

RAPPORT

Kwantitatieve Risico Analyse CO2-transport

Porthos CCS project

Klant: Porthos

Referentie: BF8260IBRP001F02

Status: Definitief/02

Datum: 19 juni 2020

HASKONINGDHV NEDERLAND B.V.

Laan 1914 no.35
3818 EX AMERSFOORT
Industry & Buildings
Trade register number: 56515154

+31 88 348 20 00 **T**
+31 33 463 36 52 **F**
info@rhdhv.com **E**
royalhaskoningdhv.com **W**

Titel document: Kwantitatieve Risico Analyse CO2-transport

Ondertitel: QRA
Referentie: BF8260IBRP001F02
Status: 02/Definitief
Datum: 19 juni 2020
Projectnaam: CCS Porthos
Projectnummer: BF8260

Classificatie

Projectgerelateerd



Behoudens andersluidende afspraken met de Opdrachtgever, mag niets uit dit document worden verveelvoudigd of openbaar gemaakt of worden gebruikt voor een ander doel dan waarvoor het document is vervaardigd. HaskoningDHV Nederland aanvaardt geen enkele verantwoordelijkheid of aansprakelijkheid voor dit document, anders dan jegens de Opdrachtgever.

Inhoud

1	Samenvatting	1
2	Inleiding tot het project	2
3	Wettelijk kader	3
3.1	Aanwijzing	3
3.2	Landelijk toetsingskader	3
3.2.1	Plaatsgebonden risico	3
3.2.2	Groepsrisico	3
4	Uitgangspunten	4
4.1	Beschouwde situatie	4
4.2	Probitrelatie	4
4.2.1	Achtergrond	4
4.3	Rekenmethodiek	4
4.4	Windstilte	5
4.4.1	Lage druk scenario	6
4.4.2	Secundaire lage snelheid scenario	6
4.5	Vrijkomen CO ₂ onder water	6
4.6	Modellering van het vrijkomen van dense phase CO ₂	7
4.6.1	Fysische eigenschappen CO ₂	7
4.6.2	Rekenmethodiek	8
5	Methode	9
5.1	Het beschouwde insluitsysteem	9
5.2	Parameters	10
5.3	Faalscenario's	10
5.3.1	Faalkansen leiding	10
5.3.2	Maatregelen	11
5.4	Modellering leiding	12
5.5	Faalfrequentie windturbines	12
5.6	Modellering windturbines	15
5.7	Modelparameters	15
5.7.1	Weerstation	16
5.7.2	Ruwheidslengte	16
5.7.3	Ontstekingsbronnen	16
5.7.4	Populatiegegevens	16

6	Resultaten	17
6.1	Plaatsgebonden risico	17
6.1.1	PR lage druk Tracé N-Az	17
6.1.2	PR hoge druk Tracé N-Az	20
6.1.3	PR Lage Druk Tracé N-Ed	21
6.1.4	PR Hoge Druk Tracé N-Ed	22
6.1.5	PR Lage Druk Tracé Z-Eu	23
6.1.6	PR Hoge Druk Tracé Z-Eu	25
6.1.7	PR Lage Druk Tracé Z-Ed	25
6.1.8	PR Hoge Druk Tracé Z-Ed	26
6.2	Groepsrisico	26
6.2.1	Groepsrisico alle tracés	26
7	Conclusie	27
7.1	Plaatsgebonden risico	27
7.2	Groepsrisico	27
8	Referenties	28

1 Samenvatting

Er is een risicoanalyse uitgevoerd voor het PORTHOS project. Dit project behelst het transporteren van CO₂ naar een offshore platform, waar het ondergronds zal worden opgeslagen. Dit rapport gaat in op de risicoanalyse rondom het CO₂-transport, vanaf het moment dat de CO₂ in de buisleiding ondergronds gaat tot het punt waarop de transportleiding offshore gaat. Voor de compressorstations is een separate risicoanalyse opgesteld.

De Nederlandse wetgeving stelt eisen aan de externe veiligheid van een CO₂ transportleiding. Deze zijn vastgelegd in het Besluit externe veiligheid buisleidingen (Bevb) en de bijbehorende Regeling externe veiligheid buisleidingen (Revb). Het risico van de transportleiding over land is berekend conform de eisen in deze Regeling. De resultaten van de berekening zijn getoetst aan de eisen zoals beschreven in het Bevb. Daar waar onzekerheid bestaat met betrekking tot de rekenmethodiek voor kwantitatieve risicoanalyses is uitgegaan van conservatieve uitgangspunten en aannames om deze onzekerheden te mitigeren.

Uit de berekeningen en analyses wordt het volgende geconcludeerd:

Plaatsgebonden Risico

De plaatsgebonden risico's van de landleidingen van de vier tracés zijn overal kleiner dan 10⁻⁶ per jaar. Ter hoogte van windturbines is een 10⁻⁶/jaar contour aanwezig met een afstand tot de leiding van circa 10 meter (maximaal 12,5 meter). Ter hoogte van de waterkruisingen zijn soms 10⁻⁶/jaar contouren aanwezig. Deze zijn veel kleiner dan 5 meter buiten de leiding.

Groepsrisico

Voor alle vier de tracés geldt dat het groepsrisico nihil is omdat het maximaal aantal slachtoffers dat wordt berekend kleiner is dan 10.

2 Inleiding tot het project

Dit rapport is geschreven in het kader van het MER voor het PORTHOS-project. Dit project behelst het transporteren van CO₂. Dit rapport gaat in op de risicoanalyse rondom het onshore CO₂-transport, vanaf het moment dat de buisleiding ondergronds gaat. In een separaat rapport is de risicoanalyse voor de compressorstations beschreven.

De buisleiding is getoetst aan de huidige regelgeving. Daar waar onzekerheid bestaat met betrekking tot de rekenmethodiek voor kwantitatieve risicoanalyses is uitgegaan van conservatieve uitgangspunten en aannames om deze onzekerheden te mitigeren.

De risicoanalyse is uitgevoerd met Safeti-NL conform de richtlijnen voor risicoanalyses. De bedrijfscondities van de buisleiding zijn gebaseerd op de ontwerp informatie zoals ontvangen vanuit het PORTHOS project (status: maart 2020).

3 Wettelijk kader

3.1 Aanwijzing

Op 1 januari 2011 zijn het Besluit externe veiligheid buisleidingen (Bevb) [7] en de bijbehorende Regeling externe veiligheid buisleidingen (Revb) [8] voor het eerst in werking getreden. Hierin wordt de veiligheid van personen in de nabijheid van ondergrondse transportleidingen geregeld. Op 1 juli 2014 is middels een wijziging van het Revb de aanwijzing van buisleidingen met CO₂ geregeld.

In het Bevb wordt beschreven dat het Besluit van toepassing is op het vervoer van stoffen door buisleidingen die behoren tot een in het Revb aangewezen categorie. Ook wordt beschreven dat het besluit niet van toepassing is op leidingen op het continentaal plat of in de territoriale zee van Nederland.

