risico's van natuurlijke gevaren en risico's van menselijk handelen. Natuurlijke gevaren kunnen man-made risico's beïnvloeden, hetzij door de kans op zware ongevallen te verhogen, hetzij door ongevallen te veroorzaken die niet zouden plaatsvinden zonder impact van een externe kracht (bijvoorbeeld het afdrijven en lekken van een tanker als gevolg van storm). Bovendien, wanneer een natuurramp een bedrijf of industriegebied treft, kan een daardoor veroorzaakte ongeval het totale effect van de natuurramp ernstig vergroten en crisisteams belemmeren (Necci et al., 2018b).

Een Natech-risicobeoordeling vereist een ander soort risicoanalyse dan een conventionele industriële benadering. Rekening moet worden gehouden met de specifieke kenmerken van Natech-risico's: getriggerd door natuurlijke gevaren en met kans op uitval van hulpcapaciteit. Natech-scenario's bevatten 3 onderdelen: een natuurramp scenario, een scenario betreffende mogelijke effecten op de installaties en een gevolgsceario om de omvang van de schade te beoordelen. In dit hoofdstuk worden de stappen besproken die nodig zijn om Natech-risicobeoordeling uit te voeren (Stap 1-6) en te evalueren (Stap 7).

Dit zijn:

1. Identificatie en karakterisering van natuurlijke gevaren;
2. Identificatie van kritieke apparatuur;
3. Analyse van natuurrampschade aan kritieke apparatuur;
4. Natech gevarenidentificatie;
5. Natech gevolganalyse;
6. Natech-gebeurtenis kansberekening;
7. Evaluatie van het Natech-risico.

Een Natech-risicobeoordeling vereist veel invoerdata, zoals informatie over natuurlijke gevaren, kritieke apparatuur, effectmodellen, gevolganalysemodellen, kansberekeningen en informatie over de risico receptoren (Krausmann, 2017).

### **Box 1. Onzekerheden en datagebrek**

Doorgaans bevatten risicoanalyses bepaalde onzekerheden ten aanzien van modellen, invoerdata en algemene analysekwaliteit (CCPS, 2000). De Natech-risicoanalyse bevat doorgaans een groter aantal onzekerheden dan de analyse van andere soorten technologische risico's. Er is vaak een gebrek aan gedetailleerde gegevens over de natuurramp-trigger (vooral bij zeer zeldzame gebeurtenissen), of kwetsbaarheidsgegevens van apparatuur in relatie tot natuurlijke gevaren. Ook het ontbreken van adequate modellen voor Natech-risicoanalyse speelt een rol. De analist kan ontbrekende gegevens aanvullen met een deskundig oordeel dat - van nature - subjectief is, waardoor de analyse nog onzekerder wordt. Transparantie over zowel gedane aannames als de bijbehorende onzekerheden, geeft de lezer/gebruiker een referentiekader.

### 4.1 Natuurgevaar: Identificatie en karakterisering

Deze stap bestaat uit het verzamelen en analyseren van gegevens over natuurlijke gevaren (CCPS, 2019). Natech-ongevallen kunnen worden veroorzaakt door alle soorten natuurlijke gevaren; snel optredende soorten (aardbevingen, stormen, stortregens) of langzaam optredende soorten (zeespiegelstijging, droogte, hogere temperaturen). Voor elk locatie-relevante natuurramp moet ten minste één natuurramp scenario worden beschreven. Verschillende criteria kunnen worden gebruikt voor natuurramp selectie (grootste kans, worst case, enz.). De keuze dient redelijk en gerechtvaardigd te zijn.

De beschrijving van natuurlijke gevaren kan deterministisch of probabilistisch zijn. Bij een deterministische benadering is de kans niet relevant, maar wordt uitgegaan van het effect (berekeningen, beredenering en casestudies). In de probabilistische benadering omvat de gevarenbeschrijving naast een inschatting van de omvang een schatting van de kans.

Informatie over natuurlijke gevaren kan op twee manieren worden beschreven:

1. Als een scenario (of als een reeks scenario's) met een bepaalde omvang en intensiteit (windsnelheid, regen of categorie aardbeving). Elk scenario heeft een kans van optreden.
2. Als een gevarencurve. De kans dat een bepaalde omvang of intensiteit (windsnelheid, regen of categorie aardbeving) wordt geëvenaard of overschreden, wordt beschreven d.m.v. een rekenmodel. De uitkomst wordt weergegeven in gevarencurven. Voor bijv. aardbevingen, vulkanenuitbarstingen en tsunami's, wordt deze informatie op kaartmateriaal weergegeven.

Figuur 2 toont een voorbeeld van een scenario met een terugkeerperiode van 100 jaar in de vorm van een overstromingskaart. Figuur 3 toont een voorbeeld van een gevarencurve die de relatie weergeeft tussen seismische activiteit en de kans daarvan op een specifieke locatie.

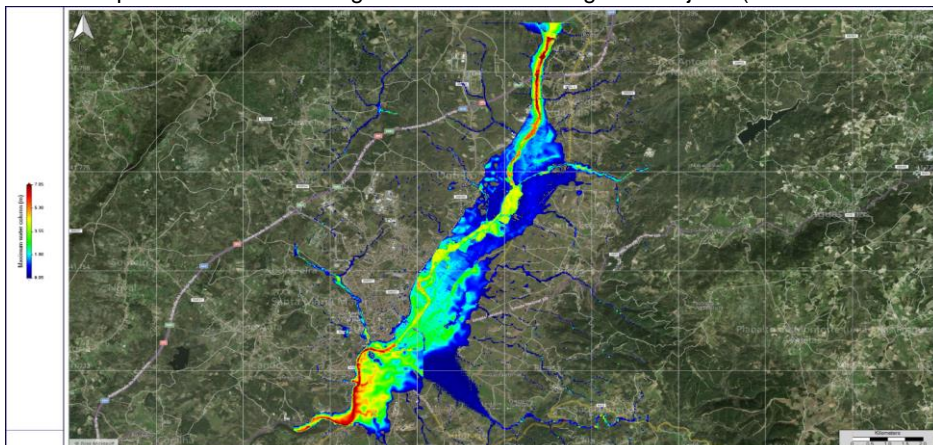
Door de natuurlijke gevaren op een bepaalde locatie in kaart te brengen kunnen risico's voor installaties bij aanwezige bedrijven kunnen worden geïdentificeerd. Sommige natuurscenario's kunnen van invloed zijn op meerdere installaties tegelijk.

Op basis van deze inventarisatie, kunnen effecten van natuurscenario's worden geëvalueerd. Denk hierbij aan effecten als: schade elektriciteitsinfrastructuur, en wegennet.

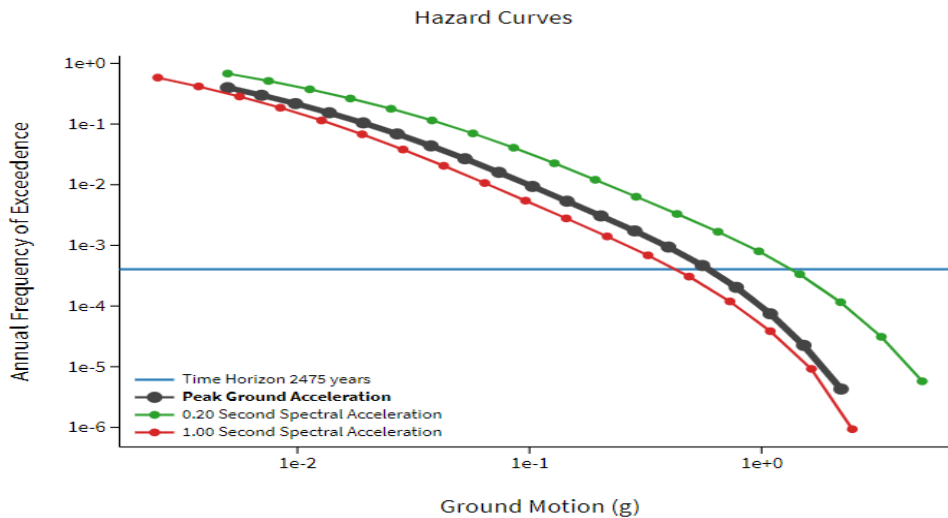
Beschrijving van natuurscenario's zouden aan de volgende voorwaarden moeten voldoen:

- Beschrijving van het type natuurscenario en de kenmerken ervan.
- Zowel voldoende compleet als gedetailleerd.
- De mate van detaillering moet analyse van de risico's op zware ongevallen ondersteunen.
- Voldoende vakkennis en vakbekwaamheid bij de beoordelaar.
- Beschikbaarheid van brondocumentatie voor latere beoordelingen.
- Beschrijving van het natuurscenario's op basis van betrouwbare bronnen.
- Actualiteit van gegevens omtrent natuurscenario's.
- Aandacht voor natuurscenario's met toenemende frequentie zoals klimaatverandering.
- Aandacht voor aanwezige gebruiksfuncties en genomen maatregelen in het gebied.
- Inventarisatie van kritische installaties.

**Figuur 2.** Een waterdiepte kaart van een terugkerende overstroming elk 100 jaar. (Bron: Fernandes et al., 2022)



**Figuur 3.** Voorbeeld van een gevarencurve voor aardbevingen op basis van de kans op overschrijding van een bepaalde seismische categorie. (Bron: USGS, Unified Hazard Tool, 2022, <https://earthquake.usgs.gov/hazards/interactive/>)



### Box 2. Klimaatverandering

Klimaatverandering leidt tot extremer weer dat vaker voorkomt en impact kan hebben op installaties:

- Zeespiegelstijging
- Sneeuwsmelting
- Woestijnvorming
- Bosbranden
- Permafrost ontdooiing

Verschillende maatregelen kunnen helpen om risico's - als gevolg van klimaatverandering - het hoofd te bieden, bijvoorbeeld:

1. Het ontwikkelen van een klimaat-gedreven aanpassingsstrategie.
2. Analyse van natuurlijke gevaren die specifiek worden veroorzaakt door klimaatverandering of daardoor worden verergerd.
3. Beseffen dat informatie over natuurlijke gevaren uit het verleden op zichzelf onvoldoende inzicht geeft om toekomstig gevaar over de gehele operationele levensduur van de locatie in te schatten.
4. Risicobeoordelingen actueel houden en voorzorgsmaatregelen aanpassen wanneer nieuwe informatie over natuurlijke gevaren beschikbaar komt.

## 4.2 Identificatie van kritische installaties

Voor bedrijfsterreinen waar een natuurscenario mogelijke is moet potentiële schade aan alle kritische installaties worden beoordeeld. Deze analyse moet gericht zijn op apparatuur waarvan een plotselinge uitval in ultimo kan leiden tot een gevaarlijke situaties<sup>2</sup>.

Eerder onderzoek biedt pragmatische methoden voor rangschikking van verschillende installaties, op basis van hun vatbaarheid voor Natech-gevolgen. Voor de rangschikking worden de volgende criteria gebruikt: de bedrijfsomstandigheden en het volume en de fysieke toestand van gevaarlijke stoffen.

<sup>2</sup> Een gevaarlijke situatie is een omstandigheid waarbij mensen, gebouwen of het milieu aan een of meer gevaren worden blootgesteld (ISO 14971)

Opslag- en procesomstandigheden die invloed kunnen hebben op Natech-gevolgen:

- **Temperatuur:** Hoge temperatuur vergroot de ontvlambaarheid van brandbare stoffen en maakt gevaarlijke stoffen in het algemeen instabieler. Opslag vindt plaats onder hogere druk en verdamping bij vrijkomen gaat sneller volgt de Antoine-evenwicht).
- **Druk:** Hoge druk zorgt ervoor dat stoffen met hoge druk kunnen vrijkomen
- **Aggregatietoestand:** Vloeistoffen bevatten meer gevaarlijke stoffen per volume-eenheid dan gassen, maar ze hebben tijd nodig om te verdampen. Gassen worden meestal onder hoge druk opgeslagen en verwerkt (zie Druk) en komen bij een lekkage onmiddellijk in de lucht. Gassen die onder druk vloeibaar worden gemaakt, hebben gevaarlijke eigenschappen van zowel vloeistoffen als gassen. Ze hebben een hoge dichtheid, vergelijkbaar met vloeistoffen, worden onder druk bewaard en expanderen direct bij vrijkomen. Oververhitte vloeistoffen gedragen zich op dezelfde manier als gas dat onder druk vloeibaar wordt gemaakt. Gassen die bij zeer lage temperatuur vloeibaar worden gemaakt, hebben hetzelfde gedrag als vloeistoffen en ze expanderen doorgaans niet bij het vrijkomen. Ze verdampen echter veel sneller dan de meeste vloeistoffen.
- **Volume:** De grootste hoeveelheden aan stoffen zijn te vinden in opslagvaten. Ook pijpleidingen en leidingen kunnen grote hoeveelheden stoffen bevatten. Reactoren zijn meestal de kleinste proceseenheden. Andere eenheden die aanzienlijke hoeveelheden gevaarlijke stoffen kunnen bevatten, zijn warmtewisselaars, stookovens en boilers.

Tabel 1 geeft een voorbeeld van hoe deze analyse wordt toegepast om te komen tot een rangschikking van kritische apparatuur. Deze methode (Antonioni et al.; 2009) houdt rekening met maximale schadeafstanden (op basis van letaliteit) van verschillende installaties en stoffen.

Let op: de rangschikking van de kritische installaties kan afwijken afhankelijk van het gekozen gezichtspunt. Bijvoorbeeld: opslagvaten met vloeibaar smeermiddel kunnen hoog scoren op impact op het milieu, terwijl de impact op mens/ activa laag is (smeerolie is niet ontvlambaar of giftig).

