
Rapport

Scheidingsafstanden tussen windturbines en ondergrondse pijpleidingen met betrekking tot externe veiligheid

september 2015
versie 1.0

INHOUDSTAFEL

Inhoudstafel	i
I. Inleiding	I.1
I.1. Leeswijzer.....	I.1
I.2. Definitie domino-effect.....	I.1
I.3. Uitgangspunten	I.2
I.3.1. Analyse domino-effecten.....	I.2
I.3.2. Schademechanismen.....	I.3
I.3.3. Primaire faalwijzen (windturbine)	I.4
I.3.4. Secundaire faalwijzen (ondergrondse pijpleiding)	I.4
II. Methode	II.1
II.1. Algemeen	II.2
II.1.1. Schademechanismen.....	II.2
II.1.2. Primaire faalwijzen en -frequenties	II.2
II.2. Methode voor het bepalen van de scheidingsafstand.....	II.5
II.2.1. Vorming golven door de impact	II.5
II.2.2. Voortplanting golven doorheen de bodem	II.6
II.2.3. Schade veroorzaakt door golven op de leiding	II.6
II.2.4. Impact- en scheidingsafstand.....	II.6
II.2.5. Voorbeeldberekening	II.7
II.3. Methode voor het bepalen van de impact- en schadeafstand	II.9
II.3.1. Mastbreuk.....	II.9
II.3.2. Gondelbreuk.....	II.11
II.3.3. Impact- en scheidingsafstand.....	II.11
II.3.4. Voorbeeldberekening	II.11
II.4. Methode voor het uitvoeren van de risicoanalyse.....	II.12
II.4.1. Faalfrequentieverhoging.....	II.13
II.4.2. Potentieel aantal doden N	II.17
II.4.3. Frequentie secundair ongeval	II.18
II.4.4. Groepsrisico FN	II.18
II.4.5. Risico-evaluatie	II.18
II.4.6. Voorbeeldanalyse.....	II.19
III. Casussen	III.1
III.1. Casus 2: autosnelweg (stalen mast)	III.1
III.2. Casus 3: autosnelweg (hybride mast).....	III.5
III.3. Casus 4: industriële omgeving (stalen mast)	III.7
III.4. Casus 5: Generieke populatiedichtheden	III.12
IV. Referenties	IV.1

This document is issued by the Company under its General Conditions of Service accessible at <http://www.sgs.com/en/Terms-and-Conditions.aspx>. Attention is drawn to the limitation of liability, indemnification and jurisdiction issues defined therein.

Any holder of this document is advised that information contained hereon reflects the Company's findings at the time of its intervention only and within the limits of Client's instructions, if any. The Company's sole responsibility is to its Client and this document does not exonerate parties to a transaction from exercising all their rights and obligations under the transaction documents. Any unauthorized alteration, forgery or falsification of the content or appearance of this document is unlawful and offenders may be prosecuted to the fullest extent of the law.

I. INLEIDING

In 2014 werd een expertenoverleg geïnstalleerd op vraag van het kabinet van de minister van Leefmilieu. De aanleiding van dit overleg betrof discussies tussen windturbine-projectontwikkelaars en pijpleidingexploitanten omtrent de analyse van de risico's van windturbines nabij ondergrondse pijpleidingen. Volgende actoren namen deel aan het overleg:

- LNE – Dienst VR
- LNE – Dienst milieuvergunningen
- FETRAPI
- VWEA
- M-Tech
- SGS Belgium NV

Op dit expertenoverleg werd voor de analyse van het risico veroorzaakt door een domino-effect (indirect risico) van een windturbine op een ondergrondse pijpleiding met gevaarlijke stoffen een kwantitatieve risicoanalysemethode uitgewerkt. Deze methode wordt in voorliggend document beschreven en toegepast op een aantal representatieve casussen.

I.1. Leeswijzer

In hoofdstuk I worden de uitgangspunten van de methode gegeven. Deze uitgangspunten werden uit de beschikbare literatuur overgenomen en vormden als het ware het startpunt voor het uitwerken van de methode. Tijdens het overleg werden de uitgangspunten aangevuld met aannames, e.d.

In hoofdstuk II wordt de methode beschreven en geïllustreerd aan de hand van een voorbeeld. Daar waar er specifieke aannames gemaakt werden ten behoeve van het numeriek uitwerken van het voorbeeld, zijn deze aannames in de tekst onderlijnd. In een specifieke studie, dienen op basis van de beschikbare data wellicht andere aannames gemaakt te worden.

In hoofdstuk III worden ten slotte verschillende casussen uitgewerkt.

I.2. Definitie domino-effect

Een domino-effect wordt in dit document gedefinieerd als een effect waarbij het falen van een externe gevarenbron de oorzaak is van de vrijzetting van een gevaarlijke stof uit een secundaire installatie, met een zwaar ongeval tot gevolg (LNE, n.d.).

Een domino-effect van een windturbine (externe gevarenbron of primaire installatie) naar een ondergrondse pijpleiding met gevaarlijke stoffen (secundaire installatie) is mogelijk doordat het falen van een windturbine leidt tot de vorming van één of meerdere fragmenten die bij impact op de grond kunnen leiden tot het falen van de ondergrondse pijpleiding. Het primaire effect wordt hier veroorzaakt door de impact van een fragment van de windturbine, terwijl het secundaire effect het gevolg is van de vrijzetting van een gevaarlijke stof uit de ondergrondse pijpleiding.

I.3. Uitgangspunten

Bij het uitwerken van de methode is uitgegaan van bestaande methodes voor het analyseren en evalueren van het (directe) risico van windturbines, ondergrondse pijpleidingen voor het vervoer van gevaarlijke stoffen en Seveso-inrichtingen en voor het analyseren en evalueren van het risico van een domino-effect.

I.3.1. Analyse domino-effecten

De risico's veroorzaakt door domino-effecten worden in de praktijk op verschillende mogelijke manieren geanalyseerd en geëvalueerd. In de in dit document beschreven methode wordt een stapsgewijze aanpak gevolgd, waarin (desgevallend) achtereenvolgens een effectenanalyse en een kwantitatieve risicoanalyse wordt uitgevoerd.

EFFECTENANALYSE – Om na te gaan of een primair effect aanleiding kan geven tot schade aan een secundaire installatie (m.a.w. of een domino-effect mogelijk is) wordt er gebruikgemaakt van zogenaamde schadecriteria (die afhankelijk zijn van het type en de beschermingsgraad van de secundaire installatie).

Op basis van deze schadecriteria kan bepaald worden tot welke afstand het falen van een primaire installatie een domino-effect kan veroorzaken ter hoogte van de secundaire installatie. Deze schadeafstand kan grafisch op een plan aangeduid worden als een cirkel. Indien de afstand tussen de primaire installatie (i.c. de windturbine) en de secundaire installatie (i.c. de ondergrondse pijpleiding) groter is dan de berekende schadeafstand, wordt een domino-effect tussen beide als onwaarschijnlijk of onmogelijk geacht.

KWANTITATIEVE RISICOANALYSE – De kwantitatieve risicoanalyse (QRA) is een techniek die toelaat om risico's op basis van numerieke waarden te analyseren en te evalueren. In de hier beschreven methode wordt het risico bepaald onder de vorm van een groepsrisico.

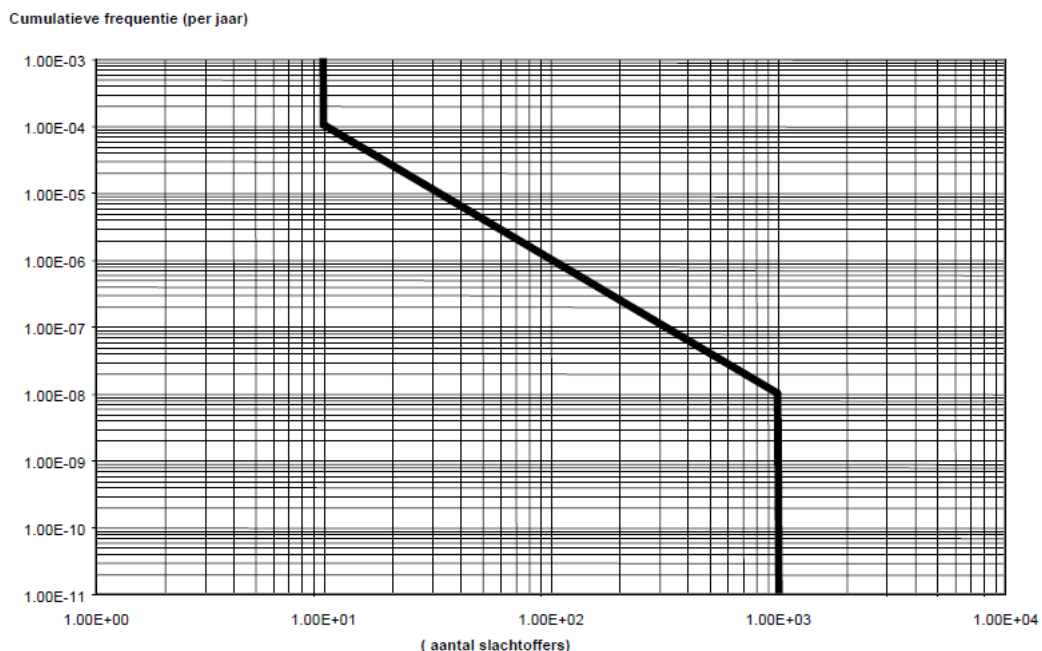
Het groepsrisico is de kans (per jaar) dat een aantal personen in de omgeving van een of meerdere installaties met gevaarlijke stoffen gelijktijdig omkomt ten gevolge van een vrijzetting van een gevaarlijke stof uit een installatie. Bij de berekeningen zijn zowel de aantallen externe personen van belang als de tijd dat ze zich op jaarbasis gemiddeld ter hoogte van de bestudeerde installatie(s) (i.c. de ondergrondse pijpleiding¹) ophouden.

Het groepsrisico wordt typisch weergegeven in de vorm van een FN-curve, waarbij op de ordinaat de cumulatieve frequentie F (per jaar) wordt uitgezet en op de abscis het aantal te verwachten slachtoffers N . Het criterium voor het groepsrisico wordt voorgesteld als een lijn in een FN-diagram die het gebied van het aanvaardbare risico afbakent.

Het criterium dat voor het groepsrisico van Seveso-inrichtingen en van windturbines wordt toegepast in Vlaanderen wordt getoond op onderstaande figuur (LNE, 2006). Zolang de groepsrisicocurve beneden de zwarte lijn is gelegen wordt het groepsrisico van de betreffende activiteiten als aanvaardbaar beschouwd. Op dit moment is er geen criterium voor de evaluatie van het groepsrisico van ondergrondse pijpleidingen met gevaarlijke stoffen.

¹ Opgemerkt wordt dat in de analyse van het risico van een domino-effect de omvang van de gevolgen (bv. het aantal doden) doorgaans bepaald wordt door het falen van de secundaire installatie.

Figuur I.3.1.1 Criterium groepsrisico voor Seveso-inrichtingen op een FN-diagram



I.3.2. Schademechanismen

Indien een fragment van een windturbine een impact maakt op de grond kan dit op verschillende manieren aanleiding geven tot het falen van een ondergrondse pijpleiding:

- ❑ grondtrillingen veroorzaakt door de impact van een fragment op de grond;
- ❑ penetratie waarbij een fragment de grond doorboort en hierbij de leiding raakt.

GRONDTRILLINGEN – De bepaling van de schade veroorzaakt door grondtrillingen is gebaseerd op de methode van Fernandez et al. (2012). Door het uitvoeren van eindige-elementenberekeningen in combinatie met experimenten hebben Fernandez et al. een uitdrukking afgeleid voor de *peak particle velocity* PPV (mm/s) ter hoogte van een ondergrondse leiding veroorzaakt door de impact van een fragment op de grond:

$$PPV = \frac{m \cdot v}{\rho} \cdot \frac{k}{r^{1,3}}$$

waarin m (kg) de massa van het fragment is, v (m/s) de verticale snelheid waarmee het fragment inslaat op de grond, ρ (kg/m³) de dichtheid van de bodem, $k = 0,7$ een (kalibratie)parameter (Fernandez et al., 2012) en r (m) de afstand tussen de ondergrondse leiding en de plaats van impact. In de bovenstaande uitdrukking wordt in rekening gebracht dat een gedeelte van de kinetische energie van het fragment leidt tot de vorming van een krater (en bijgevolg niet bijdraagt tot de vorming van de golven) en tevens dat de golven gedempt worden door energiedissipatie in de bodem.² Hierdoor zijn de berekende scheidingsafstanden niet overdreven conservatief.

PENETRATIE – De bepaling van de schade veroorzaakt door penetratie is gebaseerd op het Handboek Risicozonering Windturbines, 2e editie (SenterNovem, 2005).

² In de experimenten is een "representatieve" bodem gebruikt (Fernandez et al., 2012).

Specifiek wordt er in het geval van mast- of gondelbreuk van uitgegaan dat het falen van een ondergrondse pijpleiding enkel mogelijk of waarschijnlijk is, indien de grond boven de pijpleiding getroffen wordt door de gondel of de bladwortel (i.e. het gedeelte van het blad tot aan de ligging van het zwaartepunt op ca. 1/3 van de rotorstraal). “Wanneer de gondel en de bladwortel naast het tracé [van de pijpleiding] terechtkomen, kan het tracé nog wel worden getroffen door het tipgedeelte van het blad. Dit zal een lage inslagbelasting tot gevolg hebben. Dit gedeelte van het blad bevat weinig materiaal. Tevens geldt dat de stijfheid van het blad in het tipgedeelte sterk afneemt evenals de sterkte. Dit samen met het feit dat in deze situatie het blad altijd onder een betrekkelijk kleine hoek de grond zal raken, heeft tot gevolg dat het blad in de meeste gevallen zal doorbuigen of breken zonder in de grond door te dringen. In die gevallen waarin het blad wel in de grond dringt zal dit slechts over een beperkte afstand gaan, waarna het alsnog verder zal doorbuigen of breken. De dekkingslaag zal zodoende vrijwel altijd voldoende bescherming bieden, zodat een leiding geen gevolgen zal ondervinden van het feit dat het tipgedeelte van een blad op het tracé terechtkomt.” (SenterNovem, 2005)

In het geval van bladbreuk wordt uitgegaan van een beschermingsfactor ten gevolge van de gronddekking. “De kans dat een ondergrondse leiding wordt getroffen door een afgebroken blad, met als gevolg dat de leiding zal scheuren of gaan lekken, is kleiner dan 0,001 keer de kans dat het zwaartepunt van het blad op het tracé terechtkomt”. (SenterNovem, 2005) In de bepaling van de beschermingsfactor werd rekening gehouden met (1) de rotatie van het blad tijdens zijn vlucht waardoor het blad bij impact eerder zal glijden over de grond dan te penetreren in de grond; (2) de lengteas van het blad bij impact waardoor het blad eerder zal schampen langs de leiding dan deze te beschadigen en (3) de kinetische energie van het blad die in vele gevallen onvoldoende zal zijn om de leiding te doen falen.

I.3.3. Primaire faalwijzen (windturbine)

Op basis van het *Handboek Risicozonering Windturbines, 2e editie* (SenterNovem, 2005), de *Studie Windturbines en Veiligheid* (VEA, 2007) en het *Handboek Risicozonering Windturbines, 3e editie* (Agentschap NL, 2013) worden de volgende scenario's met windturbines als relevant beschouwd:

- het naar beneden vallen van de gondel en/of de rotor van de windturbine (gondelbreuk);
- het structureel falen van de mast van de windturbine (mastbreuk);
- het afwerpen van een rotorblad (bladbreuk).

I.3.4. Secundaire faalwijzen (ondergrondse pijpleiding)

Op basis van het *Risicoanalysesysteem voor het transport van gevaarlijke stoffen* (LNE, 2014) worden de volgende representatieve faalwijzen van een ondergrondse pijpleiding beschouwd:

- breuk (uitstroomdiameter $d =$ leidingdiameter D_i);
- lek ($d = 0,1 D_i$).

Voor deze twee representatieve faalwijzen wordt voor een segment van een pijpleiding het verwachte aantal doden in de omgeving berekend.

In een recent afgewerkt onderzoeksproject (LNE, 2014) is een methode opgesteld voor de berekening en de weergave van het externe mensrisico van pijpleidingen (en andere modi voor het transport van gevaarlijke stoffen). Het volgens deze methode berekende externe

mensrisico kan beschouwd worden als een groepsrisico. Zo wordt voor een segment van een pijpleiding het verwachte aantal doden in de omgeving berekend ten gevolge van de twee representatieve ongevalsscenario's.

II. METHODE

De methode omvat een stapsgewijze aanpak, die vertrekt van een effectenanalyse op basis van de eigenschappen van de windturbine en desgevallend eindigt met een kwantitatieve risicoanalyse waarin tevens de eigenschappen van de ondergrondse pijpleiding betrokken worden.

Eerst wordt er een scheidingsafstand bepaald tussen de windturbine en de ondergrondse pijpleiding. Er wordt verondersteld dat falen van de ondergrondse leiding optreedt, indien de *peak particle velocity* PPV groter dan of gelijk is aan 100 mm/s (DIN 4150-3). Bijgevolg wordt de scheidingsafstand uitsluitend bepaald door de eigenschappen van de windturbine, wat een snelle berekening mogelijk maakt. Indien de afstand tussen de as van de windturbinemast en de as van de leiding groter is dan de berekende scheidingsafstand, wordt een domino-effect tussen beide als onwaarschijnlijk of onmogelijk geacht.