In het Revb wordt kooldioxide (CO₂) ingedeeld in de categorie specifieke stoffen en worden transportleidingen ten behoeve van het transport van “specifieke stoffen met een uitwendige diameter van 70 mm of meer of een binnendiameter van 50 mm of meer en een druk van 1.600 kPa of meer” aangewezen. Derhalve is het Bevb van toepassing op de CO₂ transportleiding.

3.2 Landelijk toetsingskader

3.2.1 Plaatsgebonden risico

In artikel 6 van het Bevb staat dat de plaatsgebonden risicocontour van $1 \cdot 10^{-6}$ per jaar (PR 10^{-6}) voor nieuwe leidingen ten hoogste vijf meter buiten het hart van de leiding mag liggen.

Offshore buisleidingen zijn niet opgenomen in regelgeving met betrekking tot externe veiligheid en worden derhalve niet in de berekeningen meegenomen. De veiligheid van deze buisleidingen wordt normaal alleen getoetst aan industrie-eigen veiligheidseisen in relatie tot de veiligheid van werknemers werkzaam offshore.

De risico's van de ondergrondse buisleidingen onshore zijn berekend in overeenstemming met de rekenmethodiek, bestaande uit de Handleiding Risicoberekeningen Bevb, versie nr. 3.1, uitgave 2020 [4].

3.2.2 Groepsrisico

Voor het groepsrisico is een zogenaamde oriëntatiewaarde gedefinieerd. Dit houdt in dat hier gemotiveerd van kan worden afgeweken. De oriëntatiewaarde heeft de functie van een ‘thermometer’ waarmee gevoel wordt verkregen over de relatieve omvang van het groepsrisico. Het is geen ‘harde’ norm. Aan het groepsrisico is daarnaast een verantwoordingsplicht verbonden. Dit is gebonden aan een verantwoordingsplicht. De verantwoordingsplicht is een verplichting voor het bevoegd gezag. In haar verantwoording weegt het bevoegd gezag een aantal zaken af waaronder de mate van bestrijdbaarheid van en de mate van zelfredzaamheid bij een incident. Het groepsrisico is onder andere afhankelijk van de personendichtheid in de omgeving. De dichtheid in het zogenaamde invloedsgebied is bepalend. Personen buiten het invloedsgebied tellen niet mee in het groepsrisico. Als zich geen personen (in objecten) in het invloedsgebied bevinden of als het maximaal aantal (gelijktijdige) slachtoffers kleiner is dan 10, is het groepsrisico nihil.

De oriëntatiewaarde voor het groepsrisico voor buisleidingen is (berekend over 1 kilometer leiding):

- De kans op een ongeval met 10 dodelijke slachtoffers is ten hoogste 10^{-4} per jaar;
- De kans op een ongeval met 100 dodelijke slachtoffers is ten hoogste 10^{-6} per jaar;
- De kans op een ongeval met 1.000 dodelijke slachtoffers is ten hoogste 10^{-8} per jaar.

4 Uitgangspunten

4.1 Beschouwde situatie

Het PR en GR worden berekend voor het hoge druk en het lage druk gedeelte van de transportleiding. De transportleiding wordt geopereerd op een lage druk (maximaal 35 barg) vanaf de aansluitingen van de diverse CO₂-leveranciers tot aan het compressorstation. Vanaf het compressorstation tot aan het offshore platform wordt de transportleiding op een hoge druk (maximaal 140 barg) bedreven.

4.2 Probitrelatie

4.2.1 Achtergrond

Om de gevolgen van blootstelling aan gevaarlijke stoffen te berekenen wordt gebruik gemaakt van een probitrelatie. De probitrelatie maakt het mogelijk om de letale effecten van een stof te berekenen door gebruik te maken van een drietal stofs specifieke constanten, de blootstellingsduur en concentratie waaraan iemand is blootgesteld. De generieke probitrelatie wordt weergegeven in onderstaande formule.

$$Pr = a + b \times \ln(C^n \times t)$$

Waarin:

Pr=Probitgetal

a, b en n = stofs specifieke constanten

C = concentratie [ppm]

t = [min]

De stofs specifieke constanten worden vastgesteld door de toetsgroep probitrelaties van het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieubeheer (RIVM). De probitrelaties die door de toetsingscommissie zijn geaccepteerd krijgen de status voorgesteld, na een consultatieronde wordt de status verhoogt naar interim waarna het ministerie van Infrastructuur en Milieu de probitrelatie uiteindelijk vaststelt op basis van een consequentie analyse. De Toetsingscommissie heeft tot op heden nog geen (interim) probitrelatie voor kooldioxide vastgesteld daar er naar hun inzicht nog essentiële omissies zijn in de daarvoor benodigde kennis en informatie.

Door de HSE (De Britse Health and Safety Executive; www.hse.gov.uk) is een probitrelatie voorgesteld. Deze probit wordt onderbouwd in: *Ridgeway, P., "Carbon dioxide Dangerous Toxic Load (DTL) assessment", Memo MH07-05, 5 June 2007, HSE, Bootle, UK [11]*.

De probitrelatie gebaseerd op het voorstel van de Britse HSE is:

$$Pr = -90,778 + 1,01 \times \ln(C^8 \times t)$$

De probitrelatie van HSE is gebruikt in deze QRA.

4.3 Rekenmethodiek

Voor het berekenen van de externe risico's van de CO₂ afvanginstallatie is, conform het Revi, gebruik gemaakt van Safeti-NL (specifiek versie 8.21).

4.4 Windstilte

CO₂ is als puur gas zwaarder dan lucht, daarom wordt in discussies over externe veiligheid veel aandacht besteed aan de mogelijkheid dat bij een lekkage CO₂ zich als een zware wolk kan verspreiden. Hierbij wordt ten onrechte aangenomen dat de verdunning van ontsnapt CO₂ uit de installatie vooral wordt gerealiseerd door wind en dat een dergelijk scenario in het bijzonder optreedt tijdens periodes van windstilte.

In werkelijkheid wordt de verdunning van CO₂ dat ontsnapt uit een onder druk staand systeem gerealiseerd door de optredende gasstroom (jet) zelf. Wind heeft slechts een minimale invloed op de verdunning bij de bron. Door de snel uitstromende gasstroom treedt zoveel turbulentie op dat deze turbulentie direct zorgdraagt voor verdunning van het CO₂ met de omgevingslucht naar veilige concentraties en naar concentraties waarbij het zich niet meer gedraagt als een zwaar gas. Dispersie berekeningsprogramma's zijn niet in staat berekeningen uit te voeren onder windstille condities. Bij Safeti-NL is dat beperkt tot een windsnelheid van 1,5 m/s. De windcondities zijn, bij het weerstation Hoek van Holland, 98,5% van de tijd op of boven deze waarde, gebaseerd op de KNMI weersgegevens van dit meetstation over de jaren 1962 tot en met 2006. Periodes van windstilte komen op deze locatie minder dan 0,8% van de tijd voor.