**Tabel 1.** Voorbeelden voor het identificeren en rangschikken van kritische installaties (Antonioni et al., 2009).

	Opslagvaten	Grote leidingen	Kolommen	Reactoren/warmtewisselaars
Vloeibaar gas onder druk	4	4	3	3
Oververhitte vloeistof	3	3	2	2
Gas (gecomprimeerd)	3	2	2	1
Cryogeen vloeistof	2	2	2	1
Vloeistof	1	1	1	1

### 4.3 Schade aan kritische apparatuur vanwege natuurgevaar

Voor elk natuurgevaar moet geïdentificeerd worden welk schade aangericht kan worden aan welke installaties. De belangrijkste schademodi voor de meest voorkomende soorten apparatuur worden hieronder beschreven.

**Knikschade:** Een knik op zichzelf veroorzaakt meestal geen LOC. Het kan echter structurele instabiliteit veroorzaken en kan gepaard gaan met andere soorten schade, zoals het scheuren van leidingen en verbindingen of het scheuren van metalen platen. Knikschade wordt vaak waargenomen

in het onderste deel van atmosferische opslagvaten na sterke aardbevingen en manifesteert zich als "olifantenpoot" knik of "diamant" knik van de vatwand (Eidinger et al., 2001; Cooper, 1997). Knikschade kan ook optreden als gevolg van inslag van puin, b.v. tijdens overstromingen, aardverschuivingen of harde wind, of door windknik in lege tanks. Figuur 4 toont een voorbeeld van knikschade als gevolg van aardbevingen.

**Scheuren in leidingen en flenzen:** Aardbevingen en overstromingen kunnen vervorming en scheuren veroorzaken. Lage temperaturen kunnen leiden tot stolling (bevrozing) van de inhoud in de leidingen, waardoor doorstroming stopt. Figuur 5 toont een leidingbreuk door een aardbeving.

**Figuur 4.** Knikschade vanwege aardbeving bij silo's (Foto: E. Krausmann)



**Figuur 5.** Leidingbreuk bij een flensverbinding tijdens een aardbeving (Foto: A.M. Cruz)



**Scheuren van metalen constructie:** wanneer de vervorming voldoende groot is, kunnen de geklonken platen waaruit de behuizing van een vat bestaat, uit elkaar vallen en een LOC veroorzaken. Dit fenomeen komt vaker voor bij apparatuur waarvan de platen aan elkaar zijn geklonken of vastgeschroefd (Eidinger et al., 2001; Cooper, 1997).

**Loskomen van de fundering:** Het scheuren van het vat op deze locatie kan leiden tot het ontsnappen van gevaarlijke stoffen. Figuur 6 toont een voorbeeld van schaal-tot-bodem detachement



tijdens een orkaan, waarschijnlijk als gevolg van stormvloed, windstoten en puin.

**Steunpoot falen:** Veel apparaten hebben steunpoten om hun gewicht te dragen. Deze poten zijn meestal ontworpen om het eigen gewicht van de apparatuur te dragen. Bij aardbevingen kunnen zijdelingse belastingen de ontwerpspecificaties van steunpoten overschrijden en ervoor zorgen dat ze defect raken, waardoor de hele uitrusting instort (Eidinger et al., 2001; Cooper, 1997). Afbeelding 7 toont een voorbeeld van steunpoot falen in de nasleep van een aardbeving.

**Breuk in vaste dak van een opslagvat:** Wanneer een opslagvat een vast dak heeft, kan dit kwetsbaar zijn voor een natuurramp, omdat dit onderdeel een lichte constructie heeft. Sterke wind kan het dak beschadigen. Ook vloeistof die klotst vanwege een aardbeving kan ervoor zorgen dat het dak gaat knikken. Figuur 8 toont een voorbeeld van windschade aan het vaste dak van een opslagvat.

**Figuur 6.** Van fundament losgekomen atmosferische opslagtank na een orkaan (Foto: M. Nauman, FEMA)



**Figuur 7.** Steunpoot falen van een sferisch opslagvat als gevolg van een aardbeving (Foto: H. Nishi)



**Figuur 8.** Schade aan het vaste dak van een atmosferische opslagvat veroorzaakt door sterk wind (Bron: NOAA)



**Falen van een drijvend dak:** Sommige opslagtanks hebben geen vast dak maar een metalen deksel dat op de vloeistof drijft. Wanneer de dakschade oploopt, kan het deksel in de vloeistof eronder wegzakken. Wanneer dit gebeurt, wordt de vloeistofoppervlakte blootgesteld aan lucht en begint het product te verdampen, met het vrijkomen van dampen in de atmosfeer tot gevolg (Necci et al., 2018a). Wanneer de vloeistof brandbaar is, kan hierdoor brand ontstaan.

**Verschuiven en kantelen:** Door een aardbeving en/of tsunami's kan een tank verschuiven of kantelen (Eidinger et al., 2001). Figuur 9 en 10 tonen verschuiving/ kanteling van opslagtanks.

**Perforatieschade:** Scherpe voorwerpen die tegen installaties worden geduwd, kunnen knikken en gaten in de wand veroorzaken met kans op LOC (Necci et al., 2018a). Lekschade kan van invloed zijn op apparatuur en leidingen.

**Figuur 9.** Verschoven atmosferische opslagtank en ander stormvloedschade als gevolg van een orkaan, inclusief verschoven leiding (Bron: NOAA Office of Response and Restoration)



**Figuur 10.** Omgevallen en beschadigde atmosferische opslagvat vanwege een stormvloed na een orkaan (Bron: NOAA Office of Response and Restoration)



**Ontsteking en vonken:** Natuurlijke gevaren kunnen leiden tot brand van brandbare vloeistoffen (b.v. bliksem en bosbranden). In zulke gevallen wordt apparatuur niet door de natuurramp zelf beschadigd maar door brand of explosies volgend op de natuurramp. Een onderzoek naar branden in atmosferische opslagvaten (Chang en Lin, 2006) toont aan dat bliksem meer dan 90% van deze branden veroorzaakt. Aardbevingen zijn een andere oorzaak van ontstekingen, bij de afdichting tussen tankwanden kunnen dicht bij de vloeistof vonken ontstaan (Girgin, 2011).

**Overvulling:** Door overstroming en hevige regenval kan water in installaties stromen waardoor de capaciteit overschreden wordt. Hierdoor kan de inhoud vrijkomen. In dit geval is het apparaat technisch niet beschadigd, maar zijn functie en insluitfunctionaliteit is niettemin aangetast.

Tabel 2 toont de relatie tussen natuur gevaren en schade. Tabel 3 toont een schadebeeld en de installaties die er het meest vatbaar voor zijn.

**Tabel 2.** Schadebeeld en hun relatie tot natuurramp triggers.

Schade (beeld)	Aardbeving	Overstroming (1)	Stormvloed (2)	Zware regenval	Bliksem	Wind	Aarde- verschuiving	Lage temperatuur
Knikken	X	X	X	X		X	X	
Breuk in leidingen/fenzen	X	X	X			X	X	X
Scheuring constructie	X	X	X			X		
Loskomen van fundering	X		X					
Steunpoot falen	X		X				X	
Vast dakschade	X			X	X	X		X
Drijvend dakschade	X			X	X	X		
Verschuiving	X	X	X			X	X	
Kantelen	X	X	X			X	X	
Perforatieschade		X	X		X	X	X	
Ontsteking en vonken	X	X	X		X			
Overvullen		X	X	X				

(1) Langzaam-optredende vloed zoals zeespiegelstijging en rivieren.

(2) Snel-optredende vloed zoals bij dambreuk en tsunami's.

**Tabel 3.** Veel voorkomende schadebeelden in relatie tot installaties.

	Atmosferische opslagtank	Hogedrukvaten (bullet)	Hogedrukvaten (sphere)	Warmtewisselaar	Phase separator	Kolom	Stack	Dijk/Plas	Afvoeren
Knikken	X					X	X		
Breuk in leidingen/fleuzen	X	X	X	X	X	X			
Scheuring	X								
Schaal-tot-bodem detachement	X								
Steunpoot falen	X	X	X	X	X	X			
Vast dakschade	X								
Drijvend dakschade	X								
Verschuiving	X	X	X		X				
Kantelen	X	X	X		X	X			
Perforatie schade	X								
Ontsteking en vonken	X								X
Overvullen	X							X	X

### Box 3. Schadebeeld en operationele omstandigheden

Het is ook belangrijk om vast te stellen onder welke bedrijfsomstandigheden de kans op schade door natuurlijke gevaren groter is. Zo hebben opslagvaten met een hoge vulling meer kans om te falen bij aardbevingen als gevolg van de klotsende vloeistof (Eidinger et al., 2001), terwijl vaten met een lagere vulling eerder falen bij overstromingen omdat een lager gewicht het drijfvermogen verhoogt (Godoy, 2007)

### Box 4. Structuren ontworpen tegen impact van natuurgevaar

Sommige installaties op een industrieterrein zijn ontworpen om bestand te zijn tegen natuurlijke gevaren, in overeenstemming met bestaande codes of normen. Operators kunnen daardoor worden verleid om te beweren dat er geen Natech-ongelukken kunnen plaatsvinden. Immers, de installatie is ontworpen om natuurlijke gevaren te weerstaan. Deze benadering kan misleidend zijn, aangezien de gebruikte ontwerp-referenties mogelijk worden overschreden in geval van natuurlijke gevaren die ernstiger zijn dan de specificaties.

#### Waarom?

Ontwerpprocedures voor industriële installaties zijn gebaseerd op het identificeren van "grenswaarden". Bij deze grenswaarden ontstaat geen schade. De selectie van grenswaarden is gebaseerd op de kans van voorkomen van het natuurgevaar. De installatie kan natuurgevaar weerstaan zolang de intensiteit lager is dan de gekozen grenswaarde. Om deze reden kan de ontwerpprocedure alleen een vermindering van risico voor de constructie met zich meebrengen, maar het risico niet volledig wegnemen. Bij de beoordeling van risico's op zware ongevallen wordt echter doorgaans onvoldoende rekening gehouden met restrisico's.

#### Wat moet er anders gebeuren?

Accepteer dat Natech ongevallen mogelijk zijn ook al zijn installaties ontworpen om natuurgevaar te kunnen weerstaan. Pas nadat de Natech-scenario's zijn geanalyseerd en geëvalueerd, kan bepaald worden of een natuurlijk gevaar tot escalatie kan leiden.

#### 4.4 Bijbehorende ongevalsfactoren: veiligheidsbarrières en nutsvoorzieningen

Schade aan het proces als geheel kan starten met schade aan een controlesysteem, veiligheidsbarrières en andere apparatuur die wellicht geen gevaarlijke stoffen bevat, maar waarvan de werking nog steeds veiligheid kritisch kan zijn (Necci et al., 2018b; Krausmann en Salzano, 2017). Tevens kunnen hulpsystemen verstoord worden. Onder bepaalde omstandigheden kan het een indirecte trigger worden voor een Natech-ongeval of voor de verergering ervan.

Dit kan één of beide van onderstaande gevolgen opleveren:

1. Veiligheidssystemen (bijv. lek-/branddetectie, brandbestrijding, automatische uitschakeling) kunnen door natuurlijke gevaren worden verstoord. Dit kan leiden tot gevaarlijke situaties wanneer de verstoring vervolgens niet wordt verholpen. Dit verhoogt de kans op Natech-ongevallen.
2. Essentiële hulpsystemen of nutsvoorzieningen (bijv. elektrische stroomvoorziening, perslucht, stoom, koelwater) worden verstoord, wat leidt tot onbeheersbare procesverstoringen die gevaarlijke situaties kunnen veroorzaken. Uiteindelijk kan dit leiden tot zeer grootschalige ongevallen (zie ook paragraaf 4.5.2).

Hoewel de kwetsbaarheid van hulp- en veiligheidssystemen in verschillende onderzoeken is gedocumenteerd (bijv. Necci et al., 2018a, b; Misuri et al., 2021; Girgin, 2011), ontbreekt het nog aan kwantitatieve gegevens voor risicobeoordeling. Een worst-case benadering wordt daarom aanbevolen. Bij het beoordelen van de kwetsbaarheid van veiligheids- en hulpsystemen, is de algemene regel om elk systeem dat niet specifiek is ontworpen voor de intensiteit van een gekozen natuurgevaar te weerstaan, als niet-beschikbaar te beschouwen

Onderstaande lijst toont de meest kritische systemen t.a.v. in een procesinstallatie:

**Stroomuitval:** Analyse van Natech-ongevallen in het verleden toont aan dat uitval van de stroomvoorziening een terugkerend kenmerk is. Stroomuitval alleen zou niet tot ernstige gevolgen mogen leiden. Immers, procesinstallaties hebben meestal back-up stroombronnen die in werking treden als de primaire stroombron uitvalt. Back-up stroomapparatuur blijkt niet te werken vanwege dezelfde natuurlijke gebeurtenis die de hoofdstroom voorziening verstoort.

**Verlies van water:** Water is cruciaal voor een aantal functies in een procesinstallatie. Natuurlijke gevaren kunnen het waternetwerk verstoren door watertanks en reservoirs te beschadigen, leidingen breken of losraken, of pompen onklaar maken. Water is essentieel om kritische apparatuur (bijvoorbeeld chemische reactoren) gekoeld te houden. Als er geen water beschikbaar is, kan de operator de controle over kritieke processen verliezen, zoals bij exotherme chemische reacties, wat mogelijk kan leiden tot op hol geslagen reacties en ontsnappingsgevaar. Bovendien hebben brandbestrijding systemen grote hoeveelheden water nodig om branden te beheersen en te blussen.

**Verlies van stoom:** Net als bij waterverlies, kan stoomverlies processtoringen veroorzaken. Dit kan leiden tot productstolling in de proceslijnen. Uiteindelijk kan dit tot drukverhoging leiden, waardoor de leidingen kunnen falen en lekken.

**Verlies van perslucht:** Perslucht wordt in veel installaties gebruikt voor het aandrijven van pneumatisch gereedschappen, maar ook voor automatiseringsapparatuur en transportbanden. Verlies van perslucht kan leiden tot verlies van procescontrole en gevaarlijke procesverstoringen.