Indien niet voldaan wordt aan de scheidingsafstand bepaald op basis van de PPV, wordt een nieuwe scheidingsafstand (schadeafstand genoemd) berekend op basis van de eigenschappen van de windturbine én van de ondergrondse pijpleiding. Er wordt verondersteld dat een toename van de spanning in de leiding(wand) tot 90% van de SMYS (*specified minimum yield strength*) van de leiding leidt tot een lek, terwijl een toename tot 100% van de SMYS leidt tot breuk van de leiding (zie ook § II.3.1.3). Enkel indien de afstand tussen de as van de windturbinemast en de wand van de leiding kleiner is dan de berekende schadeafstand, dient er een kwantitatieve risicoanalyse uitgevoerd te worden³. Hierin wordt het groepsrisico als gevolg van een domino-effect van de windturbine op de ondergrondse pijpleiding bepaald en geëvalueerd. De directe risico's van de pijpleiding en de windturbine worden niet meegenomen in deze risicoanalyse.

Ongeacht het resultaat van de kwantitatieve risicoanalyse dient de afstand tussen de as van de windturbinemast en de as van de leiding minimaal 25 m te bedragen. De pijpleiding moet eveneens minstens 10 m buiten de fundering van de windturbine liggen.

³ Indien deze afstand groter is dan de berekende scheidingsafstand, dient er geen (verdere) risicoanalyse uitgevoerd te worden en wordt een domino-effect tussen de windturbine en de ondergrondse pijpleiding als onwaarschijnlijk of onmogelijk geacht.

II.1. Algemeen

II.1.1. Schademechanismen

Er wordt enkel uitgegaan van grondtrillingen als schademechanisme. Dit maakt dat het materiaal waaruit de wieken zijn opgebouwd irrelevant is. Volgende argumenten liggen aan de basis van dit uitgangspunt:

- ❑ (gondel- en mastbreuk) Het effectgebied van beide schademechanismen (grondtrillingen en penetratie) rond het punt van impact is vergelijkbaar in grootte.
- ❑ (gondel- en mastbreuk) Het wordt waarschijnlijker geacht dat een impact van een fragment van een windturbine een ondergrondse leiding beschadigt door grondtrillingen dan door penetratie: de impact van een fragment leidt steeds tot grondtrillingen, terwijl een fragment slechts onder bepaalde voorwaarden de grond zal penetreren (bv. impact onder een bepaalde hoek).
- ❑ (bladbreuk) De kans dat een afgeworpen blad⁴ een ondergrondse leiding penetreert is dermate laag dat het mogelijke domino-effect een verwaarloosbare bijdrage levert tot het externe risico dat uitgaat van de ondergrondse leiding.

II.1.2. Primaire faalwijzen en -frequenties

II.1.2.1. Gondelbreuk

De faalfrequentie voor gondelbreuk bedraagt $2,0 \cdot 10^{-4}$ /j (VEA, 2007).

II.1.2.2. Mastbreuk

Bij het uitwerken van de methode werden aannames gemaakt betreffende de wijze waarop de mast faalt en de bijhorende faalfrequentie. Voor de totale faalfrequentie horende bij mastbreuk wordt uitgegaan van $5,8 \cdot 10^{-5}$ /j (VEA, 2007). Deze faalfrequentie werd overgenomen uit het *Handboek Risicozonering Windturbines, 2e editie* (SenterNovem, 2005). Recent is dit handboek geüpdatet.

DNV-KEMA (2012) stelt: "Mastbreuk vindt plaats doordat de mast bij de voetflens afbreekt of dat de mast knikt op een hoger gedeelte. In het Handboek [Risicozonering Windturbines, 2e editie] is geen onderscheid gemaakt tussen deze twee faalscenario's. De impact van de twee faalscenario's verschilt dusdanig dat er bij de update is gekozen om onderscheid te maken tussen deze faalscenario's:

- ❑ volledig falen van de mast waarbij de mast loskomt van het fundament of waarbij de mast breekt in de onderste helft;
- ❑ [...] knikken van de mast in de bovenste helft. Bij knikken van de bovenste masthelft is er sprake van een geringere neerwaartse snelheid van masttop en gondel. De rotor/gondel kan aan de mast blijven hangen of met geringe impact alsnog op de bodem terechtkomen."

DNV KEMA heeft up-to-date faalfrequenties bepaald aan de hand van faalincidenten opgenomen in de Caithness Windfarm database voor de periode 2001 – 2010 in

⁴ De kans dat een afgebroken blad (bladbreuk) een ondergrondse leiding penetreert wordt lager ingeschat dan de kans dat een aangehecht blad (gondel- of mastbreuk) dit doet. In het laatste geval kan er immers sprake zijn van een krachtwerking waarbij de massa van de gondel en desgevallend van de mast het blad in de grond duwt.

combinatie met het aantal geïnstalleerde turbines per jaar per land (voor Duitsland, Denemarken en het Verenigd Koninkrijk).

“De gevonden faalfrequenties zijn in lijn met de verwachtingswaarde voor mastbreuk uit het Handboek (2005). Ook voor moderne windturbines kan dus een faalkans van $5,8 \cdot 10^{-5}/j$ als verwachtingswaarde voor mastbreuk toegepast worden. Op basis van de verhouding in de Caithness Windfarm database, worden faalfrequenties voor respectievelijk volledig falen en knikken van het bovenste mastdeel afgeleid van $5,0 \cdot 10^{-5}/j$ en $8,3 \cdot 10^{-6}/j$.” (Agentschap NL, 2013)

“Door de sterkte van de mast [...] blijkt dat bij knikken van de mast de rotor en de gondel niet (direct) op de bodem zullen vallen. Dit scenario is daarmee niet relevant voor falen van [ondergrondse pijpleidingen met gevaarlijke stoffen].” (Agentschap NL, 2013)

De relevante faalfrequentie voor mastbreuk bedraagt bijgevolg $5,0 \cdot 10^{-5}/j$.

Er wordt een onderscheid gemaakt tussen het falen van de mast aan de voet enerzijds en in de onderste helft van de mast anderzijds:

- mastbreuk aan de voet van de mast met een faalfrequentie van $1,5 \cdot 10^{-5}/j$;
- mastbreuk in de onderste helft van de mast met een faalfrequentie van $3,5 \cdot 10^{-5}/j$.

De verdeling van de faalfrequentie over beide scenario's is gebaseerd op de beschrijving van de faalincidenten opgenomen in de Caithness Windfarm database voor de periode 2001 – 2010. Hieruit blijkt dat in alle zes beschreven incidenten de mast faalde in het onderste gedeelte en dat in (minstens) twee van de zes gevallen de mast faalde aan de basis (fundering).

Bovenstaande faalfrequentie geldt enkel voor stalen masten en niet voor betonnen of hybride masten. “Er is te weinig betrouwbare faalinformatie bekend over windturbines met betonnen masten om enige statistiek op toe te passen.” (Agentschap NL, 2013)

Bij hybride masten wordt uitgegaan van een breuk aan de voet van het stalen gedeelte met een faalfrequentie van $1,5 \cdot 10^{-5}/j$ naar analogie met (volledig) stalen masten. Er wordt aangenomen dat een breuk boven de voet van het stalen gedeelte niet resulteert in een impact, aangezien in de regel de lengte van het betonnen gedeelte groter is dan het stalen gedeelte en er van uitgegaan wordt dat de stalen wand niet scheurt maar knikt. In het geval van een volledig betonnen mast wordt er geen faalfrequentie voor stalen mastdelen meegenomen.

Voor het betonnen mastdeel bij hybride masten of betonnen masten kan de faalfrequentie afgeleid worden uit de in het ontwerp gebruikte betrouwbaarheidsindices en partiële veiligheidsfactoren (IEC61400, Eurocode, nationale normen). Het windklimaat van de site dient hierbij zowel op vlak van de gemiddelde windsnelheid en de berekende 50-jarige extreme windsnelheden (3 s windstoot en 10 min gemiddelde) als op vlak van turbulentiegraad binnen de gecertificeerde windklasse te liggen. Alleszins zal voor het betonnen mastdeel nooit een faalfrequentie lager dan $1,0 \cdot 10^{-6}/j$ gebruikt worden. Bij gebrek aan dergelijke onderbouwing zal een standaardwaarde van $3,5 \cdot 10^{-5}/j$ met uniforme verdeling voor het betonnen mastdeel gebruikt worden.

II.1.2.3. Bladbreuk

Dit scenario wordt niet relevant geacht. Op basis van de berekende impactafstand voor grondtrillingen is immers tijdens het overleg besloten dat het niet realistisch is dat de

impact van een blad op de grond tot grondtrillingen zou leiden die een ondergrondse pijpleiding op een diepte van 0,8 m (minimale diepteligging) of meer kunnen doen falen.

II.2. Methode voor het bepalen van de scheidingsafstand

In het algemeen bestaat een model om scheidingsafstanden te berekenen tussen een ondergrondse leiding en de impactlocatie van een vallend object uit drie deelmodellen voor de berekening van (1) de vorming van golven door de impact, (2) de voortplanting van deze golven doorheen de bodem en (3) het effect van (i.e. de schade veroorzaakt door) de golven op de leiding.

De projectspecifieke gegevens die vereist zijn om de scheidingsafstand te berekenen, zijn:

- de massa van de rotor,
- de massa van de gondel,
- de massa van het bovenste mastsegment met een lengte van 30 m en
- de ashoogte.

II.2.1. Vorming golven door de impact

De impact van een (zwaar) object op de grond leidt tot de vorming van golven in de bodem. Des te groter de impuls (product van (verticale) snelheid en massa) van het object op het moment van de impact is, des te krachtiger zullen deze golven zijn.

De verticale snelheid v (m/s) van het fragment wordt berekend uit een energiebalans, waarin de kinetische energie van het fragment op het tijdstip van de impact gelijkgesteld wordt met de totale energie van het fragment voor het falen:

$$E_{\text{kin,impact}} = m \cdot \frac{v^2}{2} = m \cdot g \cdot h_0 + m \cdot \frac{v_0^2}{2} = E_{\text{pot,falen}} + E_{\text{kin,falen}} = E_{\text{tot,falen}}$$

waarin m (kg) de massa van het fragment is, g (m/s²) de valversnelling, h_0 (m) de initiële hoogte van het fragment en v_0 (m/s) de initiële snelheid.

Aangezien gondelbreuk leidt tot kleinere effectafstanden dan mastbreuk, wordt gondelbreuk verder niet beschouwd in de bepaling van de scheidingsafstand. Voor mastbreuk is de totale energie van het fragment voor het falen zijn potentiële energie.

MASSA VAN HET FRAGMENT – In het geval van mastbreuk slaan zowel de gondel en de rotor als de mast in op de grond. De massa van het fragment is de som van de massa's van de rotor (o.a. de bladen en de naaf), de gondel en het bovenste mastsegment met een lengte van 30 m⁵.

SNELHEID VAN HET FRAGMENT – De verticale snelheid van dit fragment bij impact v (m/s) wordt gegeven door

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot H_a} ,$$

waarin g (= 9,81 m/s²) de valversnelling is en H_a (m) de ashoogte.

PLAATS VAN IMPACT – Er wordt aangenomen dat de gondel en de rotor inslaan op 1 punt op een afstand (gemeten vanaf de inplantingslocatie van de windturbine) gelijk aan de ashoogte van de windturbine.

⁵ Dit is een standaardwaarde, die niet berust op enige berekening maar eerder op een pragmatische inschatting.

II.2.2. Voortplanting golven doorheen de bodem

De *peak particle velocity* PPV (mm/s) ter hoogte van een ondergrondse leiding veroorzaakt door de impact van een fragment op de grond wordt gegeven door

$$PPV = \frac{m \cdot v}{\rho} \cdot \frac{k}{r^{1,3}}$$

waarin m (kg) de massa van het fragment is, v (m/s) de verticale snelheid waarmee het fragment inslaat op de grond, ρ (kg/m³) de dichtheid van de bodem, $k = 0,7$ een (kalibratie)parameter en r (m) de afstand tussen de wand van ondergrondse leiding en de plaats van impact.

Voor de dichtheid van de bodem wordt een standaardwaarde toegepast: $\rho = 1800$ kg/m³.

II.2.3. Schade veroorzaakt door golven op de leiding

Er wordt verondersteld dat falen van de ondergrondse leiding optreedt, indien de *peak particle velocity* PPV groter dan of gelijk is aan 100 mm/s (DIN 4150-3). Dit is een zeer eenvoudig criterium, dat niet toelaat om specifieke eigenschappen van de ondergrondse leiding, zoals de wanddikte of de diameter van de leiding, in rekening te brengen. Hierdoor is het tevens een vrij conservatief criterium.

II.2.4. Impact- en scheidingsafstand

Uit het bovenstaande volgt dat de impactafstand r_{impact} gegeven wordt door

$$r_{\text{impact}} = \left[\frac{m \cdot (2 \cdot g \cdot H_a)^{0,5}}{\rho} \cdot \frac{k}{PPV} \right]^{0,77}$$

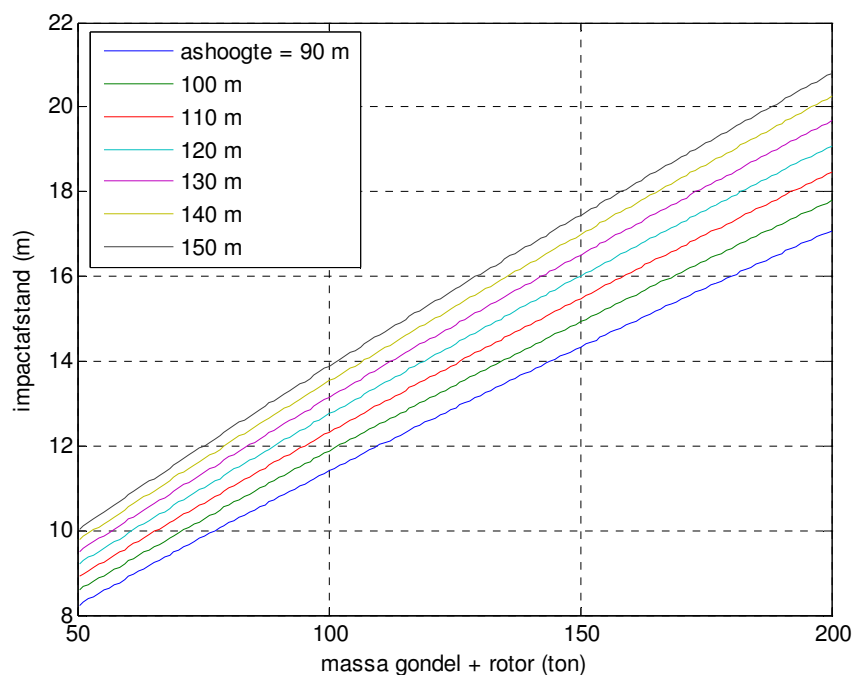
waarin m (kg) de massa van de gondel, de rotor en het bovenste mastsegment met een lengte van 30 m, $g = 9,81$ m/s², H_a (m) de ashoogte, $\rho = 1800$ kg/m³, $k = 0,7$ en $PPV = 100$ mm/s.

De scheidingsafstand is de impactafstand vermeerderd met de ashoogte.

II.2.5. Voorbeeldberekening

Indien wordt uitgegaan van een massa van het bovenste mastsegment van 45 ton (voor een lengte van 30 m), worden de onderstaande impactafstanden⁶ voor mastbreuk gevonden met behulp van het schadecriterium op basis van PPV.

Figuur II.2.5.1 Berekende impactafstanden (m) voor mastbreuk in functie van de ashoogte H (m) en de massa van de gondel en de rotor (ton) indien de massa van het bovenste mastsegment 45 ton bedraagt



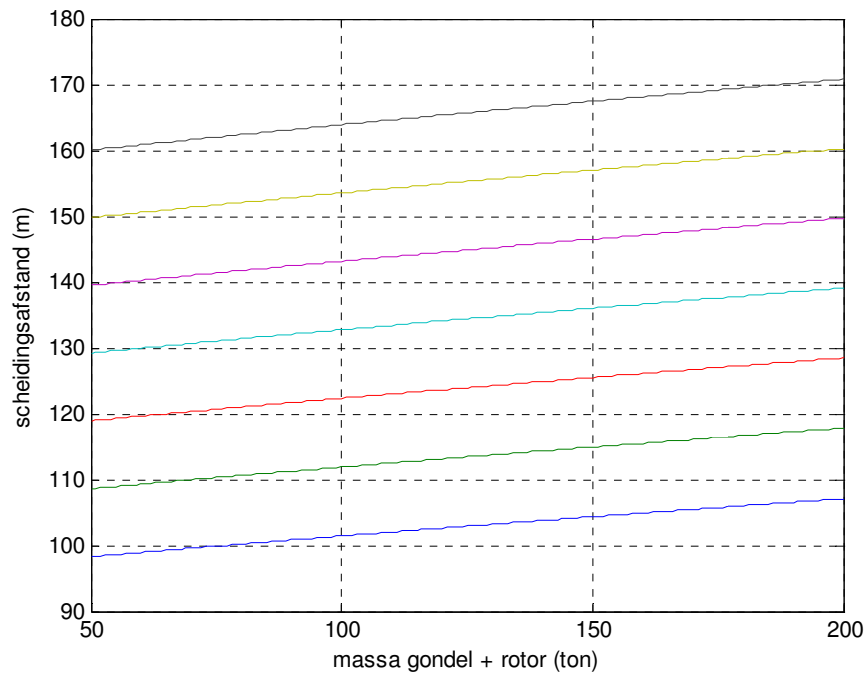
Tabel II.2.5.2 Berekende impactafstanden (m) voor mastbreuk in functie van de ashoogte H (m) en de massa van de gondel en de rotor (ton) indien de massa van het bovenste mastsegment 45 ton bedraagt

impactafstand (m)	massa gondel en rotor (ton)	
ashoogte (m)	120	180
100	13	17
125	15	19
150	16	20

Uit bovenstaande resultaten blijkt dat de impactafstand beduidend kleiner is dan de ashoogte. Hierdoor wordt de scheidingsafstand grotendeels bepaald door de ashoogte, aangezien er verondersteld wordt dat de mast aan de voet begeeft en de gondel en de rotor vervolgens inslaan op de grond op een afstand gelijk aan de ashoogte. De onderstaande figuur geeft de berekende scheidingsafstanden.