Deze beperking in de berekeningsmethodiek (windsnelheid niet lager dan 1,5 m/s) is niet specifiek voor CO₂. Dit geldt in het algemeen voor dispersieberekeningen welke worden uitgevoerd in risicoanalyses.

In Safeti-NL (versie 8.21 en eerdere versies) is de modellering van CO₂ aangepast aan de laatste inzichten en experimenten. Hierdoor ontstaat een zo juist mogelijke voorspelling van de dispersie van CO₂, ook bij lage windsnelheden.

CO₂ in zwaar gas condities ondervindt juist bij windstille condities ook dispersie ten gevolge van de zwaartekracht. In het geval dat CO₂ vanuit een bijna drukloos systeem ontsnapt en zich daardoor als een zwaar gas gedraagt, dan blijft deze wolk uitzakken en zich verspreiden als een steeds dunner wordende laag op vlakke ondergrond. CO₂ gedraagt zich daarbij zeer voorspelbaar. Risicovolle concentraties op één meter hoogte (leefniveau van personen) zijn dan uiteindelijk alleen te vinden bij horizontale uitstroming uit het gat/lek bij lage druk. Bij een uitstroming onder lage druk en windstil weer kan CO₂ zich ophopen in een laag gelegen gebied.

Het CO₂ in de leiding staat altijd onder druk, waardoor een ongehinderde uitstroming in eerste instantie als jet dispersie plaatsvindt. Gedurende de uitstroming neemt de druk in de leiding af en daarmee ook de drijvende kracht. Hierdoor neemt na verloop van tijd het uitstroomdebiet af en heeft een lagere uitstroomsnelheid, waardoor de uitstroming minder turbulent is en de verdunning minder. Dit effect wordt in de berekening meegenomen door verschillende uitstromingen over de tijdsduur van de uitstroming te modelleren.

In deze risicoanalyse is daarom specifieke aandacht besteed aan:

- 1 Scenario's waarbij CO₂ bij lage druk vrij kan komen en zich door dan door gebrek aan initiële vermenging zwaar kan gedragen.
- 2 Scenario's waarbij CO₂ vrijkomt onder het wateroppervlak en de uitstromingssnelheid van de CO₂ door het water wordt gereduceerd.

4.4.1 Lage druk scenario

De systemen onder (relatief) lage druk (aan het einde van de uitstroming) zijn als zodanig gemodelleerd. Leidingbreuk scenario's worden daarom gemodelleerd met het tijdsafhankelijke uitstroombelasting model met een onderverdeling in tien segmenten, waardoor ook het lage druk scenario aan het einde van de uitstroming wordt meegenomen.

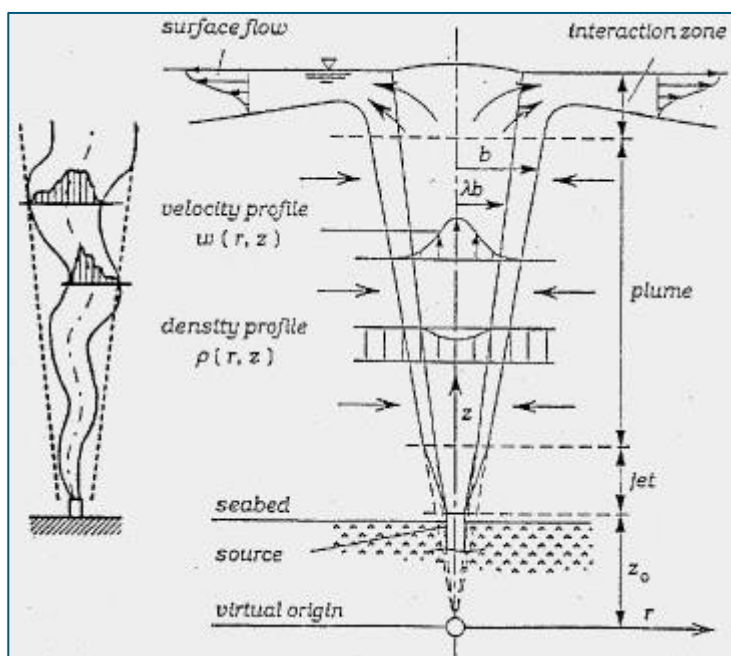
4.4.2 Secundaire lage snelheid scenario

De buisleiding wordt zal niet door civiele constructies zoals leidingtunnels aangelegd. Het secundaire lage snelheid scenario is daarom niet van toepassing. De kunstwerken ten behoeve van het kruisen van leidingen en transportwegen bestaan uit specifiek ontworpen buisleidingconstructies welke niet resulteren in een secundaire lage snelheid.

4.5 Vrijkomen CO₂ onder water

Indien het CO₂ vrijkomt onderwater, dan vormt zich een zogenaamde "bubble plume". Deze bubble plume reduceert de uitstromingssnelheid van het CO₂ en vermindert de jet-dispersie. Op basis van de richtlijnen van de "International Association of Oil and Gas Producers (OGP)" [9] voor het uitvoeren van risicoanalyses en het onderzoek van Petroleumtilsynet [10] voor Norpipe is in deze risicoanalyse uitgegaan van een doorsnede aan de wateroppervlakte van de bubble plume van 30% van de leidingdiepte.

De OGP richtlijn geeft 20% aan als bubble plume diameter voor gaslekken onder water. Omdat bij CO₂ echter lage uitstromingssnelheden in een groter effect resulteren, is besloten een conservatieve diameter van 30% te hanteren gebaseerd op een analyse van het onderzoek van Petroleumtilsynet.



Figuur 4-1. Bubble plume

Met de berekende uitstromingshoeveelheid en deze diameter is vervolgens de verticale uitstromingssnelheid bepaald van het CO₂ aan het wateroppervlak. De dichtheid van CO₂ welke hiervoor is gebruikt is bepaald op basis van de watertemperatuur. Er is aangenomen dat het CO₂ de temperatuur aanneemt van het water. Hiervoor is een gemiddelde temperatuur van 10 °C aangenomen.

Daarnaast kan een klein gedeelte van het CO₂ (circa 0,5%) in het water oplossen. Dit effect is niet relevant voor deze risicoanalyse.