**Falen van controlesystemen:** Procesbesturing is een essentieel kenmerk van alle industriële processen. Schade aan een van deze systemen resulteert in het falen van het hele besturingssysteem. Grote processen hebben doorgaans een “distributed controle systeem” (DCS) dat vele regelketens bevat. Het is heel gebruikelijk dat besturingssystemen een of meer niveaus van redundantie bevatten om de betrouwbaarheid te vergroten. Natuurlijke gevaren kunnen echter tegelijkertijd zowel het hoofdcontrole systeem als de back-up systemen beïnvloeden.

**Falen van instrumenten:** Instrumenten voor de detectie en meting van procesvariabelen kunnen door natuurlijke gevaren worden beschadigd. Verstoringen in gas-, rook- en branddetectoren op een industrieterrein kunnen bijvoorbeeld een gevaarlijke situatie of een ongeval niet detecteren, of zelfs alarmen niet activeren, waardoor niet tijdig op de dreiging wordt gereageerd.

**Falen van pomp/compressor:** Pompen en compressoren kunnen - tijdens een natuurramp - op verschillende manieren falen. Een gebrek aan elektriciteit tijdens een stroomstoring betekent dat deze niet meer werken. Een overstroming of sterk wind kan betekenen dat de motor onder water komt te staan of in aanvaring raakt met puin. Hun falen kan drukverlaging in proceseenheden of onderbreking van de doorstroom (of terugkeer) veroorzaken in belangrijke proceslijnen, waardoor ongecontroleerde procesfluctuaties ontstaan die kunnen leiden tot LOC.

**Fakkel falen:** Natuurlijke gevaren kunnen schade aan, of storing van, de fakkel veroorzaken. Vele industriële fabrieken gaan in noodstop bij natuurlijke gevaren. De inhoud van proceseenheden wordt naar de fakkel geleid om veilig te worden verwijderd. Als een fakkel faalt, zullen gevaarlijke stoffen niet worden verbrand maar in plaats daarvan rechtstreeks in het milieu worden vrijgegeven.

#### **Box 5. Veelvoorkomende oorzaken van falen**

Natuurlijke gevaren kunnen tegelijkertijd nutsvoorzieningen, hulpsystemen en veiligheidsbarrières verstoren. Dit kan leiden tot scenario's die normaal gesproken als onmogelijk worden beschouwd, zoals bij het Arkema-ongeval in 2017 dat volgde op orkaan Harvey (Necci et al., 2018a).

## **4.5 Identificatie van Natech-gevaar**

Natech-ongevallen worden veroorzaakt door natuurlijke gevaren die installaties met gevaarlijke stoffen verstoren. Natech-gebeurtenissen kunnen worden veroorzaakt door directe schade aan kritische installaties die gevaarlijke stoffen bevat, of indirect als gevolg van procesvariaties, verlies van nutsvoorzieningen of storingen in het beschermings- en controlesysteem.

### **4.5.1 Rechtstreekse effecten van natuurgevaar**

Gevaarlijke stoffen kunnen vrijkomen wanneer de installatie waarin ze zich bevinden, wordt beschadigd of vernietigd door een natuurlijke gebeurtenis. De soorten schade zijn voor de meest voorkomende soorten installaties zijn besproken in paragraaf 4.3.

Natuurlijke gevaren veroorzaken twee hoofdcategorie-ongevallen. Beide zijn rechtstreeks van invloed op gevaarlijke stoffen en hun insluitsystemen:

1. Schade aan de insluitsystemen, en de lozing van gevaarlijke stoffen;
2. De ontsteking van ontvlambare stoffen.

Schade aan insluitsystemen met gevaarlijke stoffen: het belangrijkste doel is om te bepalen of het natuurgevaar het systeem kan beschadigen en zo ja, hoe omvangrijk de schade zal zijn. De ontwerper

van het systeem kan inzicht geven in de te verwachten prestaties bij overbelasting. De eenvoudigste methode om schade te beoordelen is met een "ja/nee" -logica, bij de vraag of insluiting faalt wanneer de ontwerpspecificaties worden overschreden. Een andere klassieke methode voor het beoordelen van potentiële schade is het gebruik van schadebeelden in combinatie met kwetsbaarheidscurven (Eidinger et al., 2001; FEMA, 2015). Schadebeelden worden meestal onderverdeeld in kwalitatieve schadeklassen (bijvoorbeeld geen, klein, matig, groot, catastrofaal).

Ontsteking van brandbare stoffen: het tweede type insluitsystemen met explosieve atmosfeer. De resulterende brand of explosie veroorzaakt vaak een zwaar ongeval. Vaak veroorzaakt dit echter ook grote schade aan insluitsystemen waardoor gevaarlijke stoffen vrijkomen. Wanneer dit gebeurt, is de daaropvolgende brand of explosie meestal veel groter dan de oorspronkelijke brand die door de natuurramp is ontstaan. Bovendien kunnen branden en explosies zich uitbreiden naar nabijgelegen installaties of locaties en een zogenaamd "domino-effect" creëren (Reniers en Cozzani, 2013).

#### **4.5.2 Indirecte effecten**

Indirecte oorzaken van Natech-ongevallen hebben betrekking op onbeheersbare procesvariëaties gevolg van een natuurramp. Zoals vermeld in paragraaf 3.4 kan ook het uitvallen van nutsvoorzieningen of van redundante hulpsystemen leiden tot gevaarlijke situaties of Natech-ongevallen. Ongevallenanalyses uit het verleden tonen aan dat Natech-ongevallen indirect kunnen optreden ook wanneer er redundante veiligheidssystemen aanwezig zijn. Daarom dienen ook indirecte oorzaken van Natech-ongevallen te worden meegenomen in de risicobeoordeling.

Met een analyse van processen en de onderlinge relaties, kunnen indirecte oorzaken van Natech scenario's worden geïdentificeerd. Er is een aantal instrumenten beschikbaar voor identificatie en analyse van conventionele gevaren (bijv. HAZOP, FMEA, FMECA, LOPA, checklists, "wat-als" analyse). Er zijn echter diverse factoren die de identificatie van risico's op Natech-ongevallen ingewikkelder maken.

Een van de grootste moeilijkheden om te overwinnen is de neiging tot simplificeren. Sommige scenario's kunnen bijvoorbeeld als uiterst onwaarschijnlijk of zelfs onmogelijk worden beschouwd onder normale omstandigheden, omdat ze uitgaan van gelijktijdig falen van vele systemen. Doorgaans worden zulke scenario's niet meegenomen in conventionele analyses omwille van eenvoud en onderscheiden kosteneffectiviteit (Krausmann en Necci, 2021). Echter, gelijktijdig uitval van meerdere systemen is precies het kenmerk van Natech-ongevallen. Natuurlijke gevaren zijn dan ook een belangrijke storingsoorzaak in vele systemen. Tijdens de identificatiefase van indirecte Natech-gevaarsscenario's, mogen risicoanalisten ongevalsscenario's niet uitsluiten op basis van een "veronderstelde onmogelijkheid", tenzij een detaillender onderzoek naar het domino-effect van natuurlijke gevaren op de betrokken systemen geen aanwijzingen heeft opgeleverd.

#### **4.6 Natech-gevolgen analyse**

Voor Natech-risicobeheer is een van de grootste uitdagingen het identificeren en analyseren van degelijke gevolgsenario's. Zowel de kans op een ongeval als de gevolgen daarvan kunnen worden bepaald via modellering (van de uitkomsten van een gebeurtenis of reeks gebeurtenissen). Dit gebeurt door extrapolatie uit experimentele studies of uit beschikbare gegevens. Een gevolgsenario bestaat uit een LOC en vervolgens een reeks gebeurtenissen die leidt tot een fysiek effect (bijvoorbeeld een brand, explosie of toxische emissie) dat schade kan toebrengen aan mensen, milieu of activa kan.

Natech-scenario's verschillen van technologische risico's (zie Natech-kenmerken in hoofdstuk 2). Het voldoet niet om niet-Natech-gevolgscenario's te hergebruiken voor het analyseren van Natech-scenario's, tenzij er kan worden geverifieerd dat de scenario-omstandigheden hetzelfde zijn. Succesvolle modellering van Natech-scenario's vereist een juiste beoordeling van LOC als gevolg van natuurgevaar. Daarentegen wijken de modellen voor de beoordeling van de fysieke effecten van Natech-ongevallen niet af van de modellen voor niet-Natech-ongevallen. Specifieke technische informatie is beschikbaar in Mannan (2005) en van den Bosch en Weterings (2005).

#### 4.6.1 Loss of containment (LOC) en kritieke gebeurtenissen

Kritische gebeurtenissen staan aan het begin van het proces dat leidt tot een Natech-ongeval. Er zijn twee soorten kritische gebeurtenissen die kunnen worden veroorzaakt door natuurgevaren:

- Kritische gebeurtenissen door directe schade aan een insluitsysteem met gevaarlijke stoffen.
- Kritische gebeurtenissen na een processtoring.

De meeste kritische gebeurtenissen leiden tot LOC van gevaarlijke stoffen, maar er zijn ook andere kritische gebeurtenissen, zoals op hol geslagen reacties, deflagratie of brand. Kortheidshalve noemen we alle uitkomsten van kritische gebeurtenissen, LOC's ("loss of containment"). De meest voorkomende LOC-scenario's kunnen worden ontleend aan de scenario's die worden gebruikt om niet-Natech ongevallen te modelleren. Voorbeelden van typische LOC-scenario's worden vermeld in tabel 4.

**Tabel 4.** Generieke LOC's voor diverse soorten systemen (Bron: Uijt de Haag and Ale, 2005).

LOC-gebeurtenis	Beschrijving	Waar komt het voor
Onmiddellijke lozing	Onmiddellijke lozing van de gehele opslag van gevaarlijke stoffen	Opslag- en procesvaten, warmtewisselaars
Doorlopende lozing in 10 minuten	Doorlopende lozing van de gehele opslag van gevaarlijke stoffen; 10 minuten, constante snelheid	Opslag- en procesvaten, warmtewisselaars
Doorlopende lozing uit gat in een vat	Doorlopende lozing van gevaarlijke stoffen uit een gat van vastgestelde omvang	Opslag- en procesvaten, warmtewisselaars
Volledige breuk	Doorlopende lozing van gevaarlijke stoffen door leidingbreuk (gatgrootte gelijk aan diameter). Lozing gebeurt normaliter vanuit beide kanten.	Leidingen, pompen, warmtewisselaars
Lekkage	Doorlopende lozing van gevaarlijke stoffen door lek in pijp (gatgrootte is een fractie van de diameter).	Leidingen, pompen, warmtewisselaars
Lekkage uit overloopventiel	Ontsnapping op maximale snelheid vanuit een overloopventiel.	Overloopventielen
Vrijkomen opgeslagen poeder	Vrijkomen van een fractie van de verpakkingseenheid in inadembare vorm	Warehouses
Vrijkomen opgeslagen vloeistof	Vrijkomen gehele verpakking	Warehouses
Vrijkomen giftige rook	Emissie van onverbrande gifstoffen en vrijgekomen gifstoffen na een brand	Warehouses
Massa explosie	Massa explosie in een opslagruimte	Explosieve opslag
Brand opslagruimte	Brand in een opslagruimte	Explosieve opslag

Een grote uitdaging bij een Natech-risicobeoordeling is het maken van een koppeling tussen een typisch LOC-scenario, veroorzaakt door specifieke schade vanwege een natuurramp. Er is geen richtlijn voor zodat er momenteel wordt vertrouwd op expert opinion. Wanneer het gebruikte schademodel eenvoudig en specifiek is voor één schadebeeld, kan de verwachte schade gemakkelijk worden gelinkt aan een LOC. Specifieke modellen zijn echter schaars en niet beschikbaar voor de



meeste soorten apparatuur. Om deze reden wordt de Natech-risicobeoordeling vaak uitgevoerd met behulp van meer generieke schademodelen zoals schadebeelden en kwetsbaarheidscurven.

#### 4.6.1.1 LOC-scenario's voor schade soorten

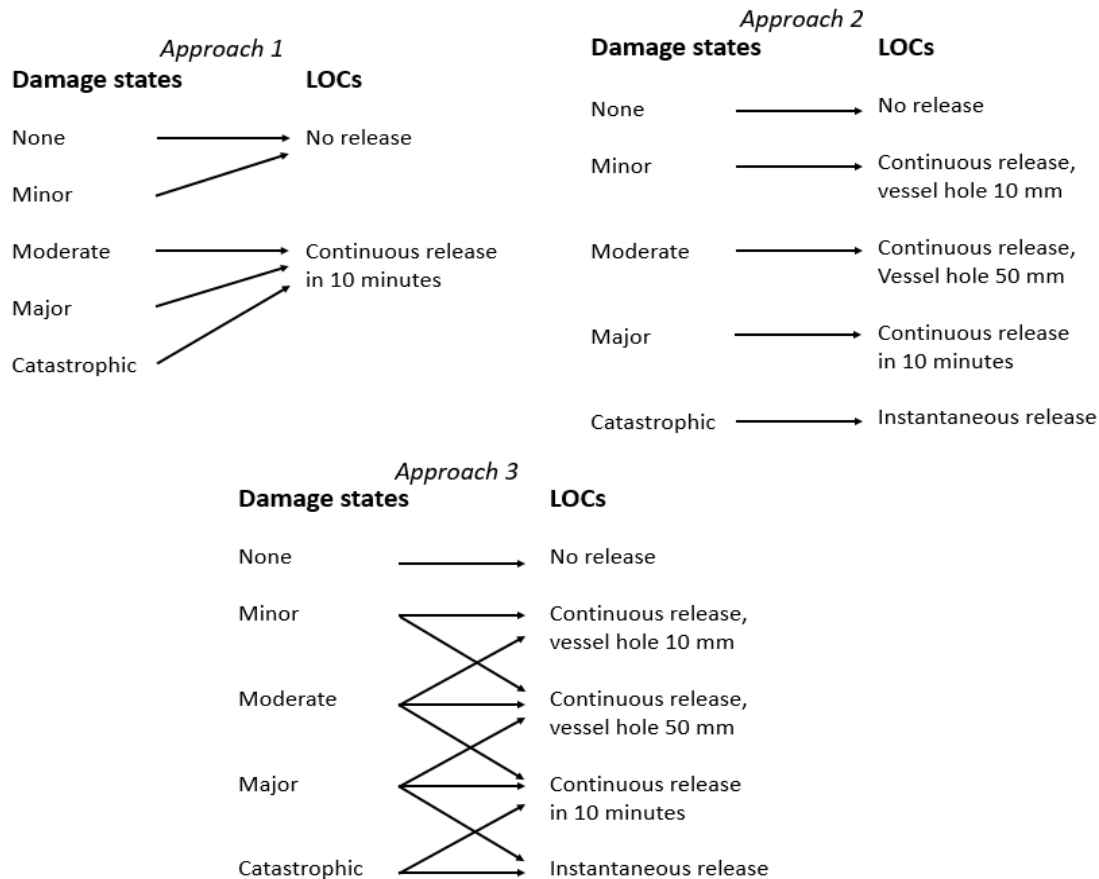
Een veelgebruikte manier voor de beoordeling van natuurrampschade aan processystemen, is door gebruik te maken van schadesoorten, zoals besproken in paragraaf 4.5.1 (FEMA, 2015). Schadesoorten geven geen specifieke beschrijving van schade, maar een generieke en kwalitatieve beschrijving van de algehele toestand van installaties na een natuurramp. Er is echter een erkende kennishiaat in dit opzicht. De statistieken over natuurlijke gevaren die worden gebruikt om het schadebeeld te onderbouwen, hebben geen betrekking op uiteindelijke LOC's, en vice versa. De taak wordt complexer wanneer het gebruikte schademodel uiteenlopende schadebeelden biedt in relatie tot hetzelfde natuurgevaar. Wanneer het enige beschikbare schattingsmodel is gebaseerd op meerdere schadebeelden, zijn er mogelijk drie manieren om met de extra complexiteit om te gaan:

1. **Koppel hetzelfde LOC-scenario aan meerdere schadebeelden.** Deze oplossing is de eenvoudigste, maar ook de minst nauwkeurige. Er worden twee categorieën van schadebeelden gecreëerd: degenen die wel en degenen die geen LOC kunnen veroorzaken. Een veel voorkomende veronderstelling is dat schadebeelden met weinig of geen schade, niet zouden resulteren in een LOC, terwijl schadebeelden met gemiddelde of grote schade dat wel zouden doen. Hetzelfde LOC-scenario wordt vervolgens gekoppeld aan alle schadebeelden die een ontsnapping kan veroorzaken, ongeacht de omvang van de schade (bijv. LOC is "Doorlopende lozing in 10 min" voor alle schadebeelden van matige ernst of groter). Deze benadering is de afgelopen jaren toegepast in wetenschappelijke onderzoeken naar de risicobeoordeling van Natech (Salzano et al., 2003, Antonioni et al., 2009).
2. **Wijs een ander LOC-scenario toe aan elke schadebeeld.** Deze aanpak is iets complexer. Elk schadebeeld heeft zijn eigen LOC-scenario (hoewel er nog steeds twee of meer schadebeelden kunnen zijn met dezelfde LOC). LOC is bijvoorbeeld "Doorlopende lozing uit een gat in het vat van 10 mm" voor kleine schade, "Continu lozing uit een gat in het vat van 50 mm" voor matige schade, "Doorlopende lozing in 10 minuten" voor grote schade en "Onmiddellijke lozing" voor catastrofale schade. Deze aanpak is geïmplementeerd in de Natech-tool voor risicoanalyse en mapping RAPID-N<sup>3</sup> (Girgin and Necci, 2018).
3. **Wijs meerdere LOC-scenario's toe aan elk schadebeeld.** Deze oplossing is de meest complexe, maar ook de meest nauwkeurige. De hypothese is dat elk schadebeeld kan resulteren in veel of zelfs alle mogelijke LOC-scenario's. De kans op grote LOC-gebeurtenissen is hoger voor ernstige schadebeelden, terwijl de kans op kleine LOC-gebeurtenissen groter is voor kleine schadebeelden. Als schadebeelden onverenigbaar zijn met LOC-scenario's (bijvoorbeeld een LOC-scenario 'lek' komt meestal niet overeen met het schadebeeld 'instorting'), moet kans 0 worden toegewezen aan die specifieke combinatie van schadebeeld en LOC. Deze benadering is tot nu toe nooit gebruikt vanwege de complexiteit. Bovendien zijn er tot op heden geen statistische gegevens beschikbaar om kansen te associëren met LOC-gebeurtenissen en schadebeelden.

---

<sup>3</sup> RAPID-N is gratis beschikbaar op <https://rapidn.jrc.ec.europa.eu>

**Figuur 11.** Voorbeelden van de 3 manieren voor het koppelen van LOC-scenario's aan schadebeelden.



## 4.6.2 Natech-gevolgen scenario modellering

Zoals vermeld in paragraaf 4.4, kunnen natuurlijke gevaren de controle- en hulpsystemen verstoren. In paragraaf 4.5.2 werd aangegeven hoe dergelijke schade een LOC kan veroorzaken. Hieronder worden de gevolgen van systeemuitval besproken, en worden aanwijzingen gegeven voor het opstellen van degelijke Natech-gevolgscenario's.

### 4.6.2.1 Natech keten van gebeurtenissen

Veiligheidsmaatregelen zijn fysieke of niet-fysieke middelen die worden geïmplementeerd om gevaarlijke situaties of ongevallen te voorkomen, beheersen of verminderen (Sklet, 2005). Veiligheidsmaatregelen kunnen falen, of hun prestaties kunnen worden verminderd vanwege natuurlijke gevaren wanneer: 1) onderdelen niet aanwezig of beschadigd zijn, en 2) nutsvoorzieningen en hulpsystemen falen waardoor aansturen van de veiligheidsmaatregelen niet mogelijk is. De Natech-risicobeoordeling gaat uit van niet-gemitigeerde scenario's.

Veiligheidsmaatregelen voorkomen dat ongevallen, zoals branden en explosies, zich uitbreiden naar nabijgelegen installaties. Wanneer een Natech-ongeval overwaait naar nabijgelegen terreinen of installaties en een of meer "secundaire" ongevallen veroorzaakt, wordt er gesproken van een domino-effect (Reniers en Cozzani, 2013). Wanneer de gevolgen van een secundair ongeval omvangrijker zijn dan die van het "primaire" ongeval, is het ongeval "geëscaleerd". Bij de Natech-risicobeoordeling moet rekening worden gehouden met geëscaleerde scenario's.

#### 4.6.2.2 *Simultane ongelukken*

Een van de belangrijkste complicaties van Natech-ongevallen is de kans op meer gelijktijdige LOC-gebeurtenissen. Hiervoor moeten alle scenariocombinaties beschouwd worden. Elke combinatie levert een ander Natech-ongeval scenario op. De complexiteit van deze aanpak neemt exponentieel toe met het aantal overwogen scenario's. Zodra alle combinaties zijn geïdentificeerd, worden de scenario's (combinaties) die het meest relevant zijn voor risicobeoordeling overwogen, terwijl de andere opties opzij worden geschoven. Het is niet eenvoudig om vast te stellen welke combinaties het meest relevant zijn. Over het algemeen zijn combinaties met een grotere kans op voorkomen, meer relevant. Een combinatie van gebeurtenissen met een kleine kans maar grote gevolgen mag niet worden afgewezen, omdat dit een HILP-gebeurtenis (high impact low-probability) kan zijn.

Een vraagstuk bij simultane scenario's is: hoe gaan we om met de impact van twee of meer verschillende factoren op hetzelfde doelwit. Zoals besproken in Antonioni et al. (2007) kun je de impact van twee of meer ongevallen beoordelen door a) de omvang van de schadelijke fysieke effecten op te tellen (bijv. thermische straling), b) de doses op te tellen waaraan een persoon worden blootgesteld (bijv. giftige dosis), of c) de kwetsbaarheid van het doelwit toevoegen (bijv. overlijdenskans) te beschouwen.

De derde optie maakt het mogelijk om gecombineerde kwetsbaarheden te beoordelen (bijv. branden en giftige verspreiding), terwijl de eerste twee de effecten van ongevallen van hetzelfde type zijn (bijv. twee branden) (Cozzani et al., 2005). De derde optie maakt het mogelijk meer soorten effecten te beschouwen:

$$V_{\text{com}} = \bigcup_{i=1}^N V_i \quad (1)$$

$V_{\text{com}}$  is de gecombineerde kwetsbaarheid van de  $N$  ongevallen;

$V_i$  is de kwetsbaarheid van elk individuele ongeval  $i$ .

Er is onderlinge afhankelijkheid mogelijk (iemand heeft meer kans op overlijden als hij de impact van één eerder ongeval heeft overleefd.

Een voorbeeld van het gebruik van de onafhankelijkheidshypothese in het geval van twee afzonderlijke ongevallen, a en b, wordt gegeven in de volgende vergelijking:

$$V_{\text{com}} = V_a + V_b - V_a \cdot V_b \quad (2)$$

#### 4.6.2.3 *Omgevingsomstandigheden*

Voor het bepalen van de gevolgen van een ongeval wordt gebruik gemaakt van standaardmodellen voor de omgevingsvariabelen. Natuurlijke gevaren kunnen de omgeving rondom industriële installaties wijzigen. Deze waarden moeten in overeenstemming zijn met de toestand van het initiërende natuurrampscenario. Bij bijvoorbeeld een overstroming is niet alleen de overstromingsdiepte en -snelheid relevant, maar ook de richting. Vrijkomende brandbare en giftige stoffen kunnen over grote afstanden worden meegevoerd, waardoor branden of vervuiling mogelijk over grote afstanden kunnen worden verspreid (zie figuur 12). Voorbeelden van de parameters die worden gebruikt in standaardmodellen voor ongeval-gevolganalyses en die kunnen wijzigen tijdens een lopende natuurramp, zijn weergegeven in tabel 5.

**Figuur 12.** Brand op wateroppervlakte die via de stormvloed verder wordt verspreid (Bron: USGS)



**Tabel 5.** Voorbeelden van het effect van natuurlijke gevaren op omgevingsvariabelen.

Variabelen	Mogelijke impact van natuurramp
Temperatuur omgeving	Sommige natuurlijke gevaren (hittegolf of vrieskou) vinden plaats bij specifieke (extreme) waarden of omgevingstemperaturen.
Windsnelheid	Voor stormen/tornado's gelden hoge waarden t.a.v. de windsnelheid.
Atmosferische stabiliteit	Bij stormen en andere atmosferische fenomenen, kiest men waarden van atmosferische stabiliteit vanuit de instabiele klassen.
Terreingrofheid	Gebouwen, installaties en bomen kunnen instorten/omvallen door natuurlijke gevaren. Dit beïnvloedt de ligging van gevaarlijke objecten en stoffen. De terreingrofheid kan veranderen door natuurlijke gevaren zoals overstromingen die obstakels landwaarts verplaatsen (bijv. silo's, zeeschepen, binnenvaartschepen).
Conditie aarde/bodem	Grond kan scheuren of vloeibaar worden tijdens aardbevingen en overstromingen met impact op de stabiliteit. Sneeuw en ijs hebben significante impact.

#### 4.6.2.4 De kwetsbaarheid van eindpunt-ontvangers

Vergeleken met andere technologische ongevallen hebben Natech-ongevallen een potentiële brede impact op "eindpunt-ontvangers" (grote groepen mensen, populaties, het milieu). Deze effecten moeten afzonderlijk worden beoordeeld voor elke natuurramp dat het industrieterrein kan raken.

Voorbeelden van effecten van natuurrampen op eindpunt-ontvangers zijn:

- Het aantal personen dat risico loopt, scheidt van dag tot dag. Evacuatie heeft hier ook grote invloed op.
- Door instorting kan de mogelijkheid tot schuilen wegvallen. Vastzittende mensen kunnen niet vluchten.
  - Het milieu kan gevoeliger zijn voor vervuiling door chemicaliën of koolwaterstoffen wanneer het al eerder is beschadigd door de natuurramp.

Om de impact van een realistische LOC op de populatie te berekenen, kunnen standaard kwetsbaarheidsmodellen worden gebruikt. Natech-specifieke modellen zijn niet nodig. Wanneer door gebrek aan gegevens een kwantitatieve analyse niet mogelijk is, kan een meer kwalitatieve categorisering worden gebruikt (bijv. klein, ernstig, zeer ernstig, groot, catastrofaal).

## 4.7 Natech waarschijnlijkheidsbeoordeling

Risicoanalyse is per definitie kansberekening. Effecten zijn verschillend. Risico is een functie van kans en gevolg. Normaal wordt dit kwantitatief beschouwd maar bij grote onzekerheid, worden kwalitatieve modellen gebruikt. De kans op een Natech-scenario is groter als natuurlijke gevaren frequenter voorkomen.

Natech-scenario's zijn complexe gebeurtenissen. Ze zijn opgebouwd uit een natuurrampscenario, een topgebeurtenis-scenario (of kritieke gebeurtenis) en een gevolgenscenario. De kans op een Natech-scenario volgt uit een kansberekening op deze drie gebeurtenissen tezamen. Daarom bestaat de kansberekening van Natech uit de volgende drie stappen:

1. Beoordeling kans op natuurramp m.b.v. statistieken of modellering.
2. Beoordeling kans op topgebeurtenis op basis van berekeningen.
3. Beoordeling van de kans op gevolgsenario's m.b.v. beslisbomen of gelijkwaardige methoden.

Onderstaande berekeningen (3) tot en met (5) beschrijven de relatie tussen de kans en op een Natech-ongeval, de kans op een kritieke gebeurtenis en de kans op een natuurrampscenario:

$$P(\text{Top}) = P(\text{Haz}) \cdot P(\text{Top}|\text{Haz}) \quad (3)$$

$$P(\text{Nat}) = P(\text{Top}) \cdot P(\text{Nat}|\text{Top}) \quad (4)$$

Of een combinatie van berekeningen (3) en (4):

$$P(\text{Nat}) = P(\text{Haz}) \cdot P(\text{Top}|\text{Haz}) \cdot P(\text{Nat}|\text{Top}) \quad (5)$$

$P(\text{Nat})$  is de kans op een specifieke Natech-ongeval scenario

$P(\text{Top})$  is de kans op een topgebeurtenis (of LOC)

$P(\text{Haz})$  is de kans op natuurgevaar

$P(\text{Top}|\text{Haz})$  is de voorwaardelijke kans op een topgebeurtenis bij een bepaald natuurgevaar

$P(\text{Nat}|\text{Top})$  is de voorwaardelijke kans op een Natech-scenario bij de gegeven kritieke gebeurtenis.