⁶ De impactafstand is de afstand (gemeten vanaf de impactlocatie) tot waar de PPV ten gevolge van de grondtrillingen 100 mm/s bedraagt.

Figuur II.2.5.3 Berekende scheidingsafstanden (m) voor mastbreuk in functie van de ashoogte H (m) en de massa van de gondel en de rotor (ton) indien de massa van het bovenste mastsegment 45 ton bedraagt; zie figuur II.2.4.1 voor de legende



II.3. Methode voor het bepalen van de impact- en schadeafstand

In de risicoanalyse (zie § II.4) wordt uitgegaan van twee relevante primaire faalwijzen: mastbreuk en gondelbreuk. De berekening van de impact- en schadeafstand⁷ is analoog voor beide. Hieronder wordt de beschrijving gegeven voor mastbreuk (zie § II.3.1). Vervolgens worden de verschilpunten gegeven voor gondelbreuk (zie § II.3.2).

De maximale schadeafstand wordt gevonden door de impactafstand voor mastbreuk te vermeerderen met de ashoogte. Indien deze schadeafstand kleiner is dan de afstand tussen de windturbine en de ondergrondse pijpleiding, dient er geen (verdere) risicoanalyse uitgevoerd te worden⁸.

De projectspecifieke gegevens die vereist zijn om de maximale schadeafstand te berekenen, zijn:

- de massa van de rotor,
- de massa van de gondel,
- de massa van het bovenste mastsegment met een lengte van 30 m,
- de ashoogte,
- de SMYS van de leiding,
- de maximaal toegelaten werkingsdruk van de leiding,
- de wanddikte van de leiding,
- de diameter van de leiding,
- de diepteligging van de leiding.

II.3.1. Mastbreuk

II.3.1.1. Vorming golven door de impact

MASSA VAN HET FRAGMENT – In het geval van mastbreuk slaan zowel de gondel en de rotor als de mast in op de grond. De massa van het fragment is de som van de massa's van de rotor (o.a. de bladen en de naaf), de gondel en het bovenste mastsegment met een lengte van 30 m.

SNELHEID VAN HET FRAGMENT – De verticale snelheid van dit fragment bij impact v (m/s) wordt gegeven door

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot H_a} ,$$

waarin g ($= 9,81 \text{ m/s}^2$) de valversnelling is en H_a (m) de ashoogte.

⁷ De impactafstand wordt gemeten vanaf het punt waarop het fragment op de grond inslaat, terwijl de schadeafstand gemeten wordt vanaf de inplantingslocatie van de windturbine.

⁸ Aangezien het schadecriterium dat in de risicoanalyse gehanteerd wordt, verschilt van datgene dat in de bepaling van de scheidingsafstand gebruikt wordt, is het mogelijk dat de hier berekende maximale schadeafstand kleiner is dan de scheidingsafstand.

II.3.1.2. Voortplanting golven doorheen de bodem

De *peak particle velocity* PPV (mm/s) ter hoogte van de ondergrondse leiding wordt gegeven door

$$PPV = \frac{m \cdot v}{\rho} \cdot \frac{k}{r^{1,3}}$$

waarin m (kg) de massa van het fragment is, v (m/s) de verticale snelheid van het fragment bij impact, ρ (kg/m³) de dichtheid van de bodem, $k = 0,7$ een (kalibratie)parameter en r (m) de afstand tussen de wand van de ondergrondse leiding en de plaats van impact.

Voor de dichtheid van de bodem wordt een standaardwaarde toegepast: $\rho = 1800$ kg/m³.

II.3.1.3. Schade veroorzaakt door golven op de leiding

SPANNING IN DE LEIDING – De (tangentiële) spanning in de leiding σ_{tan} (Pa) wordt gegeven door

$$\sigma_{\text{tan}} = \frac{E}{1 - \nu^2} \cdot (\varepsilon_{\text{tan}} + \nu \cdot \varepsilon_{\text{ax}})$$

$$\text{met } \varepsilon_{\text{tan}} = \frac{PPV}{c} \text{ en } \varepsilon_{\text{ax}} = 0,40 \cdot \frac{PPV}{c}$$

waarin E (Pa) de elasticiteitsmodulus is van het materiaal waaruit de leiding is opgebouwd, ν (-) de coëfficiënt van Poisson van het leidingmateriaal, ε_{tan} (m) de tangentiële rek, ε_{ax} (m) de axiale rek, PPV (m/s) de *peak particle velocity* en c (m/s) de voortplantingssnelheid van de golven.

Voor de elasticiteitsmodulus en de coëfficiënt van Poisson van het leidingmateriaal worden standaardwaarden toegepast: $E = 210$ GPa en $\nu = 0,29$; alsook voor de voortplantingssnelheid van de golven: $c = 700$ m/s.

Er wordt verondersteld dat een toename van de spanning in de leiding tot 90% van de SMYS (*specified minimum yield strength*) leidt tot een lek van de ondergrondse leiding, terwijl een toename tot 100% van de SMYS leidt tot breuk van de leiding⁹. De SMYS is een eigenschap van het materiaal waaruit de leiding is opgebouwd. Bijvoorbeeld voor een leiding opgebouwd uit staal X 42 bedraagt de SMYS 42.000 psi wat overeenkomt met 2.894 bar.

De nominale spanning σ_{tan} (Pa) in de leiding bedraagt

$$\sigma_{\text{tan}} = \frac{P \cdot D}{2 \cdot d}$$

waarin P (Pa) de maximaal toegelaten werkingsdruk is, D (m) de diameter van de leiding en d (m) de wanddikte van de leiding.

⁹ 90% van de SMYS komt overeen met de minimale testdruk voor een ondergrondse leiding met een maximaal toegelaten werkingsdruk van 72% van de SMYS.

II.3.2. Gondelbreuk

Ten opzichte van de faalwijze mastbreuk, is voor gondelbreuk de massa van het fragment verschillend.

MASSA VAN HET FRAGMENT – In het geval van gondelbreuk slaan de gondel en de rotor in op de grond. De massa van het fragment is de som van de massa's van de rotor (o.a. de bladen en de naaf) en de gondel.

II.3.3. Impact- en scheidingsafstand

De grenswaarde voor de toegelaten spanningstoename in de leiding bedraagt

$$0,9 \cdot \text{SMYS} - \frac{P \cdot D}{2 \cdot d} \quad \text{voor het scenario 'lek' en}$$

$$\text{SMYS} - \frac{P \cdot D}{2 \cdot d} \quad \text{voor het scenario 'breuk'.$$

De toegelaten PPV (mm/s) ter hoogte van de leidingwand bedraagt

$$0,27 \cdot \left(0,9 \cdot \text{SMYS} - \frac{P \cdot D}{2 \cdot d} \right) \quad \text{voor het scenario 'lek' en}$$

$$0,27 \cdot \left(\text{SMYS} - \frac{P \cdot D}{2 \cdot d} \right) \quad \text{voor het scenario 'breuk',}$$

waarin SMYS (bar) de *specified minimum yield strength* van de leiding is, P (bar) de maximaal toegelaten werkingsdruk in de leiding, D (mm) de diameter van de leiding en d (mm) de wanddikte van de leiding.

De impactafstand r_{impact} wordt gegeven door

$$r_{\text{impact}} = \left[\frac{m \cdot (2 \cdot g \cdot H_a)^{0,5}}{\rho} \cdot \frac{k}{\text{PPV}} \right]^{0,77}$$

waarin m (kg) de massa van de gondel, de rotor en het bovenste mastsegment met een lengte van 30 m, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, H_a (m) de ashoogte, $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$, $k = 0,7$ en PPV (mm/s) de toegelaten PPV ter hoogte van de leidingwand.

De scheidingsafstand is de impactafstand vermeerderd met de ashoogte.

II.3.4. Voorbeeldberekening

Voor een voorbeeldberekening wordt verwezen naar § II.4.6.1.

II.4. Methode voor het uitvoeren van de risicoanalyse

In het geval van een domino-effect van een windturbine op een ondergrondse pijpleiding met gevaarlijke stoffen, zijn het de mogelijke effecten ten gevolge van een vrijzetting uit de leiding die het risico bepalen. Deze effecten worden bepaald in overeenstemming met de werkwijze uit *Risicoanalysesysteem voor transport van gevaarlijke stoffen: Leidraad* (LNE, 2014).

Meer bepaald zal voor alle segmenten van de leiding met een lengte van 10 m die mogelijk falen als het gevolg van een impact van een fragment van de windturbine op de grond, het potentieel aantal doden bepaald worden voor twee representatieve faalwijzen, m.n. breuk en lek van de leiding.

Daarnaast zal voor elk van de mogelijk getroffen segmenten en voor de twee representatieve faalwijzen de faalfrequentie ten gevolge van een mogelijke impact van de windturbine bepaald worden.

Ten slotte zal op basis van de combinatie van het potentieel aantal doden en de bijhorende faalfrequentie het groepsrisico als gevolg van een domino-effect van de windturbine op de ondergrondse leiding bepaald worden en geëvalueerd worden aan de hand van het vigerende groepsrisicocriterium voor windturbines.

Voor een windturbinepark bestaande uit meerdere windturbines dient de evaluatie gemaakt te worden voor elke windturbine afzonderlijk.

Indien het neerkomen van een fragment van een windturbine op een bepaalde locatie meerdere ondergrondse leidingen gelijktijdig kan doen falen, dient uitgegaan te worden van het falen van de ondergrondse leiding die gekenmerkt wordt door de grootste effectafstanden.

De projectspecifieke gegevens die vereist zijn voor de risicoanalyse, zijn:

- de massa van de rotor,
 - de massa van de gondel,
 - de massa van het bovenste mastsegment met een lengte van 30 m,
 - de ashoogte,
 - de dimensies van de gondel,
 - de afstand tussen de windturbine en de ondergrondse pijpleiding,
 - de SMYS van de leiding,
 - de maximaal toegelaten werkingsdruk van de leiding,
 - de wanddikte van de leiding,
 - de diameter van de leiding,
 - de diepteligging van de leiding,
 - de gevaarlijke stof die zich in de leiding bevindt en
 - de populatiegegevens (aantal personen) binnen de maximale effectafstand van het scenario breuk van de leiding.
-

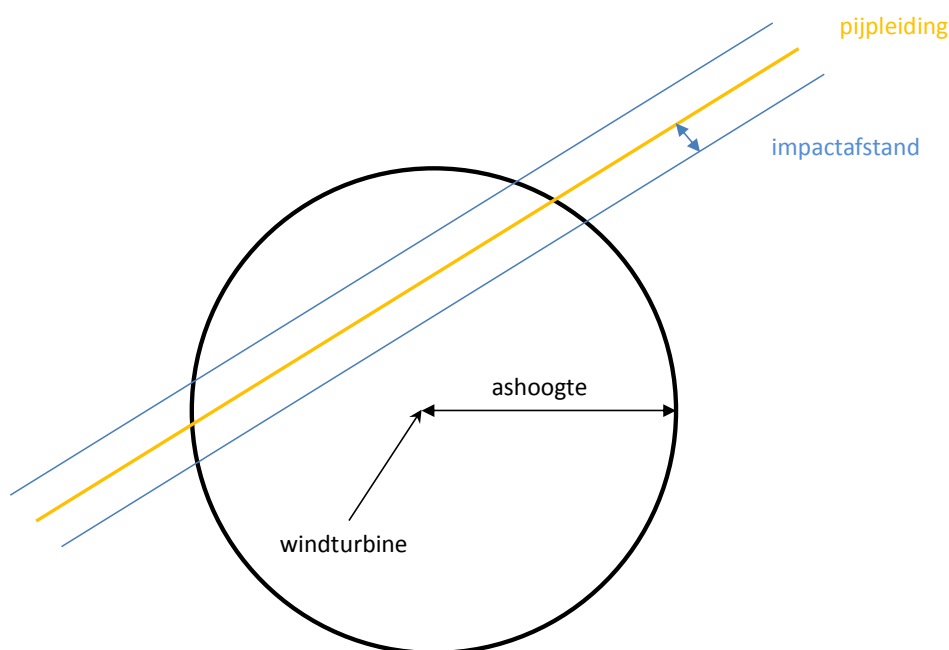
II.4.1. Faalfrequentieverhoging

De faalfrequentieverhoging wordt bepaald voor alle segmenten van de leiding met een lengte van 10 m die falen als het gevolg van een impact van een fragment van de windturbine op de grond. Een impact leidt tot het falen van de leiding, indien de impactafstand groter dan of gelijk is aan de afstand tussen de impactlocatie en de wand van de ondergrondse leiding. Hierbij kan rekening gehouden worden met de diepteligging van de leiding: de impact dient gesitueerd te zijn binnen een strook rond de leiding, waarvan de breedte B als volgt bepaald wordt door de impactafstand r_{impact} en de diepteligging z_{leiding} (waarbij abstractie wordt gemaakt van de diameter van de leiding):

$$B \cong \sqrt{r_{\text{impact}}^2 - z_{\text{leiding}}^2}.$$

Indien de leiding zich slechts enkele meters (bv. 2 m) onder het maaiveld bevindt, kan evenwel abstractie gemaakt worden van de diepteligging en kan de breedte van de strook gelijkgesteld worden aan de impactafstand (zie onderstaande figuur).

Figuur II.4.1.1 Impactzone rond pijpleiding



Teneinde de faalfrequentieverhoging te bepalen, dient voor elke impactlocatie die tot het falen van de ondergrondse leiding leidt (i.e. gelegen binnen de impactzone), bepaald te worden (1) wat de impactfrequentie is (zie § II.4.1.2) en (2) welk segment van de leiding faalt ten gevolge van de impact (zie § II.4.1.3).

Hieronder worden eerst de aannames omtrent de faalwijzen mastbreuk en gondelbreuk nader beschreven.

II.4.1.1. Faalwijzen: mastbreuk en gondelbreuk

Er wordt een onderscheid gemaakt tussen stalen masten enerzijds en betonnen of hybride¹⁰ masten anderzijds.

II.4.1.1.1 Breuk stalen mast

De faalfrequentie voor breuk van een stalen mast bedraagt $5,0 \cdot 10^{-5}/j$. In de berekening van de secundaire faalfrequentie (van de ondergrondse pijpleiding) wordt uitgegaan van volgende aannames:

- ❑ de frequentie voor mastbreuk aan de voet van de mast bedraagt $1,5 \cdot 10^{-5}/j$, het bovenste mastdeel roteert rond het breukpunt;
- ❑ de frequentie voor mastbreuk boven het maaiveld in de onderste helft van de mast bedraagt $3,5 \cdot 10^{-5}/j$ en is uniform verdeeld over de halve hoogte, het bovenste mastdeel roteert rond het breukpunt;
- ❑ de hoek waarin de mast valt is onafhankelijk van de windrichting (uniforme verdeling).

II.4.1.1.2 Breuk betonnen of hybride mast

In de berekening van de secundaire faalfrequentie wordt uitgegaan van volgende aannames:

- ❑ de frequentie voor mastbreuk aan de voet van het (bovenste) stalen deel bedraagt $1,5 \cdot 10^{-5}/j$, het (bovenste) stalen mastdeel roteert 90° rond het breukpunt en valt vervolgens recht naar beneden;
- ❑ de frequentie voor mastbreuk boven het maaiveld in het betonnen deel van de mast kan afgeleid worden uit de in het ontwerp gebruikte betrouwbaarheidsindices en partiële veiligheidsfactoren (IEC61400, Eurocode, nationale normen). Het windklimaat van de site dient hierbij zowel op vlak van de gemiddelde windsnelheid en de berekende 50-jarige extreme windsnelheden (3 s windstoot en 10 min gemiddelde) als op vlak van turbulentiegraad binnen de gecertificeerde windklasse te liggen. Alleszins zal voor het betonnen mastdeel nooit een faalfrequentie lager dan $1,0 \cdot 10^{-6}/j$ gebruikt worden. Bij gebrek aan dergelijke onderbouwing zal een standaardwaarde van $3,5 \cdot 10^{-5}/j$ gebruikt worden. De faalfrequentie is uniform verdeeld over de volledige hoogte¹¹ van het betonnen deel¹², het bovenste mastdeel roteert rond het breukpunt¹³;
- ❑ de hoek waarin de mast valt is onafhankelijk van de windrichting (uniforme verdeling).

¹⁰ Een hybride mast wordt verondersteld te bestaan uit een aanzienlijk betonnen mastdeel met daarop een stalen bovenstuk. In de beschouwde berekening wordt uitgegaan dat maximaal de helft van de hoogte bestaat uit staal.

¹¹ De uniforme verdeling is verantwoordbaar door het typisch conisch verloop van het betonnen mastdeel dat een gelijkmatige belasting over het mastdeel met zich meebrengt. Dit resulteert in een faalfrequentie van de hybride mast die gelijk is aan deze van de stalen mast maar dewelke in de verdeling van de faalfrequentie over de mastlengte wel verschilt.

¹² Voor een volledig betonnen mast wordt dan enkel dit scenario weerhouden.

¹³ Indien de hoogte van het betonnen deel groter is dan dat van het stalen deel, leidt een breuk in het betonnen deel niet steeds tot impact van de gondel en de rotor op de grond.

II.4.1.1.3 Gondelbreuk

De frequentie voor gondelbreuk bedraagt $2,0 \cdot 10^{-4}/j$. In de berekening van de secundaire faalfrequentie wordt uitgegaan van volgende aannames:

- de hoek waarin de gondel valt is onafhankelijk van de windrichting (uniforme verdeling);
- de gondel komt op een afstand gelijk aan de helft van de grootste dimensie van de gondel van de rand van de mast van de windturbine op de grond terecht.

II.4.1.2. Impactfrequentie

De impactkans is de kans dat het fragment op de grond inslaat op een bepaalde (impact)locatie en wordt gegeven door een getal tussen 0 en 1. Om hieruit de impactfrequentie te berekenen dient de impactkans vermenigvuldigd te worden met de primaire faalfrequentie (van de windturbine).