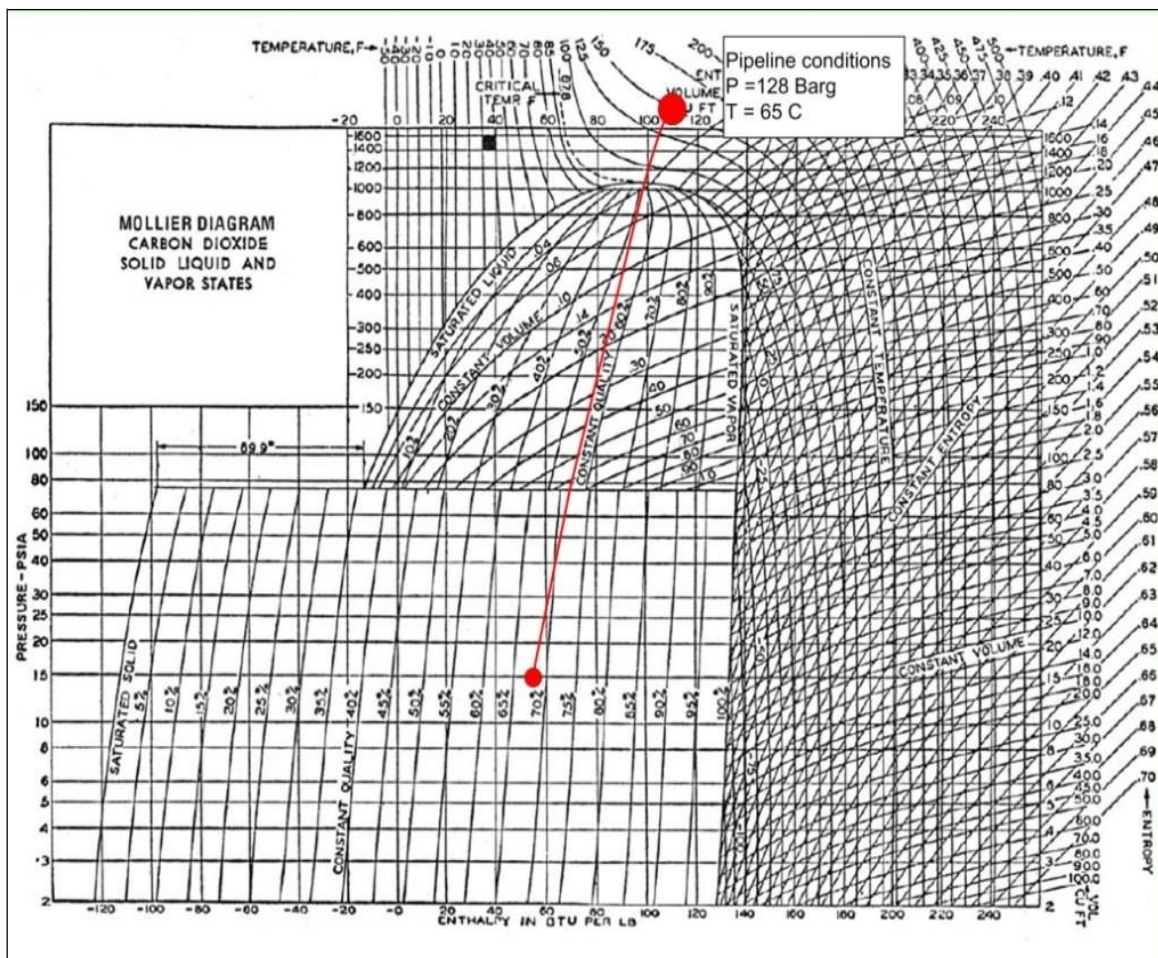
N.B. Deze berekening is uitgevoerd door de berekende uitstroming (zonder krater) om te zetten naar een zogenaamde "User Defined Source" (UDS). Deze UDS is vervolgens gewijzigd in een plas-bron. Door het opgeven van de plasdiameter wordt dan de verticale snelheid opnieuw berekend. Daarna is de UDS teruggezet naar een lek-bron, omdat Safeti-NL anders de berekende verticale snelheid niet meeneemt in de berekeningen.

4.6 Modellerings van het vrijkomen van dense phase CO₂

4.6.1 Fysische eigenschappen CO₂

CO₂ wordt initieel als gas getransporteerd van de CO₂ aanbieders tot aan het compressiestation. In het compressiestation wordt CO₂ verder gecompriëerd. Bij toenemende injectiedrukken komt het CO₂ uiteindelijk in het dense phase gebied, (bij drukken hoger dan 73,15 Bar(a) en een temperatuur hoger dan 31 °C is het gas dense phase en zijn er geen faseveranderingen van vloeistof naar gas).

Bij het vrijkomen van dense phase CO₂ door lekkage of volledig falen van de transportleiding komt een deel van het CO₂ in vaste vorm (droog ijs) vrij. Droog ijs sublimeert bij atmosferische druk. Wat betekent dat het vanuit de vaste fase direct naar gas overgaat zonder eerst vloeistof te vormen, waarbij warmte vanuit de omgeving moet worden toegevoerd. In Figuur 4-2 is in het Mollier diagram van CO₂ aangegeven hoe het CO₂ bij isentropische omstandigheden expandeert.



Figuur 4-2. Isentropische expansie van CO₂

4.6.2 Rekenmethodiek

Er is discussie over de nauwkeurigheid van dispersiemodellen bij CO₂ in dense phase condities. Door BP zijn in 2008 in samenwerking met DNV testen [12] uitgevoerd op de testlocatie Spadeadam in het Verenigd Koninkrijk om het gedrag van dense phase CO₂ te onderzoeken en de dispersie modellen te valideren. Uit deze dispersietesten bleek onder andere dat:

- Het uitregenen van droog ijs op de grond niet optrad. Het ijs dat tijdens de uitstroming van CO₂ wordt gevormd sublimeert tot gasvormig CO₂ voordat een horizontale jet de grond raakt. Door de afkoeling welke in de jet optreedt, condenseert wel het water in omgevingslucht welke door de jet is vermengd. Dit zorgt voor de zichtbare karakteristieke witte jet.
- Het modelleren van dense phase CO₂ als een gas zonder rekening te houden met de vorming van droog ijs resulteerde in onderschatting van de concentraties dichtbij de bron en overschatting van de concentraties in het verre veld.

De resultaten van deze testen zijn verwerkt in Safeti-NL 8.21 [6].

Bij een verticale uitstroming (van de modellering van een ondergrondse leiding) wordt geen uitregenen van vast CO₂ op de grond berekend. De beschreven testresultaten onderschrijven deze berekende resultaten. Hieruit wordt de conclusie getrokken, dat bij een verticale ongehinderde uitstroming van CO₂ vanuit een ondergrondse leiding het risico op de grond beperkt blijft tot een klein gebied rond de bron.