#### 4.7.1 De waarschijnlijkheid van een release/top-gebeurtenis

Er zijn twee hoofdcategorieën van topgebeurtenissen:

- Natech-ongevallen als gevolg van directe impact (schade) aan de containerconstructie tijdens natuurlijke gevaren (zie paragraaf 4.5.1);
- Natech-ongevallen als gevolg van indirecte oorzaken, bijvoorbeeld door uitval van nutsvoorzieningen als gevolg van natuurlijke gevaren (bijvoorbeeld stroomuitval) (zie paragraaf 4.5.2).

Voor de eerste categorie kan de kans op een topgebeurtenis direct worden gerelateerd aan de kans dat de apparatuur wordt beschadigd door de natuurramp. In dit geval resulteert schade meestal onmiddellijk in een LOC. Onderstaande berekeningen (6) en (7) tonen de relatie aan tussen de waarschijnlijkheid van een topgebeurtenis bij een bepaald schadescenario, dat al dan niet leidt tot een topgebeurtenis:

$$P(\text{Top}) = P(\text{Dam}) \cdot P(\text{Top}|\text{Dam}) \quad (6)$$

$$P(\text{Dam}) = P(\text{Haz}) \cdot P(\text{Dam}|\text{Haz}) \quad (7)$$

$P(\text{Top})$  is de kans op een topgebeurtenis

$P(\text{Dam})$  is de kans op schade

$P(\text{Top}|\text{Dam})$  is de voorwaardelijke kans op een topgebeurtenis bij een bepaalde schade

$P(\text{Dam}|\text{Haz})$  is de voorwaardelijke kans op schade bij een bepaald natuurgevaar

Hoewel de kans op schade doorgaans niet moeilijk in te schatten is, zijn er bijna geen gegevens over de voorwaardelijke kans op topgebeurtenissen bij bepaalde schade. Om deze reden is de meest gebruikelijke veronderstelling dat de waarschijnlijkheid voor een topgebeurtenis gelijk is aan de waarschijnlijkheid bij schade. In paragraaf 4.7.1.1 wordt nader ingegaan op de beoordeling van de schadekans.

Voor wat betreft de tweede categorie kan de kans op een kritieke gebeurtenis worden beoordeeld met behulp van bekende methoden zoals HAZOP, LOPA, Foutenboomanalyses, FMEA, FMECA, enz. De uitdaging is om de relaties zo op te bouwen dat de eerdergenoemde Natech-kenmerken (zie hoofdstuk 2) juist worden meegenomen. Het is van cruciaal belang om rekening te houden met het falen van veiligheidsbarrières en hulpsystemen, gelijktijdig falen van eenheden en systemen, en het inadequate optreden van voorkomende reactiestrategieën en -activiteiten.

##### 4.7.1.1 Schade waarschijnlijkheid

De kans op schade wordt berekend aan de hand van parameters van het natuurgevaar (waterhoogte, windsnelheid). Deze parameters moeten worden gekoppeld aan een of meer schademodi. De eenvoudigste methode voor de schadeberekening is met een "ja/nee"-logica. De faalkans wordt beoordeeld als de kans op het optreden van een natuurgevaar die de ontwerpspecificatie van de apparatuur overschrijdt.

Een typische methode voor het beoordelen van de waarschijnlijkheid voor schade bij een specifiek natuurgevaar is het gebruik van schadetoestanden en kwetsbaarheidscurven (Eidinger et al., 2001; FEMA, 2015). Er zijn verschillende curven beschikbaar voor het beoordelen van de kans op schade aan industriële apparatuur, instrumentatie en nutsvoorzieningen. Kwetsbaarheidscurven bieden doorgaans waarschijnlijkheidswaarden voor elke schadetoestand. Sommige of alle schadetoestanden kunnen leiden tot een of meer kritieke gebeurtenis(en).

De complexiteit van de analyse kan worden verminderd door slechts één referentie-LOC-scenario te overwegen (zie scenario 1 in figuur 11). In dit geval worden alle schadetoestanden die gelijk of groter zijn dan een bepaald schadeniveau (bijv. matige schade of groter) beschouwd als initiërend voor het geselecteerde LOC-scenario en worden hun waarschijnlijkheden toegevoegd. Deze methode is toegepast in eerdere onderzoeken (bijv. Antonioni et al. 2007; 2009; Salzano et al., 2003).

#### **4.7.1.2 Waarschijnlijkheid wegens directe schade**

Zoals vermeld in paragraaf 4.6.1 is het moeilijk om één type kritieke gebeurtenis toe te wijzen aan één specifiek schadetype, laat staan om er een kans aan toe te kennen. Analyse van ongevallen uit het verleden tonen aan dat niet alle schade van natuurlijke gevaren ook daadwerkelijk heeft geleid tot LOC. Tot op heden heeft geen enkele studie een statistische relatie tussen schade en LOC onderzocht; alle beschikbare gegevens zijn kwalitatief. Bepaalde soorten schade leiden onvermijdelijk tot LOC. Bijvoorbeeld, leidingbreuk (of losraken), totale ineenstorting van vaten en het losraken van de schaal-tot-bodem verbinding van opslagvaten resulteren 100% van de tijd tot lozing ( $P(\text{Top}|\text{Dam}) = 1$ ). Aan de andere kant zijn er verschillende soorten schade die op zichzelf nooit leiden tot lozing ( $P(\text{Top}|\text{Dam}) = 0$ ).

Het wordt nog complexer wanneer schadetoestanden en kwetsbaarheidscurven worden gebruikt om schade aan apparatuur - en de waarschijnlijkheid ervan - te beoordelen. Voor sommige soorten apparatuur kan zelfs een schadetoestand die als "klein" wordt beschouwd, resulteren in een lozing. Ernstiger schadeniveaus geven een grotere kans op lozing. Met deze onzekerheden wordt aanbevolen om bij twijfel een waarde van 100% te gebruiken voor de waarschijnlijkheid van een kritieke gebeurtenis.

#### **4.7.1.3 Waarschijnlijkheid wegens indirecte schade**

Ongevallen kunnen indirect worden veroorzaakt door procesverstoringen als gevolg van de impact van een natuurramp. Procesverstoringen worden ook routinematig beoordeeld als oorzaak van (niet-Natech) technologische ongevallen. Dienovereenkomstig kunnen dezelfde methoden worden gebruikt om kritieke gebeurtenissen te identificeren (bijv. checklists, wat-als-analyse, HAZOP, FMEA/FMECA).

Het is een uitdaging om de kans op schade aan systemen (en hun componenten) in te schatten, omdat gestructureerde en systematische onderzoeken naar de kwetsbaarheid van apparatuur alleen bestaan voor enkele van de meest voorkomende soorten apparatuur. In dit opzicht moeten de betrouwbaarheidswaarden van componenten die door een natuurgevaar worden geraakt, zorgvuldig worden gekozen. Veel beveiligings- en controlesystemen zijn onbetrouwbaar of niet beschikbaar tijdens natuurlijke gevaren. Systemen die falen moeten als uitgevallen worden beschouwd. Wanneer de overlevingskansen van onderdelen onzeker is, zou het de meest conservatieve benadering zijn om het systeem (of onderdeel) als uitgevallen te beschouwen.

Indien beschikbaar, moeten kwetsbaarheidscurven worden gebruikt om de kans op schade aan het geanalyseerde onderdeel of systeem in te schatten. Deze kans zou gebruikt kunnen worden om de systeembetrouwbaarheid (of beschikbaarheid) te beoordelen. Een eenvoudige manier om betrouwbaarheid te beoordelen aan de hand van schadewaarschijnlijkheid, is om de lagere betrouwbaarheidswaarde uit de referentie-bandbreedte van het betreffende onderdeel te gebruiken (opgehaald uit betrouwbaarheidsdatabases, bijv. European Safety, Reliability & Data Association (ESReDA), Offshore en Onshore Reliability Data (OREDA) en als aanvulling op de geschatte schadekans.

**Box 6. Voorbeeld: Eenvoudige betrouwbaarheidsberekening**

Aan een fakkeltank is een hypothetisch blowdown systeem bevestigd met een betrouwbaarheid van 99%. Twee potentiële natuurlijke gevaren gelden voor de site: aardbevingen en harde wind. Volgens analyse voor het aardbevingsscenario heeft de fakkeltank een schadekans van  $10^{-3}$ . Dit betekent dat het systeem minder snel zou moeten uitvallen door de aardbeving dan vanuit zichzelf. De betrouwbaarheid van het systeem, voor het aardbevingsscenario, blijft immers 99%. Volgens analyse voor het sterke-wind scenario heeft de fakkeltank een schadekans van  $10^{-1}$ , wat betekent dat het systeem eerder uitvalt door harde wind dan door andere generieke oorzaken. Voor het sterke-wind scenario moet de betrouwbaarheid van het systeem worden beschouwd als 90% in plaats van 99%.

**4.7.2 Natech-specifieke beslisbomen**

Beslisbomen kunnen worden gebruikt bij het beoordelen van waarschijnlijkheidsscenario's voor Natech-gevolgen. Deze logica-grafieken ("logic graphs") kunnen voortvloeien uit elke kritieke Natech-gebeurtenis. Ze worden meestal gebruikt wanneer meerdere scenario's het resultaat kunnen zijn van een enkele gebeurtenis (de kritieke gebeurtenis). Een gebeurtenis die de afloop van het Natech-ongeval zou kunnen beïnvloeden, is bijvoorbeeld het in werking treden van een veiligheidsbarrière. Het succesvolle optreden van een barrière leidt tot een scenario dat evenredig gemitigeerd is, terwijl niet-succesvolle prestaties resulteren in een niet-gemitigeerd scenario. Bij het ontwerpen van beslisbomen moet rekening worden gehouden met de specifieke omstandigheden van de Natech-scenario's, inclusief alle bijbehorende factoren.

De ontstekingskans voor ontvlambare stoffen kan worden beschouwd als gelijk aan 1 in het geval van blikseminslag, aangezien bliksem zelf een ontstekingsbron is. Evenzo moet voor Natech-scenario's die worden veroorzaakt door grote overstromingen, een secundaire barrière (bijvoorbeeld een dijk) - zelfs indien aanwezig - als afwezig beschouwd te worden omdat deze al beschadigd zou kunnen zijn.

Wanneer het succes van een tegenmaatregel wordt bepaald door activatie van een complex systeem, kan een foutboomanalyse worden gebruikt om de algehele betrouwbaarheid van het systeem te beoordelen. In dit geval moet er - bij het berekenen van de algehele betrouwbaarheid van het systeem - rekening worden gehouden met zowel het natuurgevaar-scenario als de kritieke gebeurtenis tijdens een Natech-gebeurtenis.

**Box 7. Voorbeelden: Impact van natuurlijke gevaren op beslisbomen  
Systemen zijn niet beschikbaar**

In een hypothetisch scenario, het waternetwerk dat het brandbestrijdingssysteem voedt is door een aardbeving beschadigd. Een beschadigd opslagvat met ontvlambare brandstof kan door een nabijgelegen vuur worden ontstoken (topgebeurtenis). Normaal gesproken kan dit worden beperkt door het brandbestrijdingssysteem. Omdat het brandbestrijdingssysteem - dat nodig is voor het optreden bij een kritieke gebeurtenis - als verloren wordt beschouwd, kan het de gevolgen van een mogelijke tweede grotere brand niet verminderen.

**De kans op "Failure-on-Demand" neemt toe vanwege gebrek aan redundantie**

In een hypothetisch scenario, een natuurramp heeft het elektriciteitsnet van een chemische installatie beschadigd. Dat heeft geleid tot een processtoring en uiteindelijk tot lozing van een ontvlambare vloeistof. Het brandbestrijdingssysteem maakt gebruik van twee redundante pompen, één aangedreven door een elektromotor en één door een dieselmotor. De brand kan worden bestreden door het brandbestrijdingssysteem. Echter, aangezien het stroomnet valt uit, kan het brandbestrijdingssysteem alleen vertrouwen op de dieselpomp. Hierdoor heeft het brandbestrijdingssysteem een grotere kans op "Failure-on-Demand"

**"Failure-on demand" wordt verhoogd vanwege een kans op schade.**

In een hypothetisch scenario, een afsluitklep is kwetsbaar voor een aardbeving maar uitval is onzeker. Voor dat onderdeel is de schadekans berekend op 10%. Onder normale omstandigheden is dat 99,9%. Vanwege de zeer concrete kans op schade herberekent de analist de betrouwbaarheid van de klep op slechts 90% (zie paragraaf 4.7.1.3).



## 4.8 Natech risico evaluatie

Informatie uit de kans- en gevolg-berekeningen uit de vorige paragrafen moet worden gecombineerd om het totale risico weer te geven. Dit wordt risico-integratie genoemd. Als een kwantitatieve risicoanalyse is uitgevoerd, resulteert dit in zaken als PR en GR. Als de analyse kwalitatief is, wordt vaak een risicomatrix gehanteerd waar kans en effect in zijn weergegeven.

Natech-risicoanalyse helpt de operators om systeemzwakten op te sporen en prioriteiten te stellen voor risicovermindering. Tegelijkertijd kan de uitkomst van de risicoanalyse worden gebruikt in relatie tot risicodoelstellingen of -criteria of wettelijke vereisten. Als er niet aan deze risico gebaseerde criteria wordt voldaan, moeten mitigerende maatregelen worden genomen. In de Europese Unie zijn dergelijke risicocriteria niet uniform en kunnen ze op risico gebaseerd zijn (bijv. aanvaardbare niveaus van individueel risico) of op de gevolgen gebaseerd (bijv. toelaatbare niveaus van overdruk, warmtestraling of toxische concentratie). Voor Natech-risicobeoordeling kan dezelfde aanpak worden toegepast die doorgaans worden gebruikt voor scenario's voor chemische ongevallen en zijn er geen Natech-specifieke uitbreidingen nodig.