II.4.1.2.1 Mastbreuk boven het maaiveld

De hoogte h (m) (boven het maaiveld) waarop de mast breekt is uniform verdeeld tussen 0 en $H_a/2$ (halve ashoogte).

De cumulatieve verdelingsfunctie $F_H(h)$ is de kans dat de stochastische veranderlijke H kleiner dan of gelijk is aan de waarde h :

$$F_H(h) = P(H \leq h) = \frac{2 \cdot h}{H_a}.$$

De kansdichtheid $f_H(h)$ is de afgeleide van de cumulatieve verdelingsfunctie $F_H(h)$:

$$f_H(h) = \frac{d}{dh} F_H(h) = \frac{2}{H_a}.$$

De afstand r (m) waarop de gondel op de grond inslaat, indien de mast breekt op een hoogte h en het bovenste mastdeel roteert rond het breukpunt, wordt gegeven door

$$r = \sqrt{H_a^2 - 2 \cdot h \cdot H_a} \quad \text{of} \quad h = \frac{H_a^2 - r^2}{2 \cdot H_a}.$$

De kansdichtheid van $r(h)$ kan berekend worden uit de kansdichtheid van h met

$$f_R(r) = f_H(h) \cdot \left| \frac{dh}{dr} \right| = \frac{2}{H_a} \cdot \frac{r}{H_a} = \frac{2 \cdot r}{H_a^2}.$$

De cumulatieve verdelingsfunctie van r is bijgevolg

$$F_R(r) = P(R \leq r) = \int f_R(r) = \frac{r^2}{H_a^2}.$$

Hieruit volgt bijvoorbeeld dat de kans dat de gondel inslaat op een afstand $r \leq H_a/2$ gelijk is aan 0,25. Met andere woorden in 75% van de gevallen slaat de gondel in op een afstand groter dan $H_a/2$. Dit impliceert dat het niet het leidingsegment is dat het dichtst bij de windturbine ligt dat de hoogste kans heeft om "getroffen" te worden door de gondel (en de rotor) in het geval van mastbreuk.

De hoek θ (rad) waarin de mast valt, is uniform verdeeld: $F_{\Theta}(\theta) = P(\Theta \leq \theta) = \frac{\theta}{2 \cdot \pi}$.

De kans dat de gondel binnen een bepaalde oppervlakte op de grond inslaat, wordt berekend uit:

$$\iint \frac{2 \cdot r}{H_a^2} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot dr \cdot d\vartheta \text{ in poolcoördinaten of (via } r \cdot dr \cdot d\vartheta = dx \cdot dy)$$

$$\iint \frac{1}{\pi \cdot H_a^2} \cdot dx \cdot dy \text{ in cartesische coördinaten.}$$

Uit deze laatste vergelijking blijkt dat de kans evenredig is met de beschouwde oppervlakte A :

$$\iint \frac{1}{\pi \cdot H_a^2} \cdot dx \cdot dy = \int_A \frac{1}{\pi \cdot H_a^2} \cdot dA = \frac{A}{\pi \cdot H_a^2}.$$

Voor eenzelfde oppervlakte is de kans onafhankelijk van waar deze oppervlakte zich bevindt (op voorwaarde uiteraard dat de volledige oppervlakte kan getroffen worden). Dit impliceert dat de faalfrequentieverhoging voor naast elkaar gelegen segmenten mogelijk exact gelijk is, zoals ook blijkt uit de berekeningsresultaten.

II.4.1.2.2 Mastbreuk aan de voet

In het geval van mastbreuk aan de voet, vindt de impact van de gondel en de rotor plaats op een afstand van de windturbine gelijk aan de ashoogte van de windturbine. De impactlocaties bevinden zich bijgevolg op een cirkel.

De hoek waarin de mast valt is uniform verdeeld. Voor een bepaalde lengte van een cirkelboog is de kans op impact bijgevolg gelijk aan de lengte van de cirkelboog gedeeld door de omtrek van de cirkel.

II.4.1.2.3 Gondelbreuk

In het geval van gondelbreuk, vindt de impact van de gondel en de rotor plaats op een afstand van de mast van de windturbine gelijk aan de helft van de grootste dimensie van de gondel. De impactlocaties bevinden zich bijgevolg op een cirkel.

De hoek waarin de gondel valt is uniform verdeeld. Voor een bepaalde lengte van een cirkelboog is de kans op impact bijgevolg gelijk aan de lengte van de cirkelboog gedeeld door de omtrek van de cirkel.

II.4.1.3. Faalfrequentieverhoging

Door elke mogelijke impactlocatie met bijhorende impactfrequentie te koppelen met een of meerdere segmenten, kan de faalfrequentie(verhoging) van een segment berekend worden.

Hoe deze koppeling dient te gebeuren is niet gespecificeerd in de methode. In de casussen worden twee mogelijke werkwijzen gehanteerd: één waarin verondersteld wordt dat alle segmenten die zich binnen de impactafstand van de impactlocatie bevinden met een gewogen kans (tussen 0 en 1) kunnen falen en één waarin verondersteld wordt dat steeds (met een kans gelijk aan 1) het segment dat zich het dichtst bij de impactlocatie bevindt faalt. De resultaten van deze twee werkwijzen zijn nagenoeg dezelfde.

II.4.2. Potentieel aantal doden *N*

Het potentieel aantal doden in het geval een ondergrondse leiding faalt, is functie van de eigenschappen van de leiding en de populatie(dichtheid) in de omgeving van de leiding, maar niet van de eigenschappen van de windturbine.

Het document *Risicoanalysestelsel voor het transport van gevaarlijke stoffen: Leidraad* (LNE, 2014) beschrijft de representatieve (vervolg)scenario's.

Voor een pijpleiding voor het transport van een ontvlambaar gas zijn de representatieve scenario's:

- ❑ (*maximum credible accident scenario*) breuk van de leiding gevolgd door een vuurbal (na directe ontsteking);
- ❑ (*most credible accident scenario*) lek (lekdiаметer gelijk aan 10% van de leidingdiameter) gevolgd door een fakkelbrand (na directe ontsteking).

Voor een pijpleiding voor het transport van een ontvlambare vloeistof zijn de representatieve scenario's:

- ❑ (*maximum credible accident scenario*) breuk van de leiding gevolgd door een plasbrand (na directe ontsteking);
- ❑ (*most credible accident scenario*) lek (lekdiаметer gelijk aan 10% van de leidingdiameter) gevolgd door een plasbrand (na directe ontsteking).

Voor een pijpleiding voor het transport van een toxisch gas of toxische vloeistof zijn de representatieve scenario's:

- ❑ (*maximum credible accident scenario*) breuk van de leiding gevolgd door een toxische gaswolk;
- ❑ (*most credible accident scenario*) lek (lekdiаметer gelijk aan 10% van de leidingdiameter) gevolgd door een toxische gaswolk.

Er worden vier verschillende zones gedefinieerd op basis van de letaliteit voor onbeschermden personen:

- ❑ 100%
- ❑ 75% (tussen 50% en 100%)
- ❑ 30% (tussen 10% en 50%)
- ❑ 5% (tussen 1% en 10%)

In onderstaande tabel wordt bij wijze van voorbeeld de letaliteit voor onbeschermden personen gegeven voor breuk en lek van een 300 mm aardgasleiding op 90 bar.

Tabel II.4.2.1 Letaliteit voor onbeschermden personen in functie van de afstand tot een leidingsegment van een 300 mm aardgasleiding op 90 bar (LNE, 2014)

scenario	Letaliteit (-)			
	100%	50%	10%	1%
breuk – vuurbal	81	160	213	260
lek – fakkelbrand (dag)	2	5	12	17
lek – fakkelbrand (nacht)	2	2	2	2
afstand tot een leidingsegment (m)				

Voor ontvlambare stoffen wordt de bescherming door kledij (voor personen die zich buiten bevinden) of door gebouwen (voor personen die zich binnen bevinden) in rekening gebracht, wat leidt tot de volgende vier zones op basis van de letaliteit voor beschermde personen:

- ❑ 100%
- ❑ 10,5% (buiten) en 0% (binnen)
- ❑ 4,2% (buiten) en 0% (binnen)
- ❑ 0,7% (buiten) en 0% (binnen)

Voor toxische stoffen wordt voor personen die zich binnen in een (gesloten) gebouw bevinden een letaliteit gehanteerd die 10% bedraagt van de letaliteit voor personen buiten.

II.4.3. Frequentie secundair ongeval

De frequentie voor het optreden van een secundair ongeval wordt voor een pijpleiding met een ontvlambare stof o.a. bepaald door de kans op ontsteking (zie tabel II.4.3.1).

Tabel II.4.3.1 Kans op ontsteking voor ontvlambare stoffen

bronterm		kans op ontsteking (-)		
continu (kg/s)	instantaan (kg)	laag reactief gas	hoog of gemiddeld reactief gas	vloeistof
< 10	< 1000	0,040	0,248	0,13
10 – 100	1000 – 10000	0,078	0,6	0,13
> 100	> 10000	0,181	0,91	0,13

Voor toxische stoffen wordt voor het bepalen van de frequentie voor het optreden van een secundair ongeval uitgegaan van een dispersiefactor van 0,2.

II.4.4. Groepsrisico FN

De combinatie van het potentieel aantal doden N en de **bijhorende** frequentie van het secundaire ongeval leidt tot verschillende FN-koppels, die samen een groepsrisicocurve vormen. Indien in de bepaling van het potentieel aantal doden een onderscheid is gemaakt op basis van het specifieke tijdstip, dient dit uiteraard in rekening gebracht te worden in de bepaling van de frequentie van het secundaire ongeval.

II.4.5. Risico-evaluatie

Door het ontbreken van een criterium voor de evaluatie van het groepsrisico van ondergrondse pijpleidingen (met gevaarlijke stoffen) zal het groepsrisicocriterium dat in Vlaanderen wordt toegepast voor de evaluatie van de directe risico's van Seveso-richtingen en windturbines, ook toegepast worden voor de evaluatie van elk mogelijk domino-effect. Wanneer er een criterium voor de evaluatie van het groepsrisico van ondergrondse pijpleidingen ontwikkeld is, zal nagegaan worden of het opportuun is om het criterium voor het domino-effect van windturbines op ondergrondse leidingen op dit nieuwe groepsrisicocriterium af te stemmen.

II.4.6. Voorbeeldanalyse

De methode wordt geïllustreerd aan de hand van een voorbeeld. Een windturbine is ingeplant op een (minimale) afstand van 95 m van een ondergrondse leiding. De windturbine heeft een ashoogte van 100 m. De toren is volledig opgetrokken uit staal. De massa van de gondel en de rotor bedraagt 120 ton en de SMYS van de ondergrondse leiding bedraagt 2894 bar. De ondergrondse leiding is een ethyleenleiding van 250 mm diameter op een druk van 100 bar. In de nabijheid van de inplantingslocatie bevindt zich een autosnelweg (parallel aan de ondergrondse leiding op een afstand van 25 m).

II.4.6.1. Impact- en schadeafstand

De maximale toegelaten werkingsdruk in een pijpleiding wordt bepaald als een percentage van de SMYS. Deze bedraagt maximaal 72% van de SMYS. In de veronderstelling dat de pijpleiding bedreven wordt bij de maximale toegelaten werkingsdruk betekent dit dat een toename van de spanning in de pijpleiding met 18% van de SMYS aanleiding zou geven tot een lek (de spanning bereikt dan immers 90% van de SMYS), terwijl een toename met 28% van de SMYS aanleiding zou geven tot breuk van de leiding.

Indien wordt uitgegaan van een massa van het bovenste mastsegment van 45 ton (voor een lengte van 30 m), worden de onderstaande impactafstanden¹⁴ voor mastbreuk gevonden met behulp van het schadecriterium op basis van spanningen.

Tabel II.4.6.1.1 Berekende impactafstanden (m) voor mastbreuk in functie van de ashoogte H (m) en de massa van de gondel en de rotor (ton) indien de massa van het bovenste mastsegment 45 ton bedraagt en de pijpleiding bedreven wordt bij 72% van de SMYS

		massa gondel en rotor (ton)			
		120		180	
grade B (SMYS = 2410 bar)	H (m)	lek	breuk	lek	breuk
	100	12	9	15	11
	125	13	9	16	12
	150	14	10	18	13
X42 (SMYS = 2894 bar)	H (m)	lek	breuk	lek	breuk
	100	10	8	13	10
	125	11	8	14	10
	150	12	9	15	11
X60 (SMYS = 4140 bar)	H (m)	lek	breuk	lek	breuk
	100	8	6	10	7
	125	9	6	11	8
	150	9	7	12	9

De impactafstand voor een lek bedraagt bijgevolg 10 m en voor breuk 8 m.

¹⁴ Deze is dezelfde voor een stalen mast en voor een hybride mast, aangezien enkel de massa van de gondel, de rotor en het bovenste stalen mastsegment in rekening worden gebracht.

II.4.6.2. Faalfrequentieverhoging

Er is enkel rekening gehouden met breuk van de leiding.

Er wordt uitgegaan van volgende aanname: indien het fragment op de grond inslaat op een afstand van de pijpleiding kleiner dan de impactafstand, faalt de leiding in het segment dat zich het dichtst bij de plaats van impact bevindt.

Dit impliceert dat een segment van leiding faalt, indien de impact plaatsvindt in de rechthoekige zone rond dit segment met een oppervlakte A gelijk aan 10 m (lengte van het segment) x 8 m (impactafstand) x 2 (impact mogelijk aan weerszijden van de leiding) = 160 m².

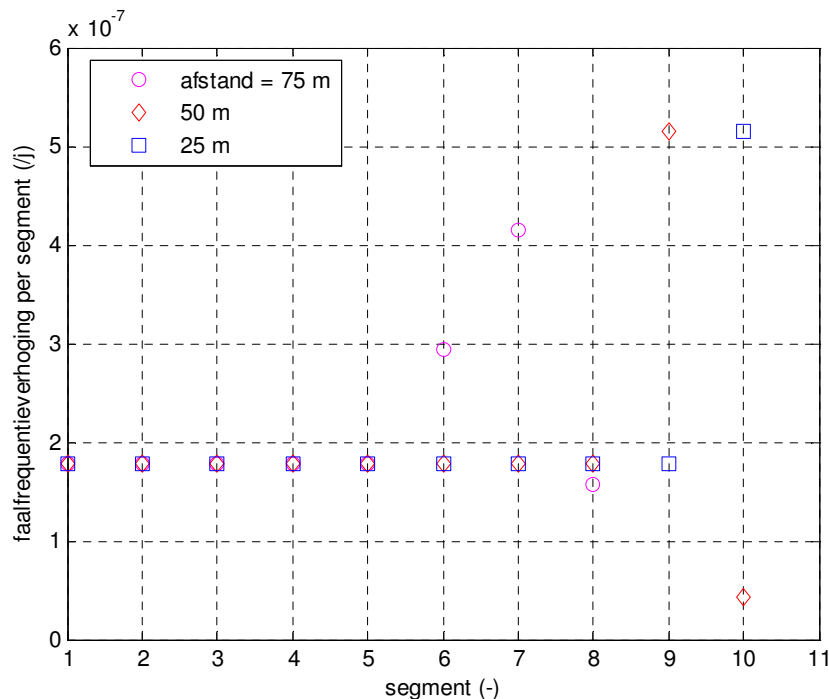
Indien deze volledige oppervlakte kan getroffen worden, bedraagt de totale impactkans

$$\text{voor de oppervlakte (zie § II.4.1.2.1)} \quad \frac{A}{\pi \cdot H_a^2} = \frac{160}{31416} = 5,1 \cdot 10^{-3}.$$

De secundaire faalfrequentie ten gevolge van mastbreuk van een stalen mast boven het maaiveld en leidend tot breuk bedraagt bijgevolg $5,1 \cdot 10^{-3}$ (impactkans) x $3,5 \cdot 10^{-5}/j$ (primaire faalfrequentie) = $1,8 \cdot 10^{-7}/j$.

Onderstaande figuur geeft de faalfrequentie van de verschillende betrokken segmenten van de leiding voor verschillende afstanden tussen de windturbine en de leiding in het geval de mast volledig uit staal is opgetrokken. Hierin is segment 1 het segment dat zich het dichtst bij de windturbine bevindt. Opgemerkt wordt dat slechts de helft van de segmenten getoond wordt gelet op de spiegelsymmetrie.

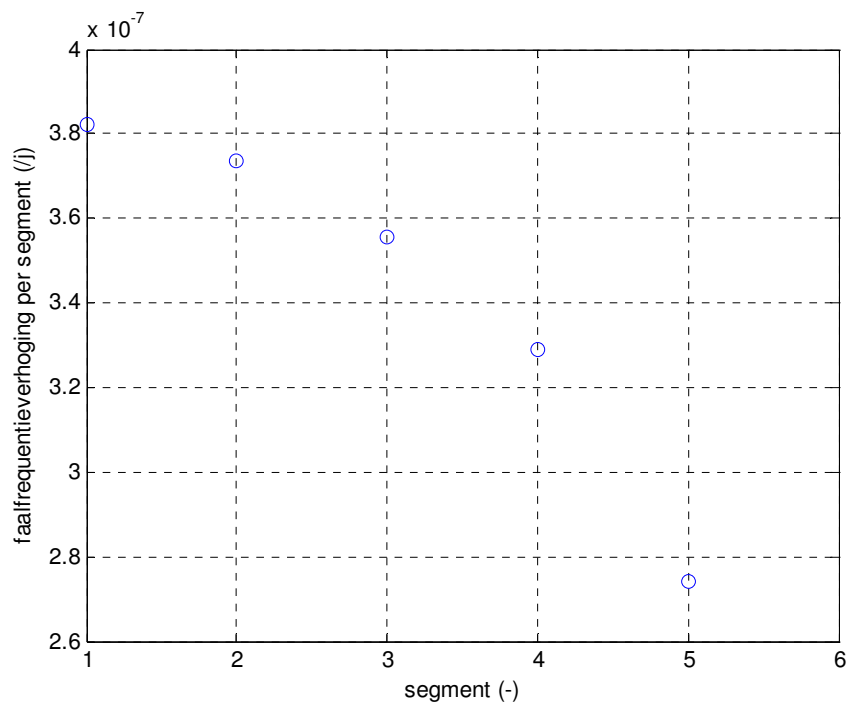
Figuur II.4.6.2.1 Faalfrequentieverhoging ten gevolge van mastbreuk voor een stalen mast met een ashoogte van 100 m en een impactafstand voor breuk van 8 m



II.4.6.2.1 Stalen mast

Onderstaande figuur geeft de faalfrequentieverhoging voor het voorbeeld. De gemiddelde faalfrequentieverhoging voor een segment bedraagt ca. $3,4 \cdot 10^{-7}/j$.