5 Methode

5.1 Het beschouwde insluitsysteem

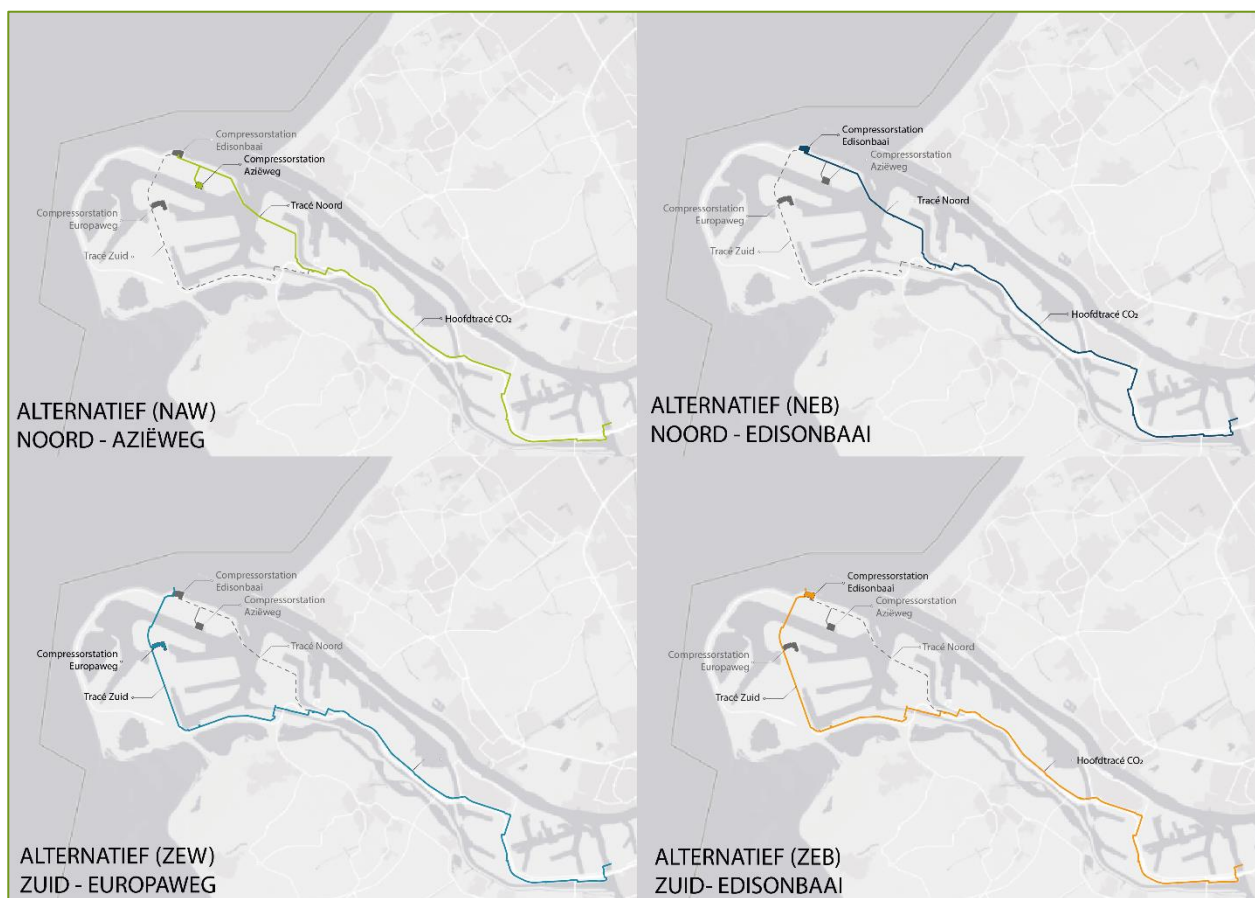
De leiding bestaat uit twee insluitsystemen:

- Van de afsluiter nabij de hoofdleiding van de capture-locatie(s) tot de afsluiter op de ingang van de compressielocatie.
- Vanaf de afsluiter op de uitgaande leiding van de compressorlocatie tot de afsluiter na de riser van platform P18. Alleen het onshore deel van de leiding is opgenomen in de risicoberekening.

Voor de routing van de leiding zijn vier varianten beschreven in het MER. Er is een zuidelijke variant en een noordelijke variant. Beide hebben twee mogelijke locaties voor het compressorstation.

- Tracé noord, met compressorstation bij de Aziëweg (de voorgenomen activiteit), afgekort als Alternatief N-Az (NAW);
- Tracé noord, met compressorstation bij de Edisonbaai, afgekort als N-Ed (NEB);
- Tracé zuid, met compressorstation bij de Europaweg, afgekort als Z-Eu (ZEW);
- Tracé zuid, met compressorstation bij de Edisonbaai, afgekort als Z-Ed (ZEB).

Figuur 5-1 geeft deze vier alternatieven ruimtelijk weer.



Figuur 5-1. Overzicht alternatieven

Vanaf de drie compressorstations loopt de hoge druk leiding naar de waterkering met de Maasgeul. Voor het MER zijn er twee mogelijke kruisingen van de Maasgeul. Voor deze QRA is uitgegaan van de meest waarschijnlijke variant: de westelijke Maasgeul kruising.

De vier tracés kennen verschillende wateronderdoorgangen, welke allen een verschillende waterdiepte hebben. In Tabel 1 is voor de verschillende tracés de waterdiepte aangegeven per onderdoorgang, bron: Havenmeester havenkaart Port of Rotterdam [1].

Tabel 1. Diepte onderwaterdoorgangen

Water	Diepte	Tracé N-Az	Tracé N-Ed	Tracé Z-Eu	Tracé Z-Ed
Oude maas	-10,2	X	X	X	X
Calandkanaal	-12,65	X	X	X	X
Dintelhaven	-5,7	X	X	X	X
Beerkanaal	-23,65	X	X	-	-
Hartelkanaal	-6,1	-	-	X	X
Yangtzekanaal	-19,65	-	-	X (hoge druk deel)	X

5.2 Parameters

De parameters van belang voor de risicoberekening worden voor alle varianten weergegeven in Tabel 2.

Tabel 2. Invoerparameters

Parameter	Groetheid	Waarde
		Lage druk (hoge druk)
Stof	[-]	CO ₂
Inwendige diameter leiding	[mm]	1035 (378)
Druk (operationeel)	[barg]	35 (140)
Temperatuur (operationeel)	[°C]	10 (35)
Debiet	[ton/uur]	360

In de QRA is aangenomen dat de operationele temperatuur van de CO₂ 10 °C is voor het lage druk deel en 35 °C is voor het hoge druk deel. De ontwerptemperatuur van de leiding is hoger (tot ca 50 °C), maar de grootste effecten worden verwacht bij een lagere temperatuur vanwege de hogere dichtheid van CO₂ onder die omstandigheden. Er is een controle berekening gemaakt voor uitstroming bij een hogere temperatuur, daar werden geen verschillen in berekende risico's gevonden.

5.3 Faalscenario's

5.3.1 Faalkansen leiding

De transportleiding ligt in de leidingstrook van de Gemeente Rotterdam. Ter hoogte van kruisingen van wegen en spoorlijnen wordt de leiding aangelegd in een kunstwerk.