## 5 Maatregelen om Natech-risico te verminderen

Gevaarlijke bedrijfsterreinen met een relevant Natech-risico dienen zowel technische als operationele maatregelen te nemen om Natech-ongevallen - die zij in hun risicoanalyse hebben vastgesteld - te voorkomen en/of te beperken. Prioriteit moet worden gegeven aan het voorkomen en mitigeren van de Natech-ongevallen die hoog scoren in de evaluatie. In dit gedeelte worden de middelen en procedures besproken die operators nodig hebben om het Natech-risico op gevaarlijke locaties te beheren.

### 5.1 Mitigerende maatregelen tegen impact van natuurgevaar

Een van de belangrijkste strategieën om Natech-risico te beperken, is het beschermen van de locaties of hun kritieke installaties tegen de impact van alle relevante natuurlijke gevaren. Dit wordt bereikt door de ernst van het te verwachten natuurgevaar te verminderen door fysieke of procedurele, preventiemaatregelen te nemen.

#### 5.1.1 Fysieke maatregelen

Voorbeelden van mogelijke strategieën om de gevolgen van natuurlijk gevaar te beperken, zijn:

- Aanleggen van dijken ter bescherming tegen overstromingen;
- Aanleggen van kanalen om water af te voeren;
- Bouwen van zeeweringen ter bescherming tegen toverstroming, stormvloed of tsunami;
- Versterken van oevers om erosie en overloop uit rivieren te voorkomen;
- Grondverdichting / versterking tegen grondverschuiving bij aardbevingen;
- Herschikken van de fabrieksinrichting zodat kritieke apparatuur wordt verplaatst naar gebieden waar deze minder worden blootgesteld aan natuurlijke gevaren;
- Bouwen van verhoogde droge gebieden waar veiligheidskritieke systemen kunnen worden geplaatst (bijv. controlekamers, pompkamers en noodstroomgeneratoren);
- Installeren van bliksemafleiders ter beveiliging van elektriciteitsnet en installaties;
- Selecteren van een terreinlocatie buiten natuurrampzones of waar het natuurgevaar het minst erg is (bijv. buiten uiterwaarden, op een afstand van bekende breuklijnen voor aardbevingen).

Sommige maatregelen kunnen worden ondernomen tijdens het operationele leven van een industrieterrein, terwijl andere beperkt zijn tot de ontwerpfase. Over het algemeen is het veiliger en goedkoper om natuurlijke gevaren te vermijden dan om de impact te beperken.

#### 5.1.2 Procedurele maatregelen

Exploitanten dienen specifieke procedures vast te stellen voor vroegtijdig waarschuwen van relevante autoriteiten en de taken van de noodorganisatie.

Procedures om met natuurgevaren om te gaan, moeten het volgende omvatten:

- **De rollen en verantwoordelijkheden van het personeel binnen het terrein;**
- **De uit te voeren acties die zijn gekoppeld aan elke rol;**
- **De hoeveelheid tijd die elke actie in beslag neemt;**
- **De exacte voorwaarden om een procedure op te starten.**

Het personeel moet zich bewust zijn van de natuurlijke gevaren van de locatie. Ze moeten ook worden getraind in de procedures in geval van natuurgevaren. Procedures moeten zowel gericht zijn op het vergroten van de overlevingskansen van het personeel.

### 5.1.2.1 Voor de gebeurtenis

Wanneer een natuurramp wordt voorspeld, kunnen maatregelen worden ondernomen om de locatie voor te bereiden op een mogelijke impact. Een orkaan kan enkele dagen voor zijn aanlanding worden voorspeld terwijl dat voor andere natuurrampen slechts uren kan zijn. Aardbevingen zijn over het algemeen niet van tevoren te voorzien. Desalniettemin, als het epicentrum voldoende ver verwijderd is van het industrieterrein, hebben operators mogelijk een zeer korte waarschuwingstijd (meestal seconden, soms meer dan een minuut) om te reageren voordat de locatie wordt getroffen door schokgolven. Procedures kunnen effectief zijn in het voorkomen of beperken van Natech-ongevallen als er tijdig actie wordt ondernomen.

Voor elke natuurramp moeten de omstandigheden waaronder noodprocedures worden geïnitieerd duidelijk worden geïdentificeerd (bijvoorbeeld op het moment dat een nabijgelegen rivier boven een kritieke drempel opzwellt, wanneer een orkaanwaarschuwing wordt gegeven). Opgemerkt moet worden dat verschillende acties onder verschillende omstandigheden kunnen worden geactiveerd. De volgende lijst toont enkele van de meest terugkerende en effectieve maatregelen die kunnen worden genomen ter voorbereiding op natuurlijke gevaren:

**Noodstop:** De operator evalueert de noodzaak om de installaties stil te leggen. Als de processen stilstaan tijdens de natuurramp, zullen Natech-ongelukken minder snel plaatsvinden.

**Ride-out ploeg:** Verwijderen van al het overbodige personeel beperkt het potentiële verlies van mensenlevens als gevolg van Natech-gebeurtenis. De operator moet een bemanning aanwijzen van een minimale aantal personeelsleden dat nodig is om de locatie te beveiligen en noodprocedures uit te voeren. Aangezien sommige natuurlijke gevaren dagen kunnen duren, moeten operators de werklust in ploegdiensten organiseren.

**Drijvende objecten vastzetten:** Ongevallen kunnen worden veroorzaakt door objecten die op hoogwater drijven en vervolgens kritieke installaties raken. Dit kan worden voorkomen door drijvende voorwerpen met bijv. riemen vast te binden of te verwijderen.

**Apparatuur veiligstellen:** Lichte apparatuur is kwetsbaar voor opwaartse drijfkrachten als gevolg van overstromingen. Sommige apparatuur kan worden vastgezet met bouten die aan de grond zijn verankerd. Lege tanks kunnen met water worden gevuld om weerstand te vergroten.

**Aanbrengen van tijdelijke bescherming:** Sommige installaties kunnen worden beschermd tegen de impact van natuurlijke gevaren door tijdelijke beschermingsmaatregelen.

**Communicatie met autoriteiten:** Autoriteiten die gaan over de externe noodplannen moeten worden gewaarschuwd wanneer de exploitant vermoedt dat Natech-ongevallen kunnen plaatsvinden.

**Training:** Zorg ervoor dat werknemers zich bewust zijn van lokale natuurgevaren en dat ze goed zijn opgeleid voor hun taak.

**Monitoring van natuurlijke gevaren:** De exploitant volgt het ontstaan en de ontwikkeling van natuurlijke gevaren in zijn gebied. Die van atmosferische oorsprong, zoals stormen, sneeuw en extreme temperaturen, kunnen gemakkelijk worden gevolgd via weerdiensten en na een vroege waarschuwing van de overheid. Evenzo moeten autoriteiten die al toezicht houden op natuurlijke gevaren via gespecialiseerde instanties proactief zijn in het tijdig waarschuwen van industrieterreinen die de potentie hebben voor zware ongevallen, zodat exploitanten effectieve preventieve maatregelen kunnen nemen en zich daarmee kunnen voorbereiden.

### 5.1.2.2 Na de gebeurtenis

Zelfs als een natuurramp niet onmiddellijk tot een Natech-ongeval heeft geleid, moeten industriële installaties extra voorzichtig zijn in de nasleep van deze gebeurtenis en bij het hervatten van normale activiteiten. Natuurlijke gevaren kunnen leiden tot beschadigde apparatuur, verontreiniging en storingen. Bovendien is het personeel onder dergelijke omstandigheden meestal meer gestrest en daardoor afgeleid. Het opstarten van grote industriële processen is een gevaarlijke fase op zich, zeker na de impact van een natuurramp. Het is daarom uitermate belangrijk dat heropstartprocedures rekening houden met mogelijke eerdere schade door natuurlijke gevaren, zoals (USCSB, 2005; CCPS, 2019):

- Inspecteren van beschadigde apparatuur en instrumentatie om verborgen gebreken op te sporen voor het opstarten;
- Het beveiligen van alle units en het herstarten van alle uitgeschakelde veiligheidssystemen;
- Het voltooiën van de vereiste reparatie-, onderhouds- en opruimwerkzaamheden, inclusief het verwijderen van puin;
- Wacht met opstarten totdat essentieel personeel is hersteld. Sommigen hebben schade, verwondingen of verliezen geleden (bijvoorbeeld ze moeten zorgen voor hun woningen en familieleden). Sommigen moeten worden vervangen (dus training van nieuw personeel);
- Ervoor zorgen dat de site over alle benodigde voorraden beschikt, aangezien er na een ramp een schaarste aan bouwmaterialen kan zijn;
- Herbouwen is soms nodig voor locaties of installaties die grote schade hebben opgelopen.

## 5.2 Apparatuur-ontwerp en modificaties (retrofitting)

Risico kan worden verminderd door de weerstand van installaties tegen natuurgevaar te verhogen. Kritieke proces- en opslageenheden moeten zo zijn ontworpen dat ze bestand zijn tegen natuurrampen. Bestaande apparatuur die beschadigd kan worden, kan door middel van systeemverbeteringen worden aangepast (bijv. installatie van flexibele pijp-tank-pompverbindingen, verankering van de uitrusting, verhoogde steunpalen, waterdichte bescherming voor elektrische apparatuur). Afbeelding 13 en Afbeelding 14 tonen voorbeelden van geïmplementeerde aanpassingsstrategieën.

Wanneer het Natech-risico, na analyse, als onaanvaardbaar wordt beoordeeld, zouden de ontwerp-criteria moeten worden gewijzigd. Dit kan door de manier waarop ontwerpers "grenswaarden" kiezen voor bepaalde schadetoestanden te wijzigen (zie paragraaf 4.3) met inachtneming van de resultaten van een voorafgaande Natech-risicobeoordeling. Door hogere grenswaarden in te stellen, kan de unit natuurlijke gevaren van een hogere intensiteit dan voorheen overleven, en komen storingen minder vaak voor. Grenswaarden kunnen bijvoorbeeld worden bepaald met behulp van een risico-gebaseerde methode die rekening houdt met de resultaten van de Natech-risicobeoordeling, en die ervoor zorgt dat het risico op Natech-ongevallen onder een bepaald doelniveau blijft.

**Figuur 13.** Additionele riemen om de steunpilaren van een bolvormige opslagtank te versterken tegen aardbevingen (Foto: E. Krausmann)



**Figuur 14.** Installatie van een flexibele stalen buis, aangesloten op een groot olietank, die een beweging van zowel tank als leiding opvangt (Foto: A.M. Cruz)



### 5.3 Veiligheidsbarrières en hulpsystemen

Veiligheidsbarrières en hulpsystemen zijn essentieel zijn voor Natech-ongevallenpreventie of -beperking. Dergelijke systemen moeten zo zijn ontworpen dat ze bestand zijn tegen natuurlijke gevaren die Natech-ongevallen initiëren. Het is belangrijk dat kritieke systemen worden geïdentificeerd en beoordeeld. Prioriteit moet worden gegeven aan de systemen die betrokken zijn bij die ongevallenscenario's die de grootste bijdrage leveren aan het Natech-risico. De betrouwbaarheid van veiligheidsbarrières en hulpsystemen kan op verschillende manieren worden verbeterd, zoals:

**Systeemontwerp:** Systemen kunnen zo worden ontworpen dat ze bestand zijn tegen natuurlijke gevaren. De doelstelling moet zijn dat het systeem als geheel blijft functioneren bij een natuurramp. Een brandbestrijdingssysteem in een seismisch gebied moet bijvoorbeeld zo zijn ontworpen dat het ook tijdens een sterke aardbeving betrouwbaar blijft.

**Systeemverbetering:** Wanneer ze niet specifiek zijn ontworpen voor een natuurramp, kunnen systemen worden aangepast om ze beter te laten presteren tijdens een natuurramp.

**Redundantie:** Systemen kunnen betrouwbaarder worden gemaakt via redundantie. Om Natech-ongevallen effectief te voorkomen, mogen redundante systemen niet uitvallen onder gelijke omstandigheden als de hoofdsystemen. Dit is niet altijd eenvoudig voor locaties met meerdere soorten gevaren. In een systeem met twee redundante pompen kan de ene bijvoorbeeld op een verhoogde steun worden gemonteerd, weg van het overstromingsgevaar, terwijl de andere op grondniveau kan worden gebouwd met een stevige fundering die beter geschikt is in geval van aardbevingen.

**Mitigeren van impact door natuurgevaar:** Hulpsystemen en veiligheidsbarrières kunnen worden beschermd tegen de gevolgen van natuurlijke gevaren op een vergelijkbare manier als besproken voor de belangrijkste apparatuur (paragraaf 5.1).

### 5.4 Noodplanning en reactie op Natech-ongelukken

Noodplannen kunnen inspelen op Natech-ongevallen. Het matchen van die twee is belangrijk om effectief te kunnen reageren. Het vereist een gerichte noodplanning. In het bijzonder moeten exploitanten ervoor zorgen dat de geïmplementeerde maatregelen ter voorkoming en beperking van ongevallen effectief zijn bij natuurgevaren. Wanneer dit niet mogelijk is, moeten maatregelen die in een noodsituatie niet effectief zijn, als niet-beschikbaar worden beschouwd en mogen de noodplannen niet op dergelijke maatregelen steunen.