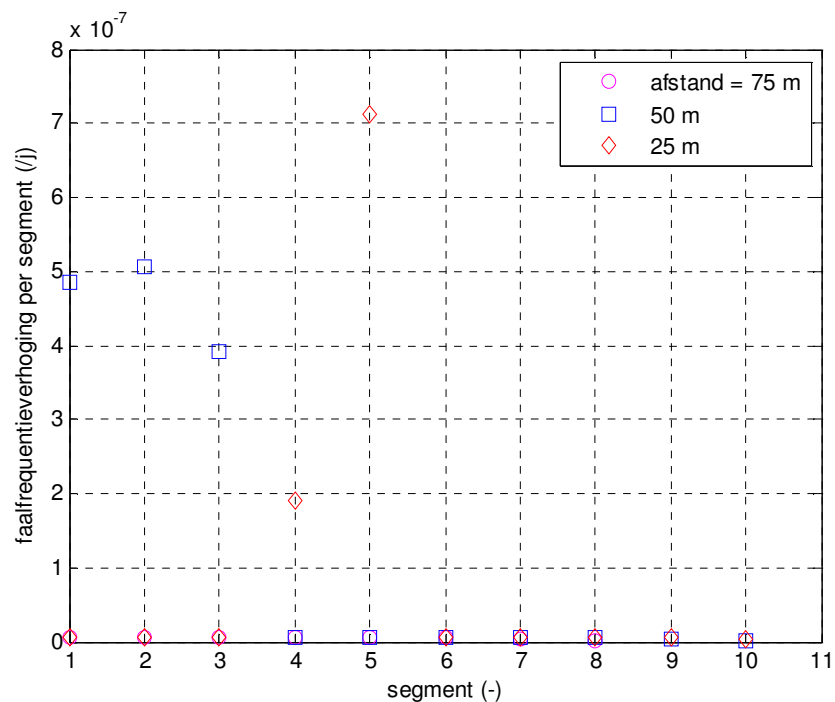
Figuur II.4.6.2.1.1 Faalfrequentieverhoging



II.4.6.2.2 Hybride mast

Onderstaande figuur geeft de faalfrequentieverhoging van de verschillende betrokken segmenten van de leiding voor verschillende afstanden tussen de windturbine en de leiding in het geval de mast voor de helft uit beton en voor de andere helft uit staal is opgetrokken.

Figuur II.4.6.2.2.1 Faalfrequentieverhoging voor een hybride mast met een ashoogte van 100 m en een impactafstand voor breuk van 8 m



II.4.6.3. Potentieel aantal doden

De ondergrondse leiding is een ethyleenleiding van 250 mm diameter op een druk van 100 bar. Onderstaande tabel geeft de letaliteit voor onbeschermden personen in functie van de afstand tot een leidingsegment.

Tabel II.4.6.3.1 Letaliteit voor onbeschermden personen in functie van de afstand tot een leidingsegment

Letaliteit (-)			
100%	50%	10%	1%
114	206	271	329
afstand tot een leidingsegment (m)			

Op de onderstaande figuur zijn rond het segment (met een lengte van 10 m) van de ondergrondse leiding dat zich op een afstand van 95 m van de windturbine bevindt, zwarte contouren getrokken op basis van de afstanden uit bovenstaande tabel. Door het trekken van deze contouren ontstaan er vier zones met een verschillende letaliteit (i.e. kans op doding) in het geval van breuk van de ondergrondse leiding.

Als relevante populatie aanwezig op een weg wordt deze genomen die zich ogenblikkelijk binnen een bepaalde zone bevindt. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen filegevoelige en niet-filegevoelige wegen (of delen van wegen). Voor een niet-filegevoelige weg wordt het aantal personen dat zich binnen een bepaalde zone bevindt bepaald door de tussenafstand tussen personenwagens (bv. 30 m), de bezettingsgraad van een personenwagen (bv. 1,86 personen per wagen), de afstand binnen de zone (220 m binnen zone 1 en 185 m binnen zone 2) en het aantal rijstroken (4). Voor het voorbeeld leidt dit tot ca. 60 personen binnen de zone met de hoogste letaliteit. Voor een filegevoelige weg is de tussenafstand tussen de wagens kleiner (bv. 7,5 m), wat leidt tot ca. 240 personen binnen de zone met de hoogste letaliteit. Structurele files treden uiteraard slechts gedurende bepaalde uren van de dag op, zodat rekening dient gehouden te worden met de tijdsfractie. Verder wordt er een onderscheid gemaakt tussen de verkeersdrukke tijdens werkuren en buiten werkuren (waarbij er abstractie gemaakt wordt van het weekend): buiten de werkuren is de normale verkeersdrukke de helft van deze tijdens de werkuren.

Voor het voorbeeld wordt aangenomen dat er zich

- gedurende 2 uur/dag (structurele file in één rijrichting) ca. 150 personen,
- gedurende 10 uur/dag (geen file – tijdens werkuren) ca. 60 personen en
- gedurende 12 uur/dag (geen file – buiten werkuren) ca. 30 personen

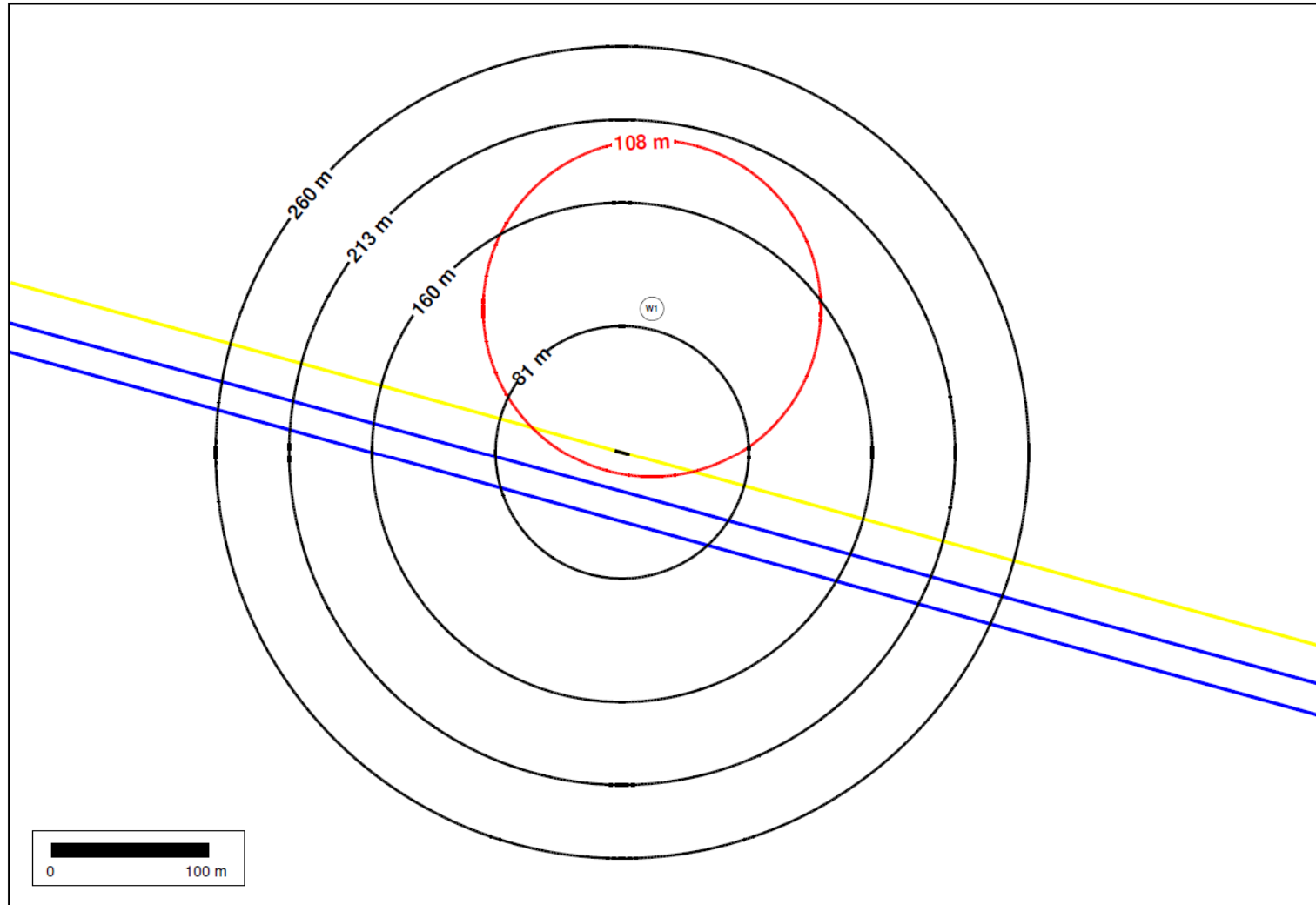
bevinden op de weg binnen zone 1 (met 100% letaliteit).

Daarnaast bevinden er zich

- gedurende 2 uur/dag (structurele file in één rijrichting) ca. 125 personen,
- gedurende 8 uur/dag (geen file – tijdens kantooruren) ca. 50 personen en
- gedurende 12 uur/dag (geen file – buiten kantooruren) ca. 25 personen

op de weg binnen zone 2. Deze bevinden zich allen buiten (i.e. onbeschermd voor thermische straling). De letaliteit in deze zone bedraagt 10,5%.

Figuur II.4.6.3.2 Inplanting windturbine nabij ondergrondse leiding (geel) en autosnelweg (blauw)



Uit het bovenstaande volgt dat er

- gedurende 2 uur/dag (structurele file in één rijrichting) ca. 163 potentiële doden,
- gedurende 10 uur/dag (geen file – tijdens kantooruren) ca. 65 potentiële doden en
- gedurende 12 uur/dag (geen file – buiten kantooruren) ca. 35 potentiële doden

zijn ten gevolge van een domino-effect.

Het potentiaal aantal doden bedraagt bijgevolg afhankelijk van het tijdstip van de dag 163, 65 of 35.

II.4.6.4. Frequentie secundair ongeval

Bij breuk van de leiding wordt een bronterm van ca. 30 ton gevonden. Aangezien ethyleen een gas is met een hoge reactiviteit, bedraagt de ontstekingskans 0,91. De frequentie voor het optreden van breuk van de leiding gevolgd door een vuurball (na ontsteking) bedraagt gemiddeld¹⁵ $0,91 \times 3,4 \cdot 10^{-7}/j$ per segment.

II.4.6.5. Groepsrisico FN

Voor het voorbeeld worden uiteindelijk de volgende FN-koppels gevonden:

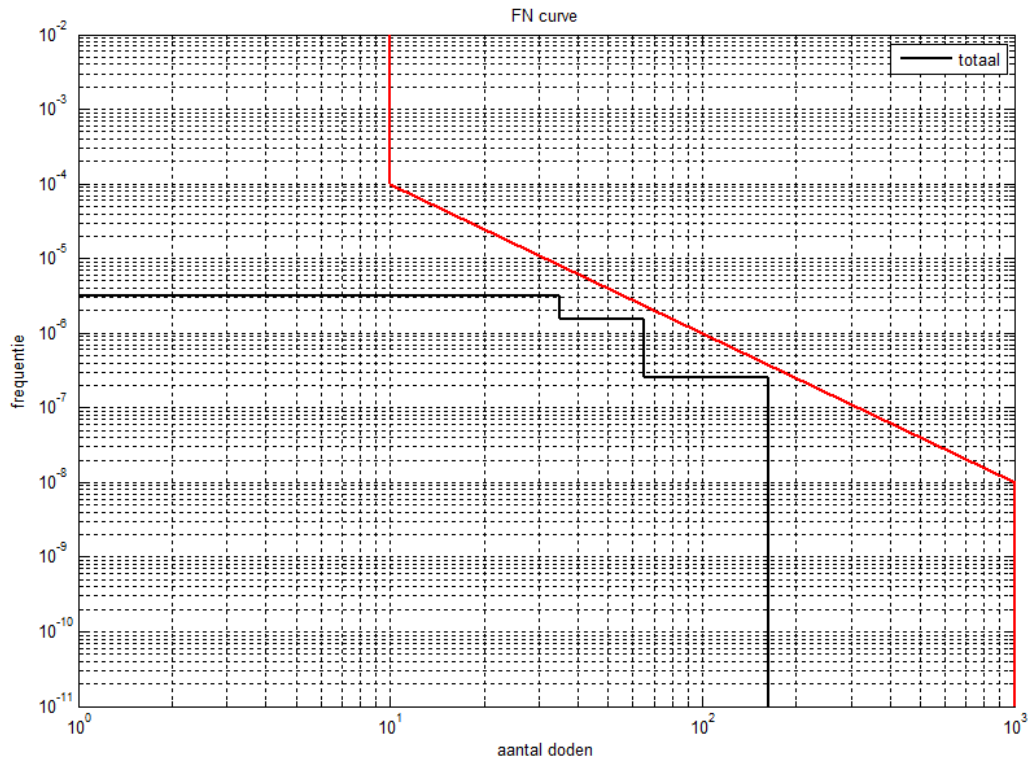
- $F = 2/24 \times 0,91 \times 3,4 \cdot 10^{-7}/j \times 10 = 2,6 \cdot 10^{-7}/j$ en $N = 163$,
- $F = 10/24 \times 0,91 \times 3,4 \cdot 10^{-7}/j \times 10 = 1,3 \cdot 10^{-6}/j$ en $N = 65$,
- $F = 12/24 \times 0,91 \times 3,4 \cdot 10^{-7}/j \times 10 = 1,6 \cdot 10^{-6}/j$ en $N = 35$.

voor de 10 segmenten.

Dit leidt tot de onderstaande groepsrisicocurve.

¹⁵ Aangezien het potentieel aantal doden hetzelfde is voor elk van de segmenten, kan er (voor de eenvoud van de berekening) uitgegaan worden van de gemiddelde faalfrequentie.

Figuur II.4.6.5.1 Groepsrisico ten gevolge van een domino-effect van een windturbine op een ondergrondse leiding (voorbeeld)



III. CASUSSEN

Het voorbeeld uit § II.4.6 vormt casus 1.

In casussen 1 – 3 wordt er uitgegaan van volgende aanname: indien het fragment op de grond terechtkomt op een afstand kleiner dan de impactafstand, faalt de leiding in het segment dat zich het dichtst bij de plaats van impact bevindt.

Voor casussen 4 – 5 wordt de impactfrequentie gewogen toegewezen aan de punten op de leiding binnen de schadeafstand, op basis van de onderlinge verhouding van het aantal valhoeken.

In de casussen wordt (voor de eenvoud) enkel het vervolgsценario breuk van de leiding beschouwd. In een specifieke studie dient het vervolgsценario lek steeds in de risicoanalyse betrokken te worden.

III.1. Casus 2: autosnelweg (stalen mast)

Figuur III.1.3 toont casus 2. Een windturbine W1 is ingeplant op een (minimale) afstand van 95 m van een ondergrondse leiding (gele volle lijn). De windturbine heeft een ashoogte van 100 m. De toren is volledig opgetrokken uit staal. De massa van de gondel en de rotor bedraagt 120 ton en de SMYS van de ondergrondse leiding bedraagt 2894 bar, waardoor de impactafstand voor een lek 10 m en voor breuk 8 m bedraagt (zie ook § IV.1.2). De ondergrondse leiding is een aardgasleiding van 300 mm diameter op een druk van 90 bar. De effectafstanden van deze leiding worden gegeven in tabel II.4.6.3.1. In de nabijheid van de inplantingslocatie bevindt zich een autosnelweg (blauwe contouren)).

Op de figuur zijn rond het segment (met een lengte van 10 m) van de ondergrondse leiding dat zich op een afstand van 95 m van de windturbine bevindt, zwarte contouren getrokken op basis van de afstanden uit tabel II.4.6.3.1. Door het trekken van deze contouren ontstaan er vier zones met een verschillende letaliteit (i.e. kans op doding) in het geval van breuk van de ondergrondse leiding.

POPULATIE OP WEGEN – Als relevante populatie aanwezig op een weg wordt deze genomen die zich ogenblikkelijk binnen een bepaalde zone bevindt. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen filegevoelige en niet-filegevoelige wegen (of delen van wegen). Voor een niet-filegevoelige weg wordt het aantal personen dat zich binnen een bepaalde zone bevindt bepaald door de tussenafstand tussen personenwagens (bv. 30 m), de bezettingsgraad van een personenwagen (bv. 1,86 personen per wagen), de afstand binnen de zone (bv. 155 m binnen zone 1) en het aantal rijstroken (bv. 4). Voor het voorbeeld leidt dit tot ca. 40 personen binnen de zone met de hoogste letaliteit. Voor een filegevoelige weg is de tussenafstand tussen de wagens kleiner (bv. 7,5 m), wat leidt tot ca. 150 personen binnen de zone met de hoogste letaliteit. Structurele files treden uiteraard slechts gedurende bepaalde uren van de dag op, zodat rekening dient gehouden te worden met de tijdsfractie.

Voor de casus wordt aangenomen dat er zich

- gedurende 2 uur/dag (structurele file in één rijrichting) ca. 100 personen,
- gedurende 10 uur/dag (geen file – tijdens werkuren) ca. 40 personen en
- gedurende 12 uur/dag (geen file – buiten werkuren) ca. 20 personen

bevinden op de weg binnen zone 1 (met 100% letaliteit).