In de onderstaande tabel zijn de faalscenario's weergegeven met de bijbehorende faalfrequentie uit de Handleiding Risicoberekeningen Bevb [4]. In de tabel is de standaard faalfrequentie gegeven en de faalfrequentie bij stand der techniek leidingen. Omdat de faalfrequentie afhankelijk is voor de diepteligging is ook de faalfrequentie voor stand der techniek leidingen op één en twee meter diepte opgenomen.

Voor de transportleiding worden de frequenties voor stand der techniek met een diepteligging van één meter gehanteerd. Voor de onderwaterdoorgangen worden de frequenties voor stand der techniek met een diepteligging van twee meter gehanteerd. De werkelijke gronddekking bij de wateronderdoorgangen is groter, maar in de berekeningen mag slechts met twee meter gronddekking worden gerekend.

Tabel 3. Faalscenario's transportleiding ondergronds en onder water

Scenario	Faalfrequentie [km ⁻¹ .jaar ⁻¹]			
	Standaard	Stand der techniek (SDT)	SDT met één meter diepteligging	SDT met twee meter diepteligging
Brek van de leiding	$1,5 \times 10^{-4}$	$3,7 \times 10^{-5}$	$3,1 \times 10^{-5}$	$2,0 \times 10^{-5}$
Lek, effectieve diameter van 10% van de nominale diameter, max 20 mm	$4,5 \times 10^{-4}$	$1,1 \times 10^{-4}$	$1,1 \times 10^{-4}$	$9,5 \times 10^{-5}$
Totaal	$6,0 \times 10^{-4}$	$1,5 \times 10^{-4}$	$1,4 \times 10^{-4}$	$1,1 \times 10^{-4}$

Er is één wegkruising (Clydeweg) waar de leiding bovengronds ligt op een open kunstwerk. Vanwege de locatie van dit kunstwerk is de basisoorzaak "External Interference" uitgesloten en wordt een lagere kans voor deze leiding gehanteerd.

Tabel 4. Faalscenario's transportleiding op kunstwerk (bovengrondse wegkruising)

Scenario	Faalfrequentie [km ⁻¹ .jaar ⁻¹]
	Stand der techniek (SDT)
Brek van de leiding	$1,93 \times 10^{-5}$
Lek, effectieve diameter van 10% van de nominale diameter, max 20 mm	$9,37 \times 10^{-5}$
Totaal	$1,13 \times 10^{-4}$

5.3.2 Maatregelen

De genoemde kansen op het ontstaan van een breuk of een lek kunnen verder worden gereduceerd met aanvullende maatregelen, zoals "in line inspectie". Deze maatregelen zijn in de QRA niet meegenomen, daarmee zijn de resultaten conservatief.

De uitstroming uit een breuk of een lek kan worden beperkt door het sluiten van afsluiters in de leiding. Hierdoor wordt voorkomen dat de gehele leiding leegloopt. In de leiding (alle varianten) zijn vier afsluiterstations aanwezig. Omdat detectie van breuk en lek nog niet bekend zijn in deze fase van het project, is deze effect beperkende maatregel niet in de berekeningen opgenomen.

5.4 Modelleringsleiding

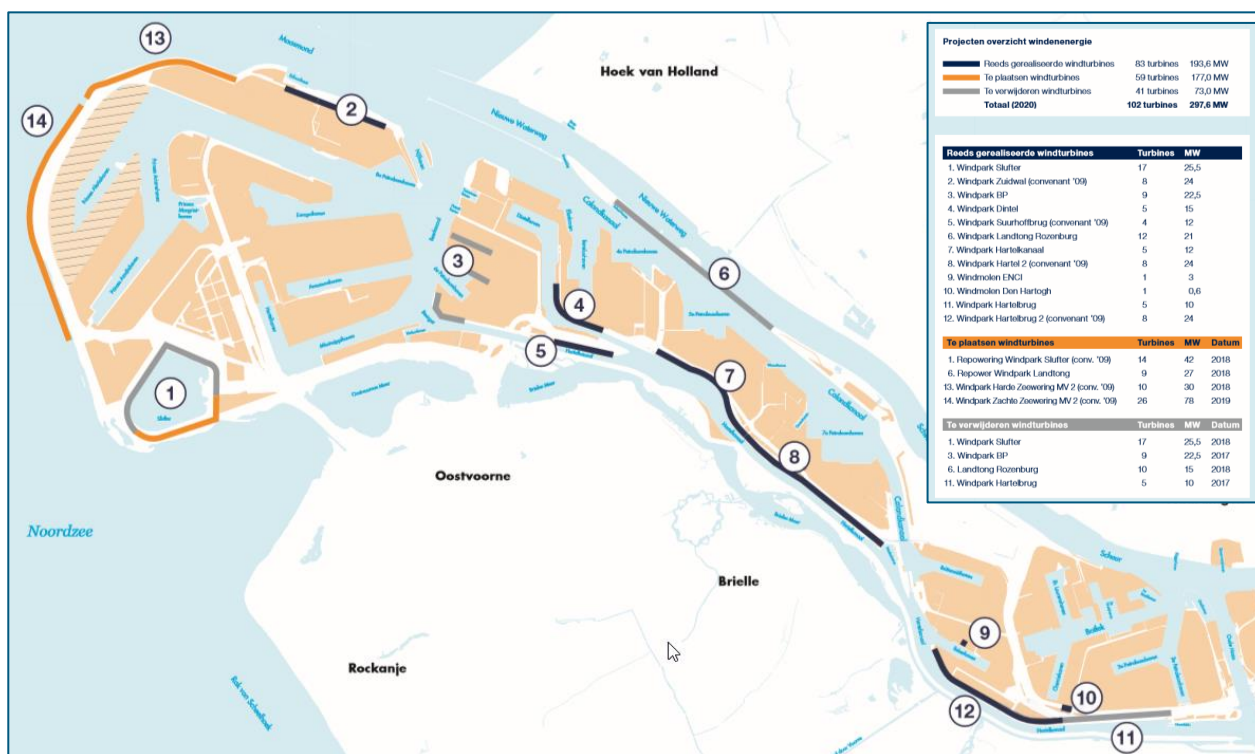
Onderstaande uitgangspunten zijn gehanteerd:

- De leiding is gemodelleerd als een “Long Pipeline” in Safeti-NL 8.21.
- Hierbij is het tracé ingevoerd, de druk en temperatuur, het debiet, de diepteligging, etc.
- Bij de berekeningen is het kratermodel gebruikt. Hierbij is een gronddekking gebruikt van gemengd zand en klei.
- Er is gebruik gemaakt van tijdsafhankelijke uitstroming met tien tijdsegmenten om ook de effecten van uitstroming bij lage druk aan het einde van de uitstroming mee te nemen in de berekening.
- Voor leidingbreuk is gebruik gemaakt van tweezijdige uitstroming in een krater (verticale uitstroming) met een (default) breuklengte van 12 meter.
- Voor het lek is een 20 mm gat gemodelleerd met het kater model, verticale uitstroming en “puncture at the top”.
- Voor de boringen onder de waterwegen moet een andere modellering (kans, bubble plume) worden gehanteerd. Dit is helaas niet mogelijk binnen het long pipeline model in Safeti-NL. Daarom zijn bij het passeren van de waterwegen additionele scenario's gemodelleerd.