Aangezien vele natuurlijke gevaren het potentieel hebben om nutsvoorzieningen, zoals het elektriciteitsnet of het plaatselijke aquaduct, uit te schakelen, moeten lokale standalone nutsvoorzieningen beschikbaar blijven na impact (bijv. stroomgeneratoren, lokale waternetwerken en reservoirs). Om deze reden moeten gevaarlijke locaties in gevarenzones beschikken over back-up voorzieningen en voldoende noodhulpmiddelen om de operatie draaiende te houden totdat off-site services weer beschikbaar komen, of totdat alle installaties veilig zijn uitgeschakeld. Noodplannen moeten duidelijk aangeven welke nutsvoorzieningen gegarandeerd beschikbaar blijven. Als daar niet op kan worden gerekend, mag het noodplan er niet op vertrouwen. Dienovereenkomstig moeten noodplannen reactiestrategieën bevatten die kunnen worden toegepast wanneer zowel de hoofd- als de back-up voorzieningen niet beschikbaar zijn.

Fabriekspersoneel en hulpverleners moeten worden beschermd tegen de gevolgen van zowel natuurlijke gevaren als Natech-ongevallen, met behulp van specifieke persoonlijke beschermingsmiddelen (PBM). Bovendien zouden exploitanten moeten overwegen om specifieke

nooduitrusting aan te schaffen om beter te kunnen reageren op zware ongevallen (zowel Natech als niet Natech) tijdens uitzonderlijke omstandigheden (bijvoorbeeld stormen, aardbevingen, overstromingen). Het type uitrusting moet zorgvuldig worden gekozen om de doeltreffendheid en veiligheid van de hulpverleners te garanderen.

Wanneer een natuurramp met de kracht om communicatielijnen naar de hulpdiensten te doen uitvallen, wordt geïdentificeerd, moet de exploitant beschikken over alternatieve communicatiemiddelen. Zo zouden operators bijvoorbeeld draagbare radio's met voldoende opgeladen accu's kunnen gebruiken die direct via een gereserveerd radiokanaal openstaan om de autoriteiten onder alle omstandigheden te kunnen bereiken.

Fabriekspersoneel kan zelf slachtoffer worden van de gevolgen van natuurlijke gevaren. Bovendien kan de noodsituatie uren of dagen duren. Dat op zichzelf kan een extra belasting vormen voor personeel dat daardoor uitgeput raakt als er wordt gevraagd om doorlopende ploegendiensten achter elkaar te werken. Training moet daarom gericht zijn op het effectief voorbereiden van personeel om te reageren op natuurlijke gevaren, hun overlevingskansen te maximaliseren en hen in staat te stellen deel te nemen aan de responsactiviteiten. In noodplannen moet echter ook rekening worden gehouden met de niet-beschikbaarheid van personeel ter plaatse (bijvoorbeeld door het natuurgevaar, paniek en vluchtgedrag) en moet adequate vervanging worden voorzien voor de mankracht die verloren is gegaan (Krausmann en Salzano, 2017).

## **5.5 Leren van voorgekomen Natech-ongevallen**

Ongevallenanalyse is een essentieel instrument waarin informatie over de oorzaken, dynamiek en gevolgen van ongevallen in het verleden, inclusief alle omstandigheden die het ontstaan ervan mogelijk hebben gemaakt, wordt gebruikt om dergelijke ongevallen in de toekomst te voorkomen of beperken. Een van de redenen voor terugkerende ongevallen, is dat er geen lessen zijn getrokken uit het verleden (Krausmann en Necci, 2021).

Ongevallenanalyses bieden inzicht in de meest voorkomende schade aan apparatuur en hun wijze van uitval na natuurrampen. Zo hebben diepgaande studies van een verzameling van beschikbare gegevens over Natech-ongevallen, aangetoond dat atmosferische opslagvaten (en vooral die met drijvende daken) bijzonder kwetsbaar zijn voor aardbevingen, overstromingen en blikseminslag. Individuele casuïstiek wijst ook op een hoge gevoeligheid voor schade door hevige regen en harde wind. Dergelijke studies suggereren ook dat tijdens Natech-ongevallen de ontstekingskans groter is dan bij ongevallen veroorzaakt door menselijke of technische fouten (Krausmann et al., 2017). Evenzo maakt ongevallenanalyse het mogelijk om factoren te identificeren die in de eerste plaats tot het ongeval hebben geleid of hebben geleid tot de verergering van de gevolgen (bijv. Necci et al., 2018b).

Lessen trekken vereist een systematische verzameling en analyse van data over ongevallen uit het verleden, met ook bijna-ongevallen daarbij inbegrepen. Exploitanten moeten gedetailleerde informatie verzamelen over eerdere Natech-incidenten in hun fabriek(en), deze opslaan in een interactieve database die kan worden geraadpleegd, en de datasets zorgvuldig analyseren om hen te helpen bijgewerkte scenario's voor te bereiden en passende risico-beperkende maatregelen te ontwerpen. Analyse van een enkel ongeval levert onmiddellijke lessen op voor één specifieke gebeurtenis; het kan echter een causale patroon van ongevallen over het hoofd zien dat niet gemakkelijk te herkennen is binnen een enkel ongeval. Analyse van een reeks ongevallen uit een bredere datapool levert breder toepasbare lessen op (Krausmann et al., 2017). Dit kan bijvoorbeeld helpen bij het identificeren van systemisch falen binnen de organisatie, of oorzaken die verband houden met bepaalde soorten stoffen of industriële activiteiten.

Algemene gegevens over ongevallen kunnen ook worden opgehaald uit industriële ongevalldatabases, maar de kwaliteit van de Natech-ongevallengegevens is niet uniform en het ontbreekt vaak aan de nodige details (bijvoorbeeld informatie over natuurlijke gevaren - overstromingsniveaus, windsnelheid, aardbevingsintensiteit op de locatie van de gevaarlijke installatie of locatie). Dit maakt het moeilijk om de dynamiek van een Natech-evenement te reconstrueren. Om Natech-gegevensverzameling en -analyse te ondersteunen, heeft het Joint Research Center een speciale Natech-incidentendatabase (eNATECH<sup>4</sup>) ontwikkeld. Deze biedt geavanceerde data over Natech-ongevallen om de kenmerken van Natech-gebeurtenissen beter vast te leggen (bijv. meerdere ongeval reeksen die parallel of opeenvolgend plaatsvinden).

---

<sup>4</sup> eNATECH is gratis beschikbaar op <https://enatech.jrc.ec.europa.eu>



## Referenties

- Antonioni, G., Spadoni, G., Cozzani, V. (2007) A methodology for the quantitative risk assessment of major accidents triggered by seismic events *Journal of Hazardous Materials*, 147, pp. 48-59.
- Antonioni, G., Bonvicini, S., Spadoni, G., Cozzani, V. (2009) Development of a frame work for the risk assessment of Na-Tech accidental events *Reliability Engineering & System Safety*, 94, pp. 1442-1450.
- BARPI (2013) Overview of the industrial accidents caused by the great Tohoku Earthquake and tsunami, Bureau for analysis of industrial risks and pollution, Ministry of Ecology, Sustainable Development and Energy, France. ([https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/wp-content/files\\_mf/Overview\\_japan\\_mars\\_2013\\_GB.pdf](https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/wp-content/files_mf/Overview_japan_mars_2013_GB.pdf))
- CCPS (2000) Guidelines for chemical process quantitative risk analysis, 2<sup>nd</sup> ed., Center for Chemical Process Safety, American Institute of Chemical Engineers, New York.
- CCPS (2019) CCPS Monograph: Assessment of and planning for natural hazards, Center for Chemical Process Safety, American Institute of Chemical Engineers, New York.
- Chang, J.I., Lin, C.-C. (2006) A study of storage tank accidents, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 19, pp. 51–59.
- Cooper, T.W. (1997) A study of the performance of petroleum storage tanks during earthquakes, 1933-1995, NIST GCR 97-720, NIST, US National Institute of Standards and Technology.
- Cox, T. (1998) Risk integration and decision-making, In: Kirchsteiger, C., Christou, M.D., Papadakis, G.A. (eds.) *Risk assessment and management in the context of the Seveso II Directive*, Elsevier, Amsterdam.
- Cozzani, V., Gubinelli, G., Antonioni, G., Spadoni, G., Zanelli, S. (2005) The assessment of risk caused by domino effect in quantitative area risk analysis, *Journal of Hazardous Materials*, 127(1-3), pp. 14-30.
- DSB (2022) Veiledning om vurdering av naturfarer som kan gi risiko for kjemikalieulykker (Natech), Norwegian Directorate for Civil Protection, *in preparation* (in Norwegian).
- Eidinger, J. M., Avila, E. A., Ballantyne, D., Cheng, L., der Kiureghian, A., Maison, B. F., O'Rourke, T. D., Power, M. (2001) Seismic fragility formulation for water systems, American Lifelines Alliance (ALA), USA.
- FEMA (2015) Multi-hazard Loss Estimation Methodology: Earthquake Model, Hazus®-MH 2.1: Technical Manual, Federal Emergency Management Agency, US Department of Homeland Security, USA.
- Fernandes, R., Necci, A., Krausmann, E. (2022) Model(s) for the dispersion of hazardous materials in floodwaters for RAPID-N, EUR 30968 EN, European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-76-46707-6, doi:10.2760/849778, JRC127375.
- Girgin, S. (2011) The natech events during the 17 August 1999 Kocaeli earthquake: aftermath and lessons learned, *Natural Hazards & Earth System Sciences*, 11(4), pp. 1129-1140.  
<https://doi.org/10.5194/nhess-11-1129-2011>.
- Girgin, S., Necci, A. (2018) Introduction to RAPID-N for Natech Risk Analysis and Mapping: A Beginner's Guide, EUR 29511 EN, European Commission, ISBN 978-92-79-98277-4, doi:10.2760/78743, JRC114363.
- Godoy, L.A. (2007) Performance of Storage Tanks in Oil Facilities Damaged by Hurricanes Katrina and Rita. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Vol. 21, No. 6, pp. 441-449.
- INERIS (2014) Référentiel méthodologique concernant la maîtrise du risque inondation dans les installations classées, INERIS-DRA-14-141515-03596A, National Institute for Industrial Environment and Risks, France (in French).
- Krausmann, E., Necci, A. (2021) Thinking the unthinkable: A perspective on Natech risks and Black Swans, *Safety Science*, 139, 105255.
- Krausmann, E. (2017) Natech risk and its management, In: Krausmann, E., Cruz, A.M., Salzano, E. (Eds.) *Natech risk assessment and management*, Elsevier, Amsterdam, pp. 105-118.
- Krausmann, E., Cruz, A.M., Salzano, E. (2017) Natech risk assessment and management – Reducing the risk of natural hazard impact on hazardous installations, Elsevier, Amsterdam.
- Krausmann, E., Salzano, E. (2017). Lessons Learned From Natech events, In: Krausmann, E., Cruz, A.M., Salzano, E. (Eds.) *Natech risk assessment and management*, Elsevier, Amsterdam, pp. 33-52.

Krausmann, E., Baranzini, D. (2012) Natech risk reduction in the European Union, *Journal of Risk Research*, 15(8), pp. 1027-1047, DOI: 10.1080/13669877.2012.666761.

Landucci, G., Antonioni, G., Tugnoli, A., Cozzani, V. (2012) Release of hazardous materials in flood events: Damage model for atmospheric storage tanks, *Reliability Engineering & System Safety* 106, pp. 200-216.

Mannan, S. (2005) *Lees' Loss Prevention in the Process Industries*, Third edition, Elsevier, UK.

Misuri, A., Landucci, G., Cozzani, V. (2021) Assessment of safety barrier performance in the mitigation of domino scenarios caused by Natech events, *Reliability Engineering & System Safety*, 205, 107278.

Misuri, A., Cozzani, V. (2021) A paradigm shift in the assessment of Natech scenarios in chemical and process facilities. *Process Safety and Environmental Protection*, 152, pp. 338-351.

Necci, A., Girgin, S., Krausmann, E. (2018a) Understanding Natech Risk Due to Storms – Lessons learned and recommendations, EUR 29507 EN, European Union.

Necci, A., Krausmann, E., Girgin, S. (2018b) Emergency planning and response for Natech accidents, In: *Towards an all-hazards approach to emergency preparedness and response: Lessons learnt from non-nuclear events*, NEA, OECD Publishing, Paris.

OECD (2015) Addendum No. 2 to the OECD Guiding Principles for Chemical Accident Prevention, Preparedness and Response (2<sup>nd</sup> ed.) to address natural hazards triggering technological accidents (Natechs), ENV/JM/MONO(2015)1, Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris.

Rendiers G., Cozzani, V. (2013) *Domino Effects in the Process Industries - Modelling, Prevention and Managing*, Elsevier, UK.

Salzano, E., Iervolino, I., Fabbrocino, G. (2003) Seismic risk of atmospheric storage tanks in the framework of quantitative risk analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 16, pp. 403-409.

Sklet S. (2005) *Safety Barriers on Oil and Gas Platforms - Means to Prevent Hydrocarbon Releases*, Doctoral Thesis, NTNU.

Steinberg, L.J., Sengul, H., Cruz, A.M. (2008) Natech risk and management: an assessment of the state of the art, *Natural Hazards* 46 (2), pp. 143-152.

TNO (1992) *Methods for the determination of possible damage to people and objects resulting from releases of hazardous materials (Green Book)*, CPR 16E, Committee for the Prevention of Disasters, The Netherlands.

TRAS 310 (2022) *Technische Regel für Anlagensicherheit: Niederschläge und Hochwasser (Technical Rule for Process Safety: Precipitation and Floods) (under revision)*, Commission on Process Safety (KAS), Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Nuclear Safety and Consumer Protection, Germany (in German). <https://www.kas-bmu.de/tras-endqueltige-version.html>

TRAS 320 (2022) *Technische Regel für Anlagensicherheit: Wind, Schnee- und Eislasten (Technical Rule for Process Safety: Wind, Snow- and Iceload)*, in print, Commission on Process Safety (KAS), Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety, Germany (in German). <https://www.kas-bmu.de/tras-endqueltige-version.html>

Uijt de Haag, P.A.M., Ale, B.J.M. (2005) *Guidelines for quantitative risk assessment (Purple book)*, CPR 18E, VROM, The Netherlands.