Daarnaast bevinden er zich

- gedurende 2 uur/dag (structurele file in één rijrichting) ca. 100 personen,
- gedurende 8 uur/dag (geen file – tijdens kantooruren) ca. 40 personen en
- gedurende 12 uur/dag (geen file – buiten kantooruren) ca. 20 personen

op de weg binnen zone 2. Deze bevinden zich allen buiten (i.e. onbeschermd voor thermische straling). De letaliteit in deze zone bedraagt 10,5%.

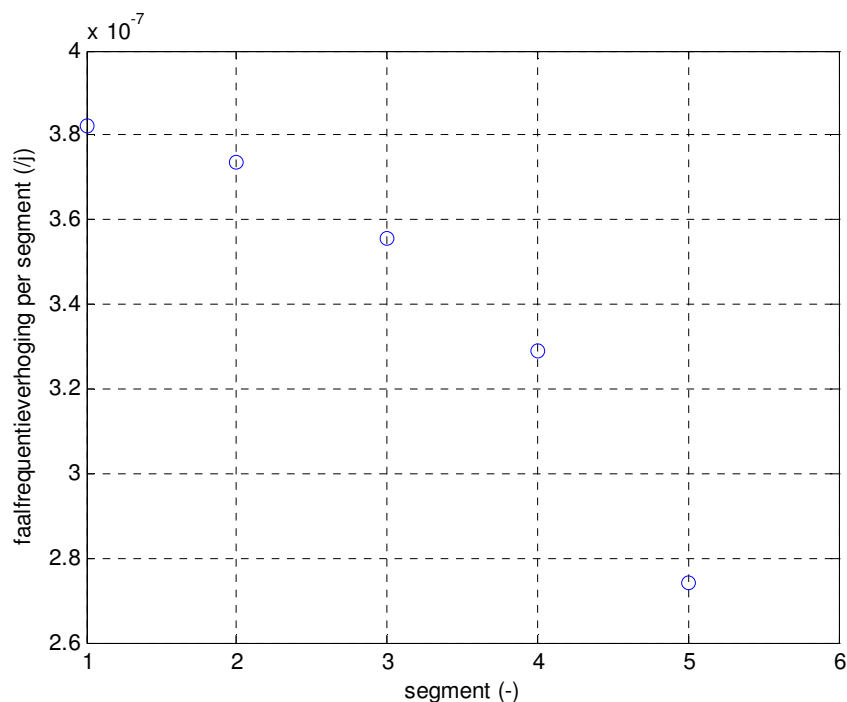
POTENTIEEL AANTAL DODEN – Uit het bovenstaande volgt dat er

- gedurende 2 uur/dag (structurele file in één rijrichting) ca. 110 potentiële doden,
- gedurende 10 uur/dag (geen file – tijdens kantooruren) ca. 44 potentiële doden en
- gedurende 12 uur/dag (geen file – buiten kantooruren) ca. 22 potentiële doden

zijn ten gevolge van een domino-effect.

FAALFREQUENTIEVERHOOGING – De gemiddelde faalfrequentieverhoging voor een segment bedraagt ca. $3,4 \cdot 10^{-7}/j$ (zie figuur III.1.1).

Figuur III.1.1 Faalfrequentieverhoging



GROEPSRISICO – Dit leidt uiteindelijk tot volgende F,N-koppels

- $F = 2/24 \times 0,181 \times 3,4 \cdot 10^{-7}/j \times 10 = 5,1 \cdot 10^{-8}/j$ en $N = 110$,
- $F = 10/24 \times 0,181 \times 3,4 \cdot 10^{-7}/j \times 10 = 2,6 \cdot 10^{-7}/j$ en $N = 44$,
- $F = 12/24 \times 0,181 \times 3,4 \cdot 10^{-7}/j \times 10 = 3,1 \cdot 10^{-7}/j$ en $N = 22$.

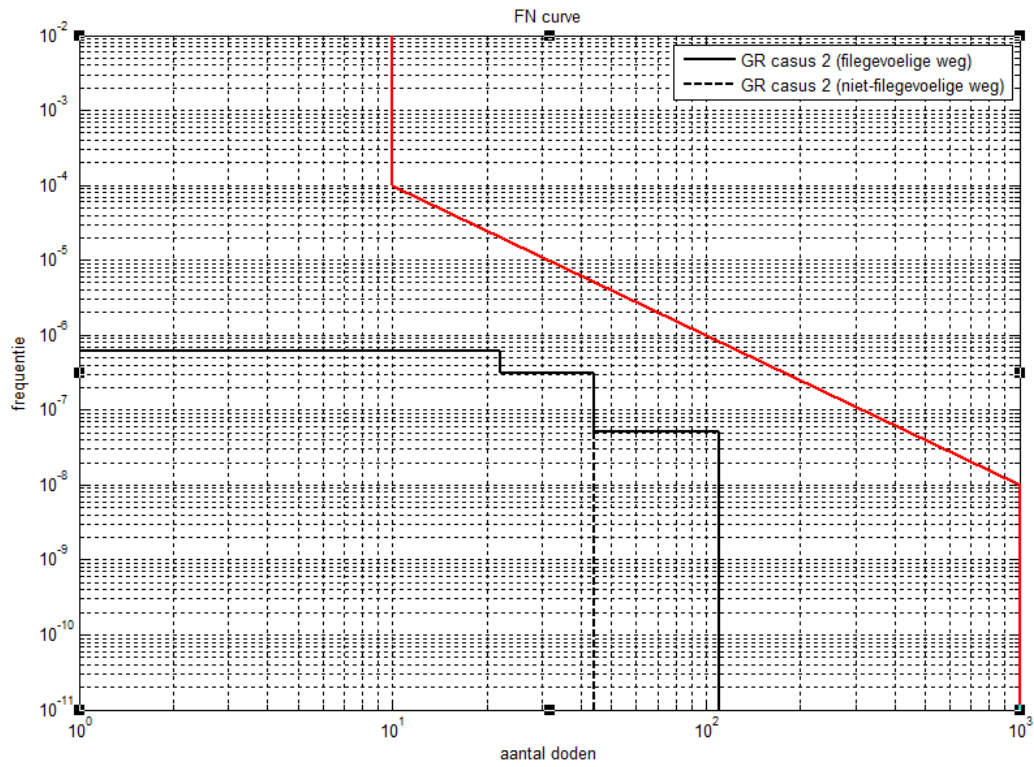
voor de 10 segmenten (zie figuur III.1.2).

Voor een niet-filegevoelige autosnelweg leidt dit tot volgende F,N-koppels

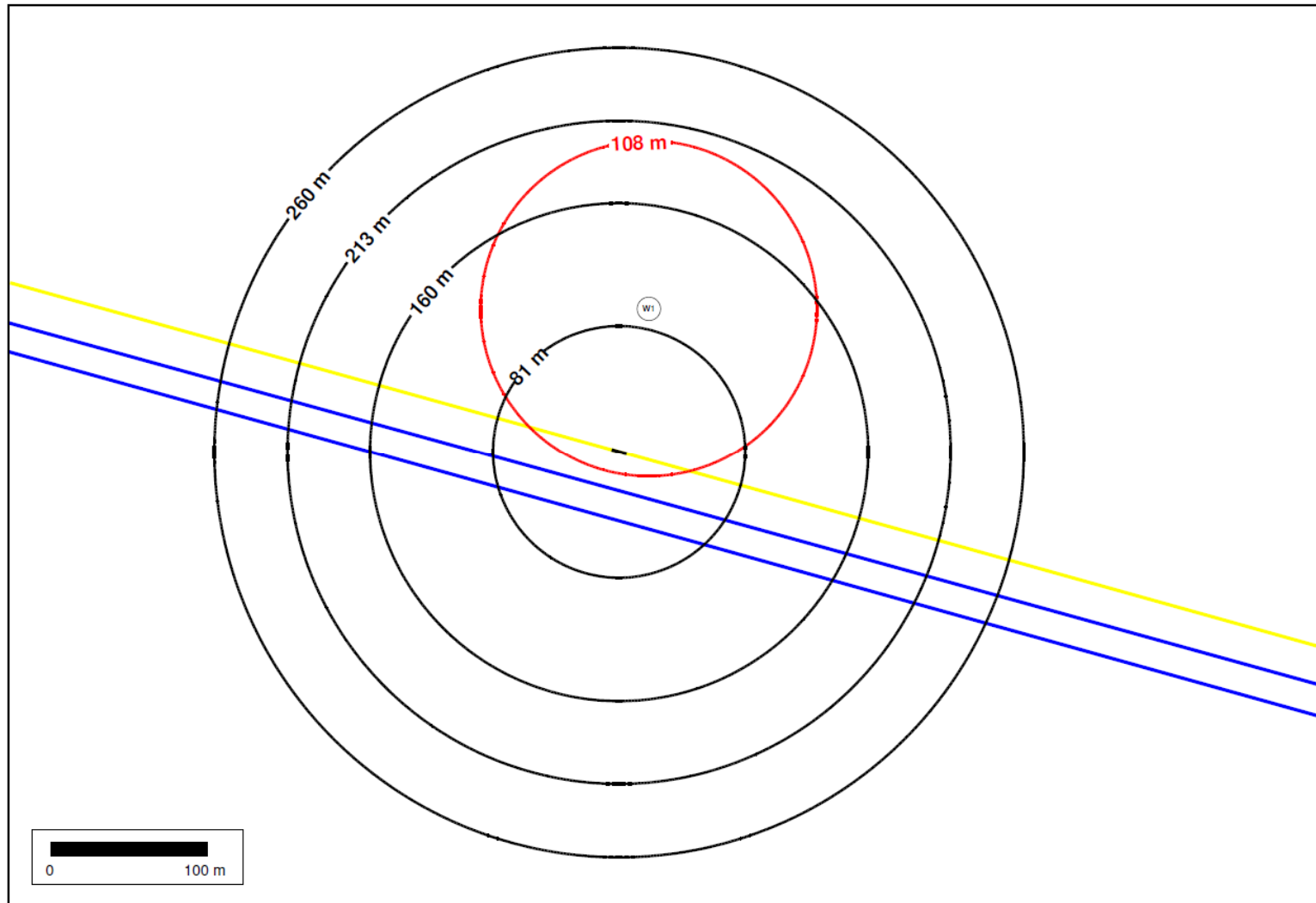
- $F = 12/24 \times 0,181 \times 3,4 \cdot 10^{-7}/j \times 10 = 3,1 \cdot 10^{-7}/j$ en $N = 44$,
- $F = 12/24 \times 0,181 \times 3,4 \cdot 10^{-7}/j \times 10 = 3,1 \cdot 10^{-7}/j$ en $N = 22$.

voor de 10 segmenten (zie figuur III.1.2).

Figuur III.1.2 Groepsrisico ten gevolge van een domino-effect van een windturbine op een ondergrondse leiding (casus 2)



Figuur III.1.3 Inplanting windturbine nabij ondergrondse leiding (geel) en autosnelweg (blauw)

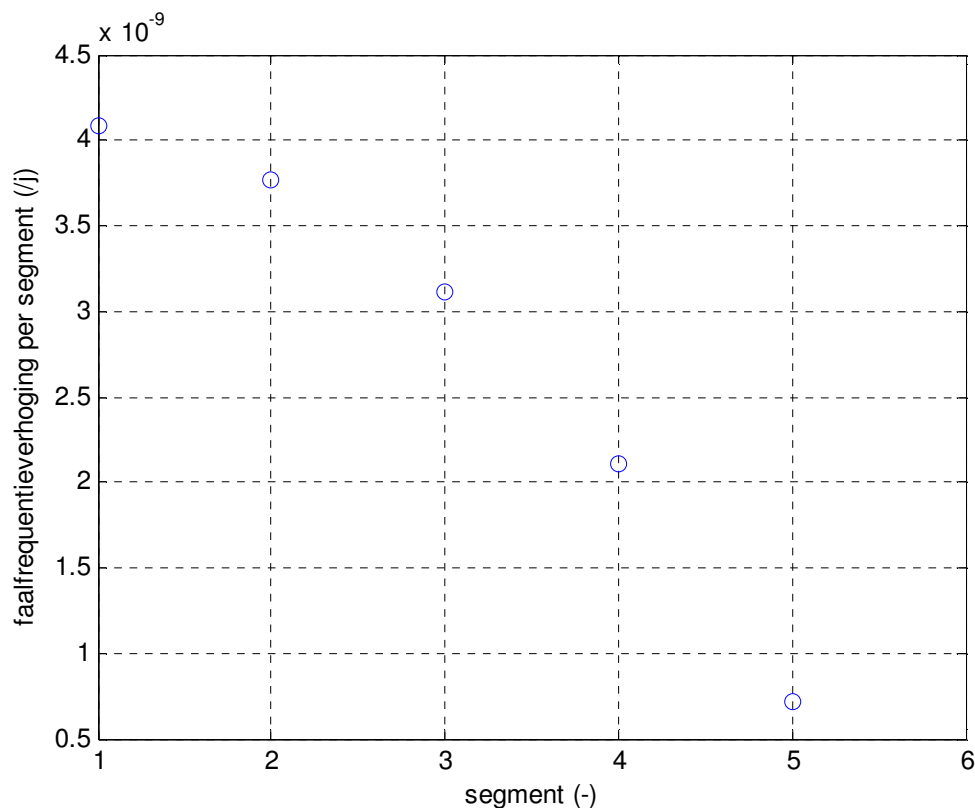


III.2. Casus 3: autosnelweg (hybride mast)

Indien de stalen mast uit casus 2 vervangen wordt door een hybride mast die voor de helft is opgetrokken uit beton en waarvoor een faalfrequentie van $1 \cdot 10^{-6}/j$ is aangetoond, leidt dit tot een gewijzigde faalfrequentieverhoging en een gewijzigd groepsrisico.

FAALFREQUENTIEVERHOOGING – De gemiddelde faalfrequentieverhoging voor een segment bedraagt ca. $2,8 \cdot 10^{-9}/j$ (zie figuur III.2.1).

Figuur III.2.1 Faalfrequentieverhoging



GROEPSRISICO – Dit leidt uiteindelijk tot volgende F,N-koppels

- $F = 2/24 \times 0,181 \times 2,8 \cdot 10^{-9}/j \times 10 = 4,2 \cdot 10^{-10}/j$ en $N = 110$,
- $F = 10/24 \times 0,181 \times 2,8 \cdot 10^{-9}/j \times 10 = 2,1 \cdot 10^{-9}/j$ en $N = 44$,
- $F = 12/24 \times 0,181 \times 2,8 \cdot 10^{-9}/j \times 10 = 2,5 \cdot 10^{-9}/j$ en $N = 22$.

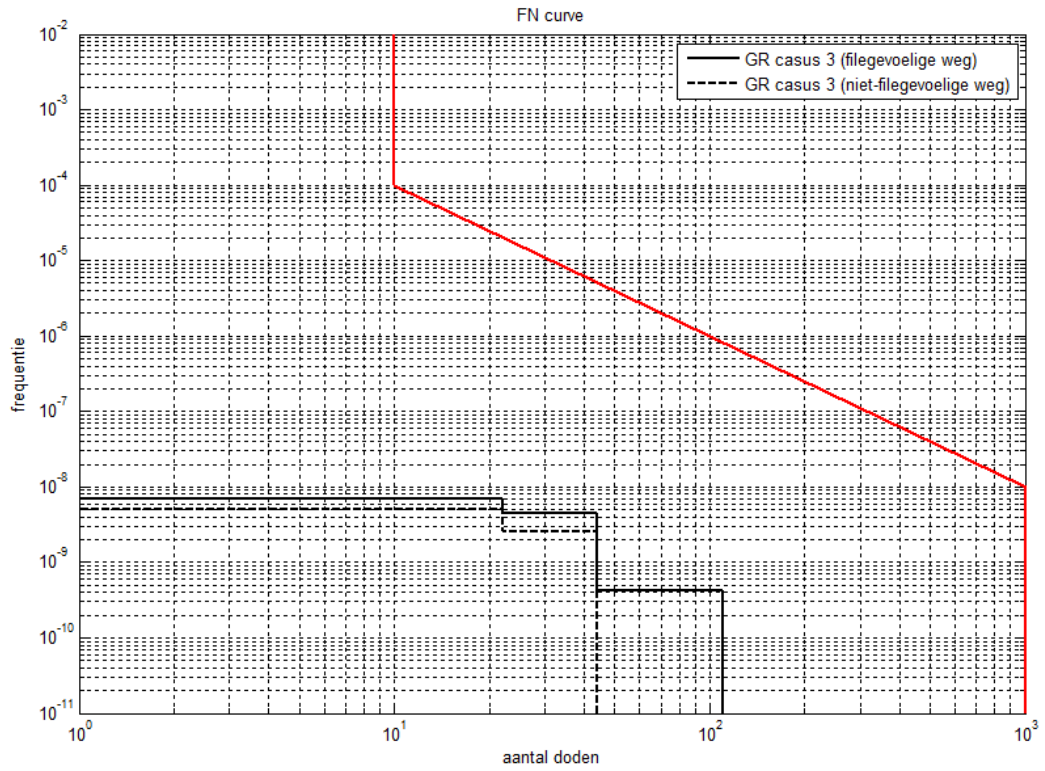
voor de 10 segmenten (zie figuur III.2.2).

Voor een niet-filegevoelige autosnelweg leidt dit tot volgende F,N-koppels

- $F = 12/24 \times 0,181 \times 2,8 \cdot 10^{-9}/j \times 10 = 2,5 \cdot 10^{-9}/j$ en $N = 44$,
- $F = 12/24 \times 0,181 \times 2,8 \cdot 10^{-9}/j \times 10 = 2,5 \cdot 10^{-9}/j$ en $N = 22$.

voor de 10 segmenten (zie figuur III.2.2).