Steeds is ter hoogte van de waterkruising de (tijdsafhankelijke) uitstroming bepaald, waarbij geen luchtinmenging is meegenomen (geen krater model). Deze uitstroming is omgezet naar een “User Defined Source” (UDS). Deze UDS is vervolgens omgezet naar een plas-bron. Daarna is de bubble plume verwerkt door de “plasdiameter” in te voeren. Hiermee berekent Safeti-NL de juiste verticale snelheid. Vervolgens is de UDS weer teruggezet naar een lek-bron.

5.5 Faalfrequentie windturbines

In de Handleiding Risicoberekeningen Bevb [4] wordt in paragraaf 3.3.4 van module D aangegeven dat de faalfrequentieverhoging door in de omgeving aanwezige windturbines nog in rekening moet worden gebracht. In de onderstaande figuur 5-2 is de locatie van windturbines in de Rotterdamse haven in beeld gebracht, bron: factsheet port of Rotterdam: De kracht van windenergie [2].



Figuur 5-2. Windenergie overzicht Port of Rotterdam

In het onderstaande tabel 5 zijn de windturbines weergegeven die dicht genoeg langs de leiding liggen om een risico verhogend effect op de transportleiding te kunnen hebben. De afstand tot de leiding is gegeven voor alle tracés. Als voor de tracés een verschillende afstand gelden dan is dat vermeld. Bij een afstand meer dan 500 meter is deze niet nauwkeurig in kaart gebracht omdat de afstand in dat geval niet relevant meer is.

Tabel 5. Windturbines in de omgeving van de leiding

Nr	Windpark	Turbine	Vermogen	Hoogte	Rotordiameter	Afstand tot leiding
[-]	[-]	[-]	[MW]	[m]	[m]	[m]
1	Den Hartog	Den Hartog	0,6	65	44	207
2	Hartelbrug 2	XL Wind 1	3	99	101	98
3	Hartelbrug 2	XL Wind 2	3	99	101	236
4	Hartelbrug 2	XL Wind 3	3	99	101	427
5	Hartelbrug 2	XL Wind 4	3	99	101	> 500
6	Hartel 2	Greenchoice Vindur	3	110	90	325
7	Hartel 2	Greenchoice Umoya	3	110	90	262
8	Hartel 2	Greenchoice Vjetar	3	110	90	224
9	Hartel 2	Greenchoice Tuuli	3	110	90	138
10	Hartel 2	Greenchoice Vind	3	110	90	150
11	Hartel 2	Greenchoice Viento	3	110	90	155
12	Hartel 2	Greenchoice Ventus	3	110	90	203
13	Hartel 2	Greenchoice Rüzgar	3	110	90	203
14	Hartelkanaal	Hartelkanaal 9	2.5	80	80	266
15	Hartelkanaal	Hartelkanaal 8	2.5	80	80	245
16	Hartelkanaal	Hartelkanaal 7	2.5	80	80	132
17	Hartelkanaal	Hartelkanaal 2	2.5	80	80	109
18	Hartelkanaal	Hartelkanaal 1	2.5	80	80	118
19	Schuurhoffbrug	Schuurhoffbrug 4	3	98	82	366
20	Schuurhoffbrug	Schuurhoffbrug 3	3	98	82	182
21	Schuurhoffbrug	Schuurhoffbrug 2	3	98	82	164
22	Schuurhoffbrug	Schuurhoffbrug 1	3	98	82	234 (tracé Noord) 118 (tracé 2Zuid)
23	Dintel	Dintelhaven 1	3	105	90	144
24	Dintel	Dintelhaven 2	3	105	90	264
25	Dintel	Dintelhaven 3	3	105	90	308

Nr	Windpark	Turbine	Vermogen	Hoogte	Rotordiameter	Afstand tot leiding
26	Dintel	Dintelhaven 4	3	105	90	375 (tracé Noord) >500 (tracé Zuid)
27	Dintel	Dintelhaven 5	3	105	90	417 (tracé Noord) >500 (tracé Zuid)
28	Zuidwal	Zuidwal 5	3	80	90	124 (tracé Noord) >500 (tracé Zuid)
29	Zuidwal	Zuidwal 4	3	80	90	142 (tracé Noord) >500 (tracé Zuid)
30	Zuidwal	Zuidwal 3	3	80	90	165 (tracé Noord) >500 (tracé Zuid)
31	Zuidwal	Zuidwal 2	3	80	90	159 (tracé Noord) >500 (tracé Zuid)
32	Zuidwal	Zuidwal 1	3	80	90	147 (tracé Noord) >500 (tracé Zuid)
33	Maasmond	Maasmond 3	3	80	90	110 (tracé Noord) >500 (tracé Zuid)
34	Maasmond	Maasmond 2	3	80	90	102 (tracé Noord) >500 (tracé Zuid)
35	Maasmond	Maasmond 1	3	80	90	102 (tracé Noord) 495 (tracé Zuid)
36	Eneco	HZ-01	3	76	120	65

De Handleiding Risicoberekeningen Bevb geeft aan dat het toegevoegde risico door de windturbines kan worden berekend met het handboek risicozonering windturbines [5]. Dit handboek kent vier faalscenario's voor windturbines:

- Gondelbreuk.
- Mastbreuk.
- Bladbreuk bij nominaal toerental.
- Bladbreuk bij overtoeren (2x nominaal toerental).

Het scenario gondelbreuk heeft voor de hier onderzochte tracés geen invloed op de faalfrequentie van de ondergrondse transportleiding, omdat de afstand tot de leiding overal voldoende groot is.

Het scenario mastbreuk kan schade aan de ondergrondse transportleiding veroorzaken. Bij een omvallende mast komt deze met een grote impact op de grond terecht. Door de resulterende schokgolf kan de leiding breken. De hoek waarbij de tiphoogte net aan de leiding raakt bepaalt de toegevoegde faalfrequentie. Deze additionele faalfrequentie wordt verdeeld over de betrokken leidinglengte.