UNI (2021) *Linee guida per la gestione di eventi NaTech nell'ambito degli stabilimenti con pericolo di incidente rilevante - Parte 1: Requisiti generali e sisma*, UNI/TS 11816-1:2021, Ente Italiano di Normazione (in Italian).

USCSB (2005) *After Katrina: Precautions Needed During Oil and Chemical Facility Startup*, Safety Bulletin No. 2005-01-S, U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board.  
<https://www.csb.gov/after-katrina-special-precautions-needed-during-oil-and-chemical-facility-startup/>

van den Bosch, C.J.H., Weterings, R.A.P.M. (eds.) (2005) *Methods for the calculation of physical effects – Due to releases of hazardous materials (liquids and gases) (Yellow book)*, CPR 14E, 2<sup>nd</sup> ed., VROM, The Netherlands.

## Lijst van afkortingen en definities

Apparatuur	Machines, componenten en systemen die nodig zijn voor een industrieel proces. Voorbeelden van procesapparatuur die in de procesindustrie wordt gebruikt, zijn pompen, kleppen, vaten, filters, koelers, warmtewisselaars, kolommen en leidingen.
Betrouwbaarheid	Het vermogen van een item om onder bepaalde omstandigheden gedurende een bepaalde periode een vereiste functie uit te voeren.
Domino-effect	Het proces van verspreiding van een industrieel ongeval van de ene locatie (of installatie) naar de andere, wat resulteert in een escalatie van de gevolgen van het ongeval.
Exploitant	Iedere natuurlijke of rechtspersoon die een inrichting of installatie exploiteert of controleert of, indien de nationale wetgeving daarin voorziet, aan wie de beslissende economische of beslissingsbevoegdheid over het technisch functioneren van de vestiging of installatie is gedelegeerd.
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis. Het proces waarbij zoveel mogelijk componenten, assemblages en subsystemen worden beoordeeld om potentiële faalwijzen in een systeem en hun oorzaken en gevolgen te identificeren. FMEA is vaak de eerste stap van een systeembetrouwbaarheidsonderzoek.
FMECA	Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis. Een analysemethode die kwantitatieve faalanalyse omvat. FMECA is een uitbreiding van FMEA die een criticiteitsanalyse omvat om de faalkans in kaart te brengen ten opzichte van de ernst van de gevolgen ervan.
Foutenboomanalyse	Een top-down faalanalysemethode waarbij een ongewenste toestand van een systeem wordt geanalyseerd met behulp van een grafische weergave van de combinatie van fouten en Booleaanse logica. Deze analysemethode heeft tot doel te begrijpen hoe systemen kunnen falen door de grondoorzaken van het falen te reverse-engineeren.
Gevaar	Omstandigheid of gebeurtenis die zou kunnen leiden tot of bijdragen aan een ongeplande of ongewenste gebeurtenis. De intrinsieke eigenschap van een gevaarlijke materiële of fysieke situatie, met een potentieel voor het veroorzaken van schade aan de menselijke gezondheid of het milieu.
Gevarenkaart	Een kaart waarop gebieden worden gemarkeerd die worden getroffen door of kwetsbaar zijn voor een bepaald gevaar. Het wordt doorgaans gemaakt voor natuurlijke gevaren, zoals aardbevingen, vulkanen, aardverschuivingen, overstromingen en tsunami's.
Gevaarlijke stof	Gevaarlijke stof dat een bedreiging vormt voor de menselijke gezondheid en het milieu. Gevaarlijke stoffen zijn giftig, bijtend, ontvlambaar, explosief of chemisch reactief. Deze term komt overeen met de <i>gevaarlijke stof</i> die wordt gebruikt in het kader van de Seveso-richtlijn.
Gebeurtenissenboom analyse	Een modelleringstechniek die mogelijke uitkomsten identificeert, en indien nodig hun waarschijnlijkheden, na een initiërende gebeurtenis. Het wordt gebruikt om de reeks gebeurtenissen te identificeren die tot specifieke

gevolgen leiden, ervan uitgaande dat elke gebeurtenis in de reeks een succes of een mislukking is.

HAZOP	Hazard and Operability study. Een kwalitatieve techniek voor procesgeveerenanalyse die bestaat uit een gestructureerd en systematisch onderzoek van een industrieel proces met als doel gevaren te identificeren en problemen te evalueren die risico's kunnen vertegenwoordigen. Het complexe proces is verdeeld in een aantal eenvoudiger secties, 'knooppunten', die vervolgens individueel worden beoordeeld met behulp van gestandaardiseerde richtlijnen.
Inrichting	De gehele locatie van een exploitant met milieubelastende activiteiten waar gevaarlijke stoffen aanwezig zijn in een of meer installaties, inclusief gemeenschappelijke of gerelateerde infrastructuren of activiteiten. Het betreft lage- en hogedrempelinrichtingen in de context van de Seveso-richtlijn. Voor het doel van deze leidraad gebruiken we de term ( <i>industriële</i> ) <i>terrein</i> of ( <i>industriële</i> ) <i>bedrijf</i> .
Installatie	Een technische eenheid binnen een inrichting, zowel op als onder het maaiveld, waarin gevaarlijke stoffen worden geproduceerd, gebruikt, gehanteerd of opgeslagen; hieronder wordt begrepen alle apparatuur, constructies, leidingwerk, machines, gereedschappen, particuliere spoorwegemplacements, dokken, loskades die de installatie bedienen, steigers, pakhuizen of soortgelijke constructies, al dan niet drijvend, die nodig zijn voor de exploitatie van die installatie. Deze term wordt gebruikt in de context van de Seveso-richtlijn.
LOC	Loss of Containment. Het vrijkomen van gevaarlijke stof.
LUP	' <i>Land Use Planning</i> ' is landgebruiksplanning in matig Nederlands.
Kritische gebeurtenis	Zie <i>Topgebeurtenis</i>
Natech	' <i>Natural hazard triggered technological accident</i> ', in het Nederlands te vertalen als een technologisch ongeval veroorzaakt door natuurlijk gevaar.
Natuurlijk gevaar	Een natuurlijk proces of fenomeen, met inbegrip van alle geologische, hydrologische, klimatologische en meteorologische verschijnselen die, vanwege hun locatie, ernst en frequentie, een negatieve impact kunnen hebben op de menselijke gezondheid, de natuurlijke en gebouwde omgeving en de economie.
PBZO	Beleid ter preventie van zware ongevallen. Beschrijft de algemene aanpak en maatregelen van de exploitant, inclusief passende veiligheidsbeheersystemen, voor het beheersen van de gevaren van zware ongevallen. Deze term wordt gebruikt in de context van de Seveso-richtlijn.
Proceseenheid	Een eenheid die bewerkingen uitvoert die een fysieke verandering of chemische transformatie met zich meebrengen, zoals scheiding, kristallisatie, verdamping, filtratie, reactie, enz. Dergelijke bewerkingen zijn verbonden om het algehele proces te creëren.
Risico	De waarschijnlijkheid dat een bepaald effect zich binnen een bepaalde periode of onder bepaalde omstandigheden voordoet.
Schadeafstand	De maximale afstand waarop een ongeval een specifiek nadelig effect kan veroorzaken (bijvoorbeeld letsel).
Scenario	Een projectie van een mogelijke toekomstige gebeurtenis. Scenario's worden gebruikt om alternatieve mogelijke uitkomsten te overwegen.

Site	<i>Zie Inrichting</i>
Topgebeurtenis	Een ongewenste gebeurtenis, zoals een gevaarlijke situatie of een defect aan apparatuur. Typische topgebeurtenissen zijn het vrijkomen van brandbare of giftige stoffen, branden, explosies en andere storingen.
Veiligheidsrapport	Een veiligheidsrapport moet details bevatten over de inrichting, de aanwezige gevaarlijke stoffen, de installatie- of opslagfaciliteiten, mogelijke scenario's en risicoanalyses van zware ongevallen, preventie- en interventie maatregelen en de beschikbare managementsystemen, om het risico op grote ongevallen te voorkomen en te verminderen en om het mogelijk te maken dat de nodige maatregelen worden genomen om de gevolgen daarvan te beperken. De term <i>veiligheidsrapport</i> is gelijk aan een veiligheidsgeval buiten de EU of in andere industriële sectoren dan die vallen onder de Seveso-richtlijn.
Wat-als- analyse	Bekender als ' <i>What-if- analysis</i> '. Dit is een gestructureerde brainstormtechniek voor het bepalen wat er in een bepaald scenario mis kan gaan. Een team genereert wat-als-vragen met betrekking tot elke stap van het proces en elk onderdeel om mogelijke bronnen van fouten en mislukkingen te bepalen.
Zwaar ongeval	Een ongewoon voorval zoals een grote emissie, brand of explosie als gevolg van ongecontroleerde ontwikkelingen tijdens de exploitatie van een inrichting, en die leidt tot ernstig gevaar voor de menselijke gezondheid of het milieu, onmiddellijk of uitgesteld, binnen of buiten de inrichting, en waarbij sprake is van een of meer gevaarlijke stoffen.

## Lijst van boxen

<b>Box 1. Onzekerheden en datagebrek .....</b>	<b>9</b>
<b>Box 2. Klimaatverandering .....</b>	<b>11</b>
<b>Box 3. Schademodi en operationele omstandigheden .....</b>	<b>177</b>
<b>Box 4. Structuren ontworpen tegen impact van natuurgevaar .....</b>	<b>17</b>
<b>Box 5. Veel voorkomende oorzaken van falen .....</b>	<b>19</b>
<b>Box 6. Voorbeeld: Eenvoudige betrouwbaarheidsberekening .....</b>	<b>29</b>
<b>Box 7. Voorbeelden: Impact van natuurlijke gevaren op beslisbomen .....</b>	<b>29</b>

## Lijst van afbeeldingen

<b>Figuur 1.</b> Het proces risicobeheersing .....	6
<b>Figuur 2.</b> Een waterdiepte kaart van een terugkerende overstroming elk 100 jaar .....	100
<b>Figuur 3.</b> Voorbeeld van een gevarencurve voor aardbevingen op basis van de kans op overschrijding van een bepaalde seismische categorie .....	11
<b>Figuur 4.</b> Knikschade vanwege aardbeving bij silo's .....	13
<b>Figuur 5.</b> Leidingbreuk bij een flensverbinding tijdens een aardbeving .....	13
<b>Figuur 6.</b> Van fundament losgekomen atmosferische opslagtank na een orkaan.....	14
<b>Figuur 7.</b> Steunpoot falen van een sferisch opslagtank als gevolg van een aardbeving.....	14
<b>Figuur 8.</b> Schade aan het vaste dak van een atmosferische opslagvat veroorzaakt door sterk wind..	15
<b>Figuur 9.</b> Verschoven atmosferische opslagtank en ander stormvloedschade als gevolg van een orkaan, inclusief verschoven leiding .....	15
<b>Figuur 10.</b> Omgevallen en beschadigde atmosferische opslagvat vanwege een stormvloed na een orkaan.....	16
<b>Figuur 11.</b> Voorbeelden van de 3 manieren voor het koppelen van LOC-scenario's aan schadebeelden. ....	233
<b>Figuur 12.</b> Brand op wateroppervlakte die via de stormvloed verder wordt verspreid .....	235
<b>Figuur 13.</b> Additionele riemen om de steunpilaren van een bolvormige opslagtank te versterken tegen aardbevingen.....	34
<b>Figuur 14.</b> Installatie van een flexibele stalen buis, aangesloten op een groot olietank, die een beweging van zowel tank als leiding opvangt .....	34

## Lijst van tabellen

<b>Table 1.</b> Voorbeeldcriteria voor het identificeren en rangschikken van missiekritieke eenheden.....	122
<b>Table 2.</b> Schademodi en hun relatie tot natuurramp triggers .....	16
<b>Table 3.</b> Veel voorkomende schademodi in relatie tot processen opslag-eenheden en-onderdelen ..	17
<b>Table 4.</b> Generieke LOCs voor diverse soorten systemen.....	21
<b>Table 5.</b> Voorbeelden van het effect van natuurlijke gevaren op omgevingsvariabelen. Het table wordt gebruikt bij impactmodellen.....	25



## **IN CONTACT KOMEN MET DE EU**

### **Persoonlijk**

In de hele Europese Unie zijn er honderden Europe Direct-informatiecentra. Het adres van het dichtstbijzijnde centrum vindt u op: [https://europa.eu/european-union/contact\\_en](https://europa.eu/european-union/contact_en)

### **Aan de telefoon of per e-mail**

Europe Direct is een dienst die uw vragen over de Europese Unie beantwoordt. U kunt contact opnemen met deze dienst:

- via het gratis nummer: 00 800 6 7 8 9 10 11 (bepaalde operatoren kunnen kosten in rekening brengen voor deze oproepen),
- op volgend standaardnummer: +32 22999696, of
- per e-mail via: [https://europa.eu/european-union/contact\\_en](https://europa.eu/european-union/contact_en)

## **INFORMATIE OVER DE EU VINDEN**

### **Online**

Informatie over de Europese Unie in alle officiële talen van de EU is beschikbaar op de Europa-website: [https://europa.eu/european-union/index\\_en](https://europa.eu/european-union/index_en)

### **EU-publicaties**

U kunt gratis en geprijsde EU-publicaties downloaden of bestellen bij de EU Bookshop op: <https://publications.europa.eu/en/publications>. Meerdere exemplaren van gratis publicaties kunnen worden verkregen door contact op te nemen met Europe Direct of uw plaatselijk informatiecentrum (zie [https://europa.eu/european-union/contact\\_en](https://europa.eu/european-union/contact_en)).

## The European Commission's science and knowledge service

Joint Research Centre

### JRC Mission

As the science and knowledge service of the European Commission, the Joint Research Centre's mission is to support EU policies with independent evidence throughout the whole policy cycle.



**EU Science Hub**

[ec.europa.eu/jrc](https://ec.europa.eu/jrc)



@EU\_ScienceHub



EU Science Hub - Joint Research Centre



EU Science, Research and Innovation



EU Science Hub



Bureau voor publicaties  
van de Europese Unie

doi:10.2760/15297  
ISBN 978-92-76-58595-4