Figuur III.2.2 Groepsrisico ten gevolge van een domino-effect van een windturbine op een ondergrondse leiding (casus 3)



III.3. Casus 4: industriële omgeving (stalen mast)

Figuur III.3.4 toont casus 4. Een windturbine W1 is ingeplant op een (minimale) afstand van 101 m van een ondergrondse leiding (blauwe volle lijn). De windturbine heeft een ashoogte van 99 m. De toren is volledig opgetrokken uit staal. De massa van het bovenste gedeelte mast (30 m), de gondel en de rotor bedraagt 190 ton en de SMYS van de ondergrondse leiding bedraagt 2410 bar, waardoor de impactafstand voor breuk 9 m bedraagt (gegeven $c = 700$ m/s).

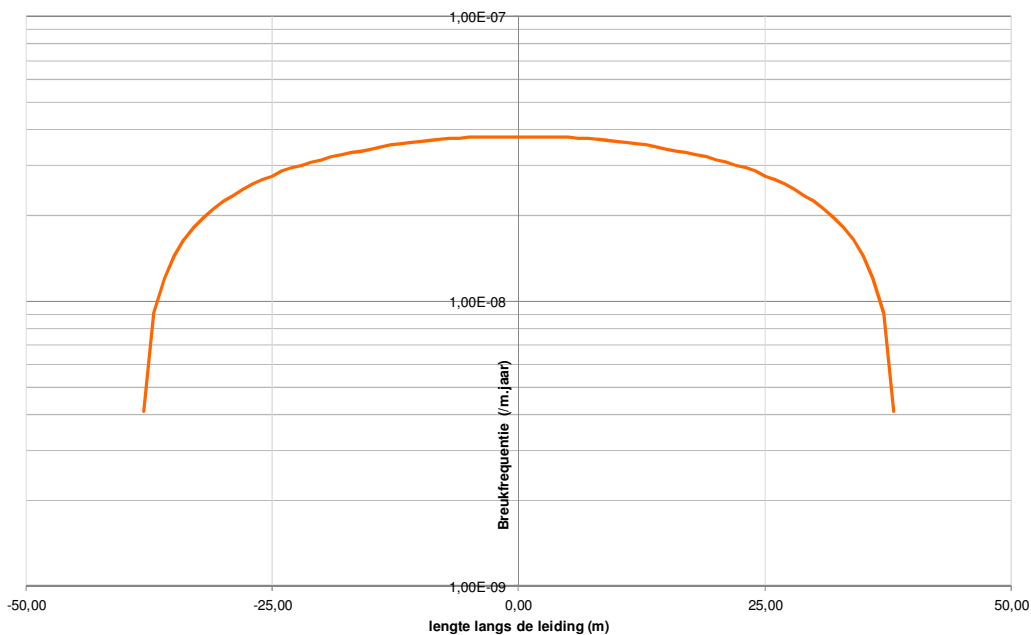
De ondergrondse leiding is een aardgasleiding van 600 mm diameter op een druk van 90 bar. In deze case wordt enkel rekening gehouden met 100% letaliteit (eerste zone van het breuk scenario). Rondom de inplantingslocatie bevinden zich enkele gebouwen (1,3,4,5,7 en 8).

POPULATIE IN GEBOUWEN – Voor deze gebouwen wordt volgende populatie beschouwd:

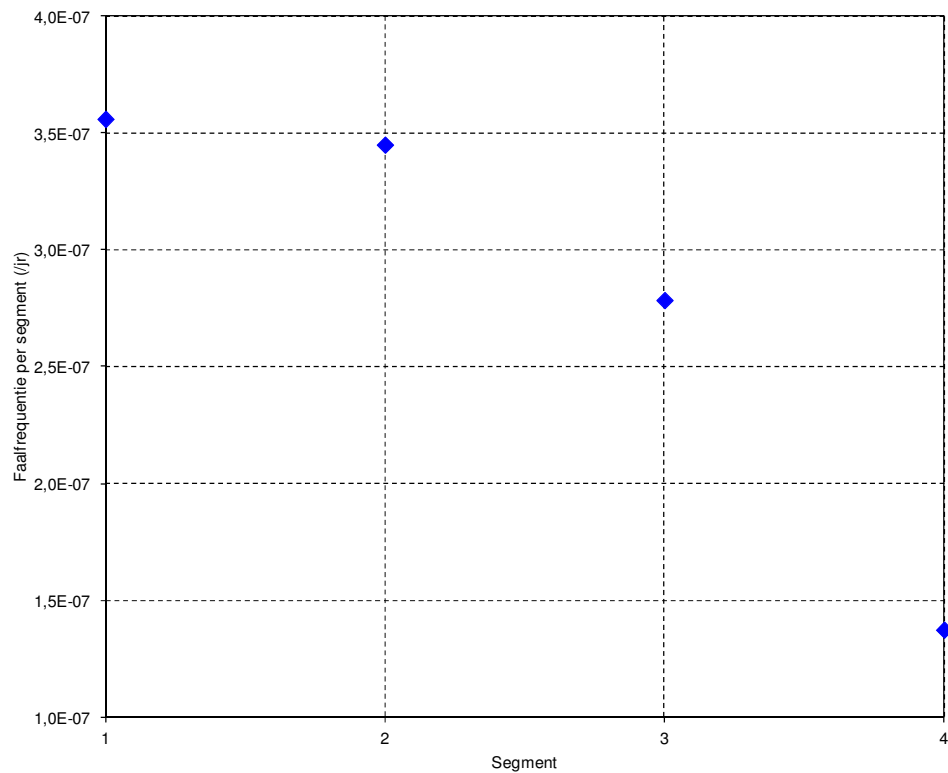
- ❑ *Locatie (1): 5 pers (dag)*
- ❑ *Locatie (3): 50 personen (dag)*
- ❑ *Locatie (4): 10 personen (dag)*
- ❑ *Locatie (5): 55 personen (dag)*
- ❑ *Locatie (7): 10 admin (overdag) + kantine : 1u dag (200 pers) / 1u dag (50 pers) / 2 u 's nachts (50 pers)*
- ❑ *Locatie (8): geen aanwezigheid*

FAALFREQUENTIEVERHOGING – Volgende figuur geeft de faalfrequentieverhoging langsheen de leiding weer.

Figuur III.3.1 Faalfrequentieverhoging langs de leiding



Figuur III.3.2 Faalfrequentieverhoging per segment



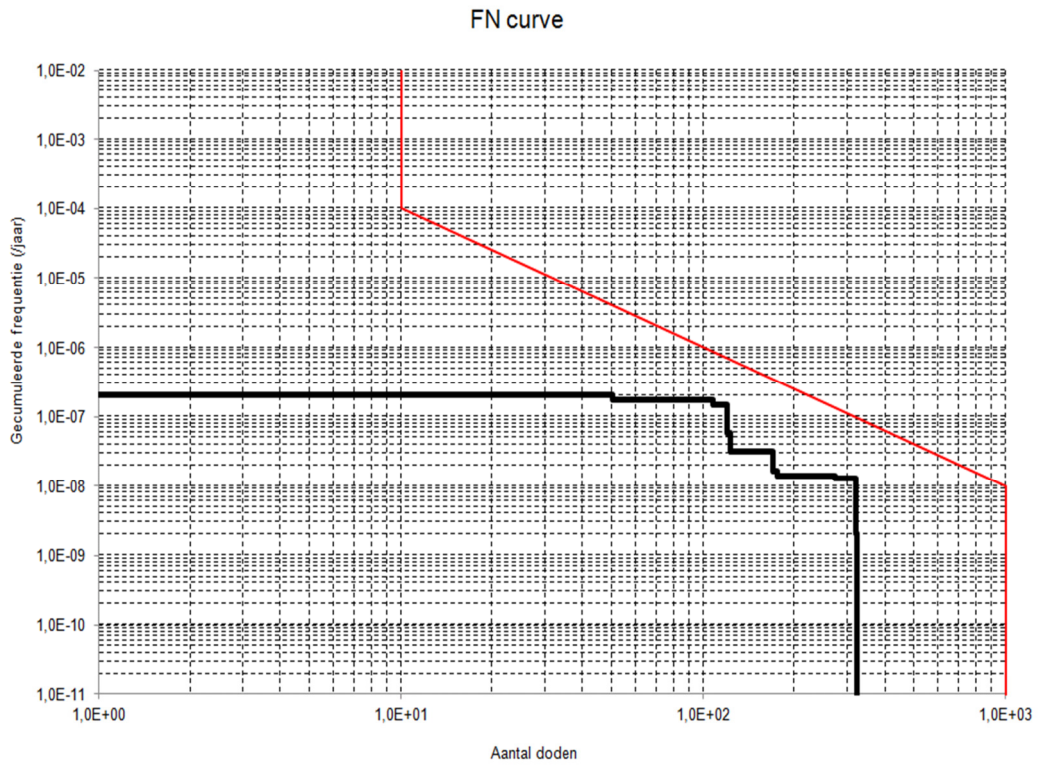
GROEPSRISICO – Dit leidt uiteindelijk tot volgende F,N-koppels

Combinatie van de aanwezigheidsfractie van de populatie en de ontstekingskans van aardgas bij breuk van de leiding leidt uiteindelijk tot de resultaten opgenomen in tabel III.3.1.

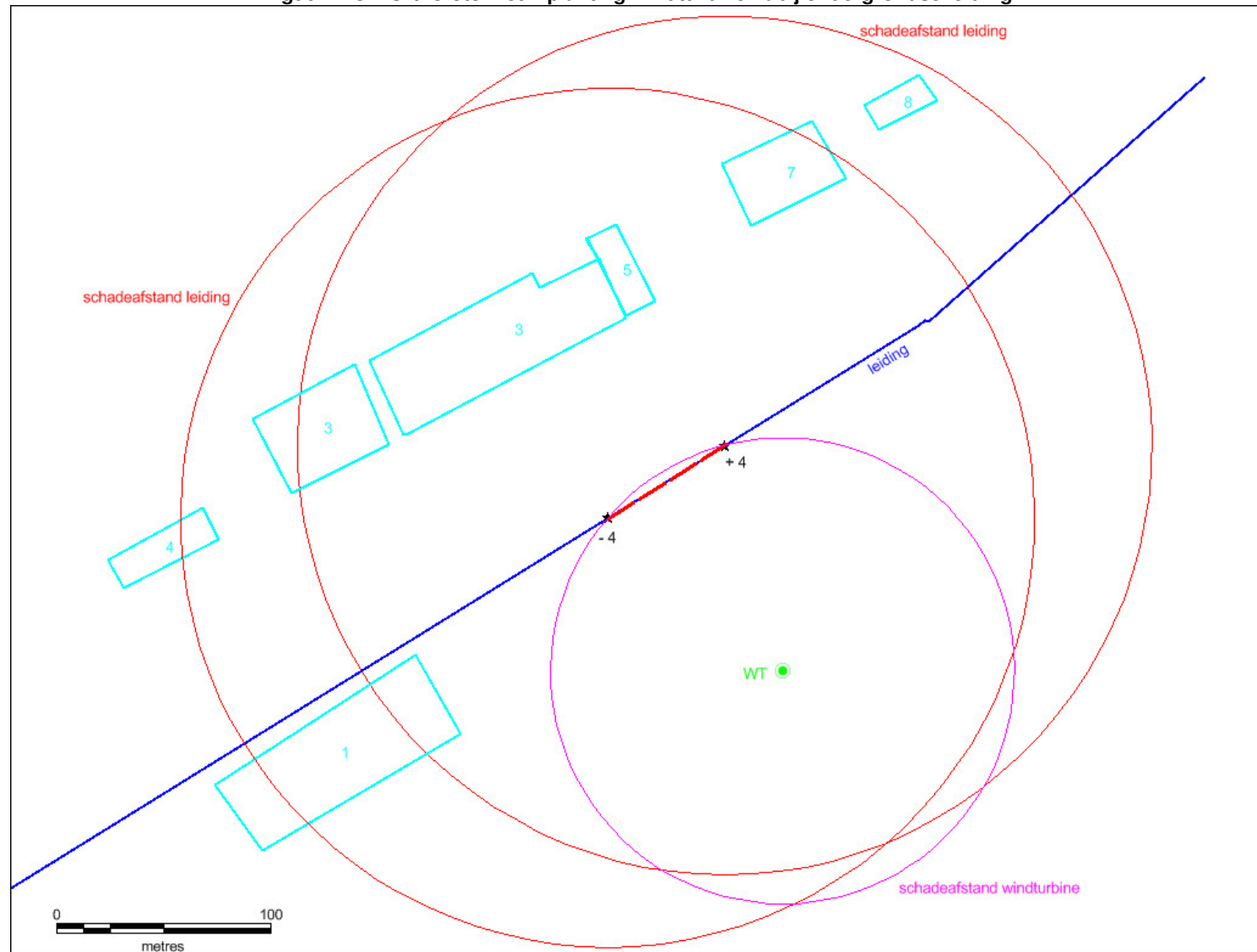
Tabel III.3.1 Groepsrisicoberekening casus 4

segmentnr. (10 m)	breukfrequentie van het segment agv impact (/jr)	dagfrequentie (/jr)	aantal slachtoffers dag	piekfrequentie 1 dag (/jr)	piekaantal 1 slachtoffers dag	piekfrequentie 2 dag (/jr)	piekaantal 2 slachtoffers dag	nachtfrequentie (/jr)	aantal slachtoffers nacht	piekfrequentie nacht (/jr)	piekaantal slachtoffers nacht
-4	1,37E-07	8,87E-09	122,5	1,04E-09	272,5	1,04E-09	160	1,19E-08	0	2,07E-09	37,5
-3	2,78E-07	1,80E-08	122,5	2,10E-09	322,5	2,10E-09	175	2,40E-08	0	4,20E-09	50
-2	3,45E-07	2,23E-08	120	2,60E-09	320	2,60E-09	170	2,98E-08	0	5,20E-09	50
-1	3,56E-07	2,30E-08	120	2,68E-09	320	2,68E-09	170	3,07E-08	0	5,37E-09	50
1	3,56E-07	2,30E-08	120	2,68E-09	320	2,68E-09	170	3,07E-08	0	5,37E-09	50
2	3,45E-07	2,23E-08	120	2,60E-09	320	2,60E-09	170	2,98E-08	0	5,20E-09	50
3	2,78E-07	1,80E-08	107,5	2,10E-09	320	2,10E-09	170	2,40E-08	0	4,20E-09	50
4	1,37E-07	8,87E-09	107,5	1,04E-09	320	1,04E-09	170	1,19E-08	0	2,07E-09	50

Figuur III.3.3 Groepsrisico ten gevolge van een domino-effect van een windturbine op een ondergrondse leiding (casus 4)



Figuur III.3.4 Orthofoto met inplanting windturbine nabij ondergrondse leiding



III.4. Casus 5: Generieke populatiedichtheden

In deze casus wordt voor een aantal type leidingen (300, 600, 900 mm aardgasleiding op 90 barg) en aantal typische populatiedichtheden het indirect risico berekend. In alle gevallen wordt rekening gehouden met volgende windturbine-eigenschappen:

- ❑ een ashoogte van 115 m;
- ❑ de massa van het bovenste gedeelte mast (30 m), de gondel en de rotor bedraagt 190 ton;
- ❑ de SMYS van de ondergrondse leiding bedraagt 2410 bar.

De impactafstand voor breuk bedraagt bijgevolg 9 m (gegeven $c = 700$ m/s).

POPULATIE – Zoals aangegeven wordt gebruik gemaakt van generieke populatiedichtheden:

- ❑ 5 personen /ha;
- ❑ 15 personen /ha;
- ❑ 40 personen /ha.

Bijkomend wordt een onderscheid gemaakt tussen de periode overdag (44% van een etmaal) en 's nachts (56% van een etmaal). In deze casus wordt industriegebied als voorbeeld gehanteerd. In dergelijke gebieden wordt algemeen verondersteld dat overdag 100% van de generieke populatiedichtheid aanwezig is, waarvan 80% binnen en 20% buiten. 's Nachts wordt verondersteld 10% van de populatie aanwezig te zijn, waarvan eveneens 80% binnen en 20% buiten.

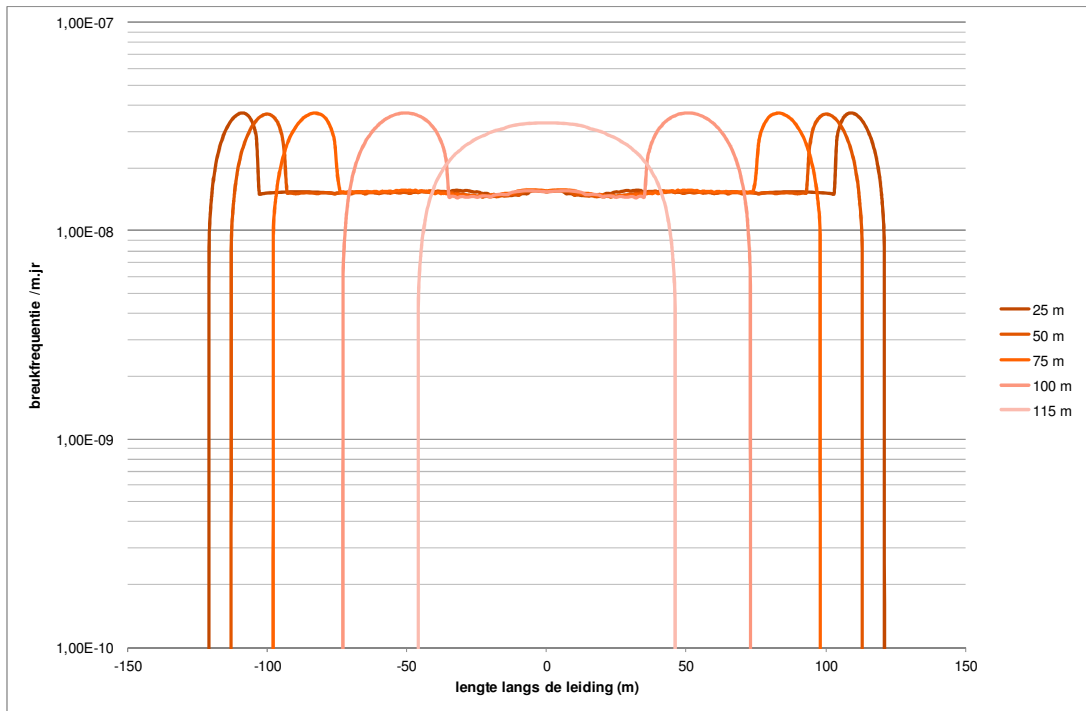
POTENTIEEL AANTAL DODEN – Uit het bovenstaande volgt dat de gevolgen in dit geval onafhankelijk zijn van het segment. Toegepast voor 3 verschillende leidingen met schadeafstanden (4 zones) uit LNE, 2014 betekent dit:

Tabel III.4.1 gevolgenanalyse casus 5

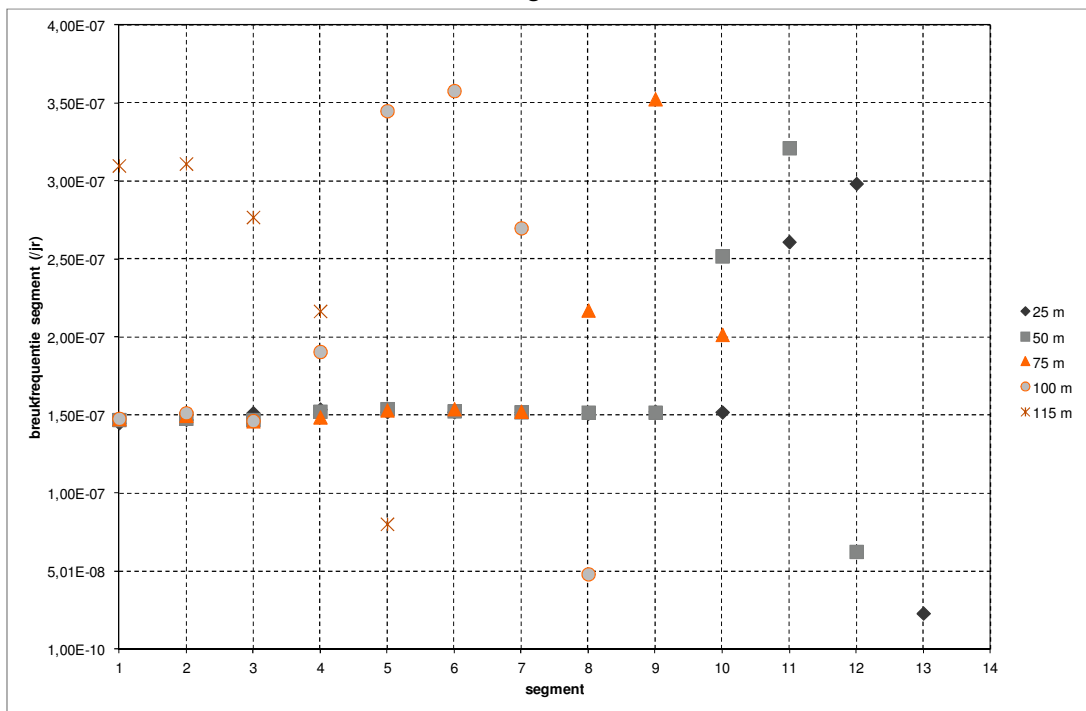
leiding	populatiedichtheid	aantal slachtoffers	
	pers/ha	dag	nacht
300 mm CH4 - 90 barg	5	11	1
	15	34	3
	40	90	9
600 mm CH4 - 90 barg	5	63	6
	15	190	19
	40	507	51
900 mm CH4 - 90 barg	5	152	15
	15	456	46
	40	1216	122

FAALFREQUENTIEVERHOGING – Volgende figuur geeft de faalfrequentieverhoging langsheen de leiding weer.

Figuur III.4.1 Faalfrequentieverhoging breuk langsheen de leiding voor stalen mast i.f.v. scheidingsafstand

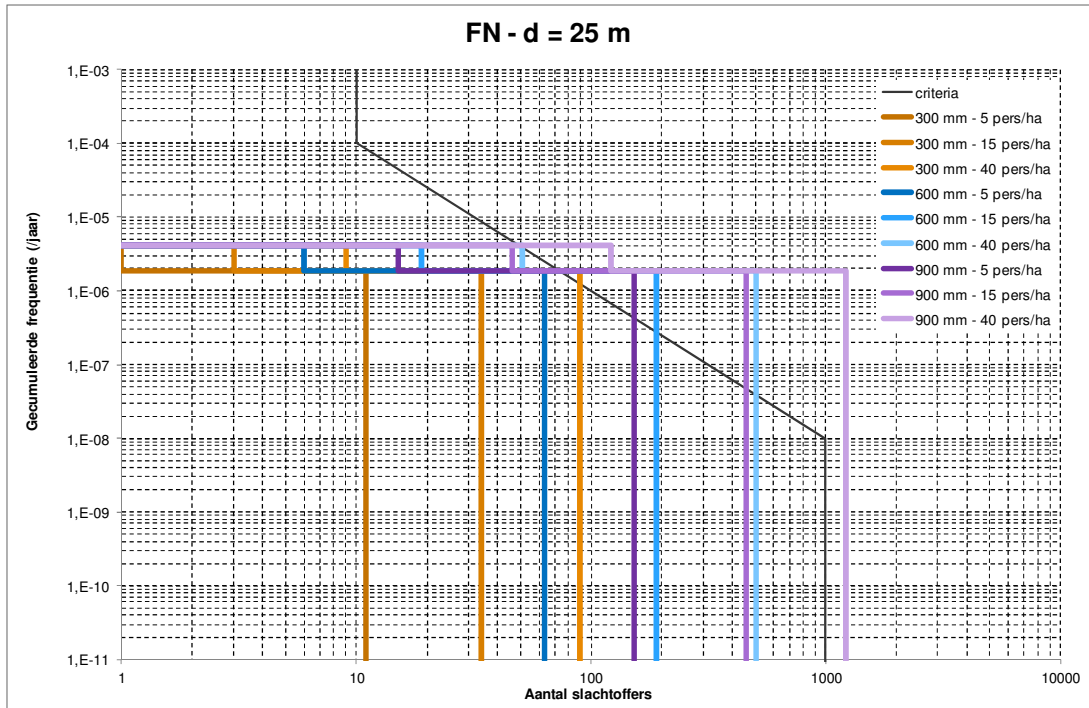


Figuur III.4.2 Faalfrequentieverhoging breuk leidingsegmenten voor stalen mast i.f.v. scheidingsafstand

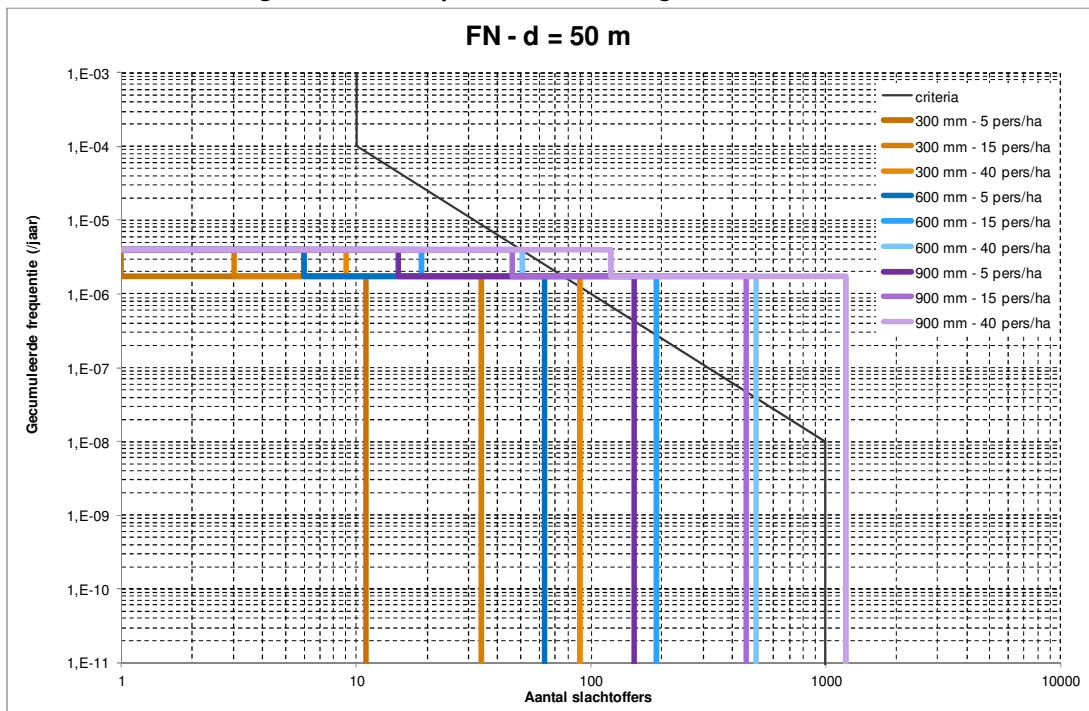


GROEPSRISICO – Volgende figuren geven de respectievelijke groepsrisicocurves weer.

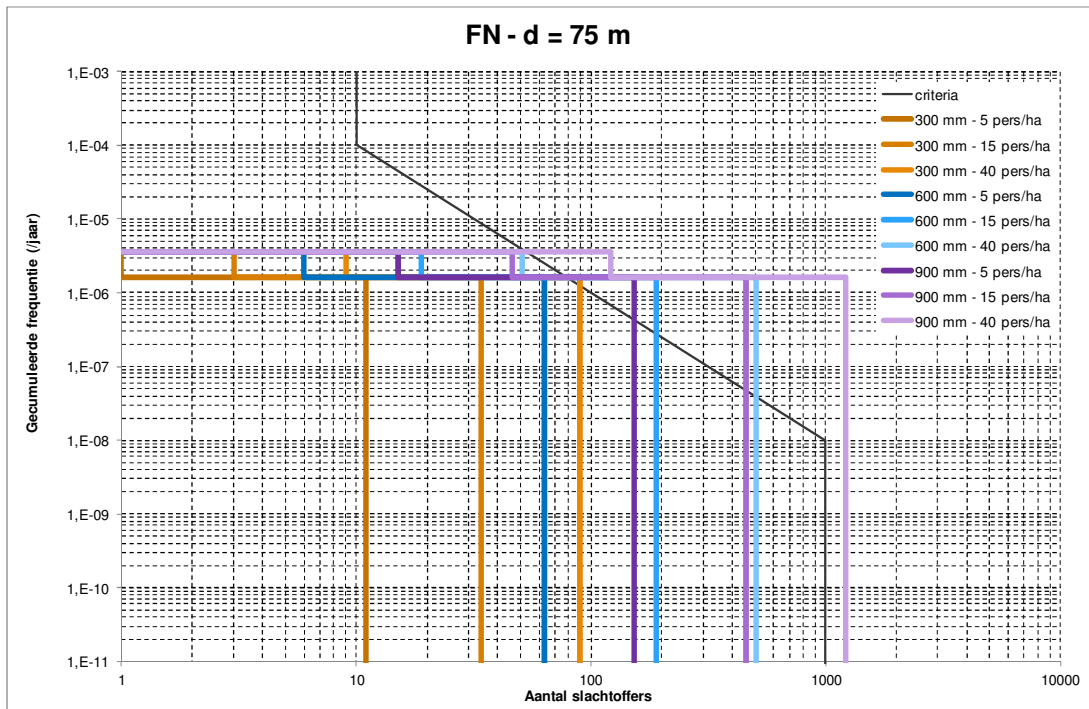
Figuur III.4.3 Groepsrisico – scheidingsafstand 25 m



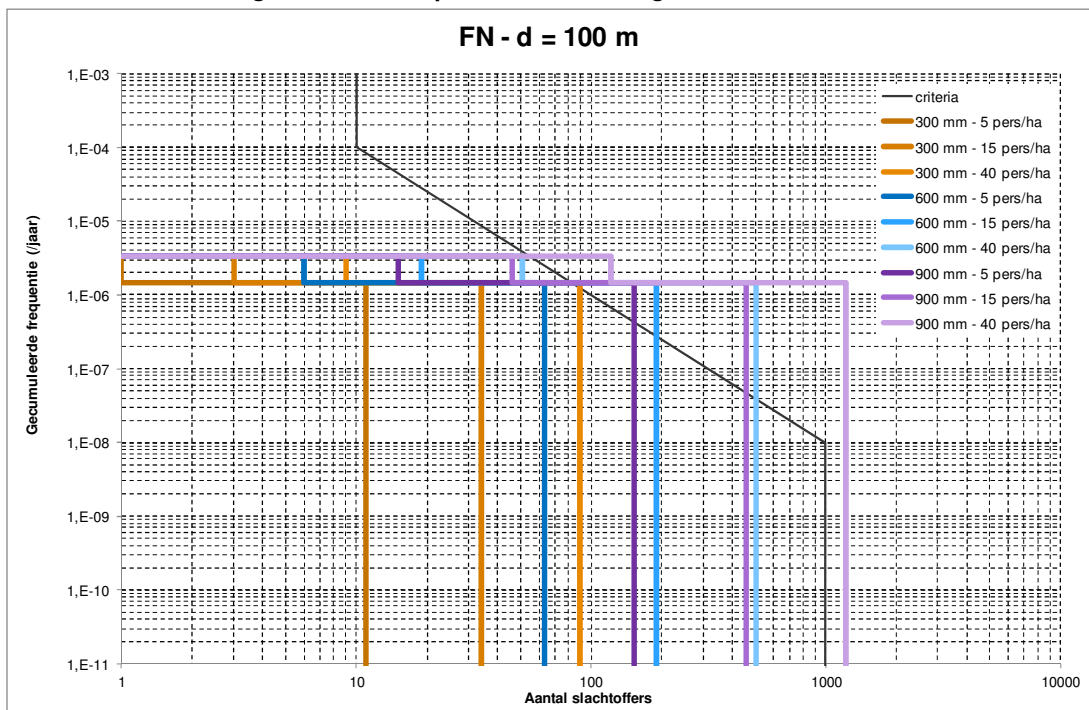
Figuur III.4.4 Groepsrisico – scheidingsafstand 50 m



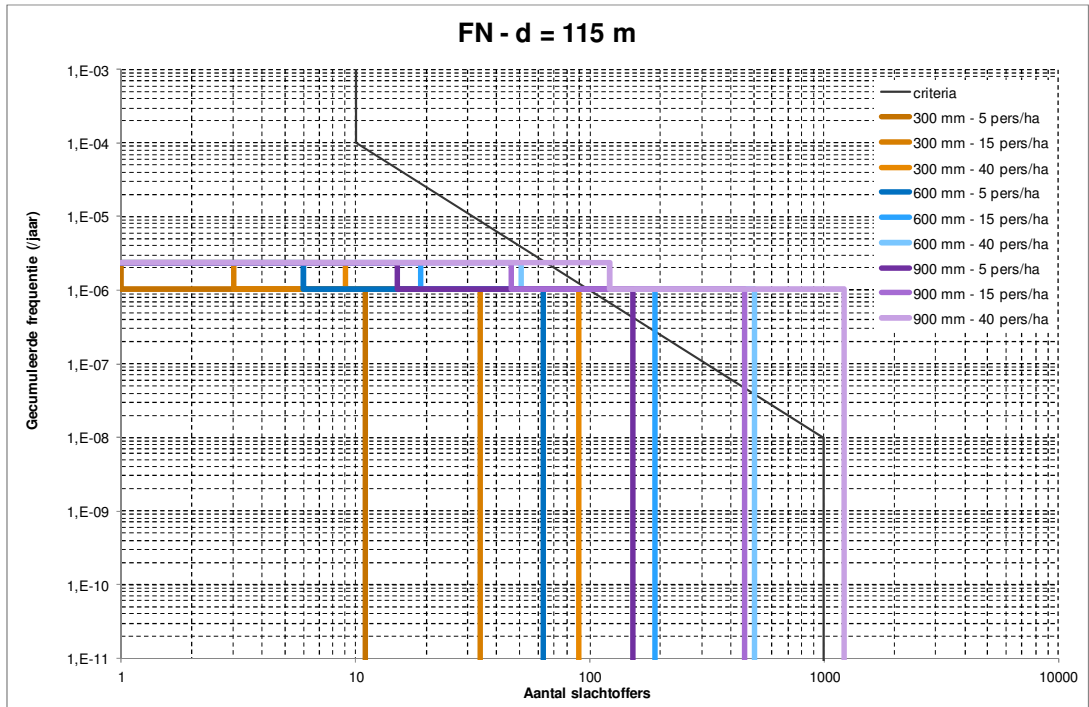
Figuur III.4.5 Groepsrisico – scheidingsafstand 75 m



Figuur III.4.6 Groepsrisico – scheidingsafstand 100 m



Figuur III.4.7 Groepsrisico – scheidingsafstand 115 m



IV. REFERENTIES

Agentschap NL (2013), Handboek Risicozonering Windturbines, 3e editie.

DNV KEMA (2012), Rekenmethodiek Zonering Windturbines.

Fernandez C., Bourgouin L., Riegert F. en Pecker A. (2012), Modelling of wind turbine fall-induced vibrations near buried steel transmission pipelines, an updated RAMCES software extension, Proceedings of the 2012 9th International Pipeline Conference, Calgary, Alberta, Canada.

LNE (2009), Handboek Faalfrequenties 2009.

LNE (2012), Standaard OVR, Hoofdstuk 5.

LNE (2014), Risicoanalysesysteem voor het transport van gevaarlijke stoffen: Leidraad.

LNE (n.d.), <http://www.lne.be/themas/veiligheidsrapportage>.

SenterNovem (2005), Handboek Risicozonering Windturbines, 2e editie.

VEA (2007), Studie Windturbines en Veiligheid.

VROM-inspectie (2007), Memo: Veiligheid van windturbines