Het scenario bladbreuk bij nominaal toerental resulteert in een blad dat over een afstand van de windturbine weggegooid wordt. Bij het neerkomen van het blad veroorzaakt deze een schokgolf waardoor de leiding kan breken. De zogenaamde penetratiediepte van de schokgolf is de afstand die een schokgolf door de grond kan afleggen waarbij het nog een breuk kan veroorzaken. Deze afstand is afhankelijk van de impactenergie van het blad en van de leidingeigenschappen. Met deze afstand en met de eigenschappen van de leiding kan de kritische strook worden bepaald, dit is het gebied boven de leiding waar een treffer van het blad resulteert in een leidingbreuk. Voor Porthos is de breedte van de kritische strook bepaald op basis van een turbineblad met een gewicht van 15 ton (25 ton voor de turbine HZ-01). De trefkans is afhankelijk van de afstand tussen de turbine en de leiding. Conservatief is steeds gerekend met de maximale kans. Voor nominaal toeren is deze gelijk aan 4×10^{-8} per m². Hiermee is de toegevoegde faalfrequentie in de orde van grootte van 10^{-7} per meter binnen de nominaal toeren werpafstand. Deze invloed is meer dan 10% van de frequentie van leidingbreuk door andere oorzaken. Deze effecten zijn daarom in de berekeningen opgenomen.

De toegevoegde faalfrequentie ten gevolge van het scenario bladbreuk bij overtoeren wordt op vergelijkbare manier als het scenario bladbreuk voor nominaal toerental bepaald en is in de orde grootte 10^{-11} per meter. Deze invloed is minder dan 10% van de frequentie van leidingbreuk door andere oorzaken. Deze bijdrage is dan ook verwaarloosd.

5.6 Modelleren windturbines

De additionele scenario's door het falen van windturbines is op een vergelijkbare manier als de wateronderdoorgangen gemodelleerd. Op basis van de uitstroming ter plekke van de windturbine is een UDS gecreëerd (nu wel met krater model en initiële luchtinmenging). Deze UDS is op een route geplaatst met de additionele kans op leidingbreuk.

5.7 Modelparameters

Voor de berekeningen is gebruik gemaakt van Safeti-NL versie 8.21. In deze paragraaf worden de modelparameters, die van belang zijn voor de resultaten beschreven.

5.7.1 Weerstation

Voor de berekeningen is het dichtstbijzijnde representatieve weerstation Hoek van Holland gebruikt.

5.7.2 Ruwheidslengte

Het is niet goed mogelijk om een representatieve ruwheidslengte te kiezen voor het gehele gebied waarover de leidingen zich bevinden. Daarvoor is het gebied te groot. Er is daarom gekozen voor een relatief lage ruwheidslengte omdat dat over het algemeen conservatief is voor toxische verspreiding. Voor de berekeningen is een ruwheidslengte van 100 mm gebruikt. Dit is gelijk aan de studie die voor ROAD is gedaan. Deze ruwheidslengte is representatief voor een terrein met lage gewassen en hier en daar grote obstakels.

5.7.3 Ontstekingsbronnen

De transportleiding transporteert onbrandbaar CO₂. Er zijn daarom geen ontstekingsbronnen gemodelleerd.

5.7.4 Populatiedata

Voor de populatie in de omgeving van de leiding is de populatiedata uit het BAG populatieservice [3] gebruikt. Binnen het invloedsgebied van de leiding is de populatie geïnventariseerd en ingevoerd in het rekenmodel.

6 Resultaten

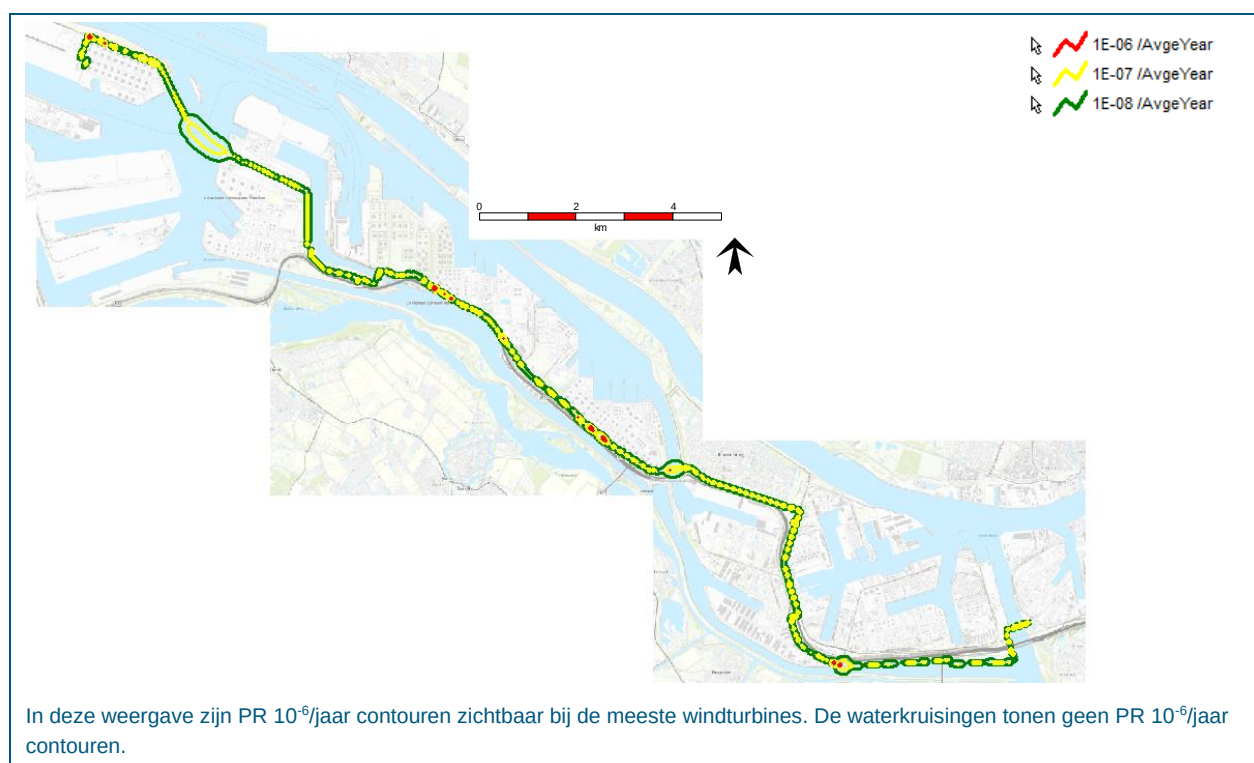
6.1 Plaatsgebonden risico

Het plaatsgebonden risico (PR) is de kans per jaar op een dodelijk ongeval ten gevolge van een ongewoon voorval (ongevalsscenario) indien een persoon (onbeschermd in de buitenlucht) zich bevindt op een bepaalde plaats waar hij voortdurend (24 uur per dag en gedurende het gehele jaar) wordt blootgesteld aan de schadelijke gevolgen van een voorval. Het PR wordt weergegeven in de vorm van PR-contouren. Hierbij geven de contouren locaties met gelijke kansen op overlijden weer. Zo toont de PR-contour van 10^{-6} per jaar de locaties waar de kans op het overlijden van een persoon eens in de miljoen jaar bedraagt. Het PR is onafhankelijk van de bevolkingsverdeling in de omgeving van de inrichting.

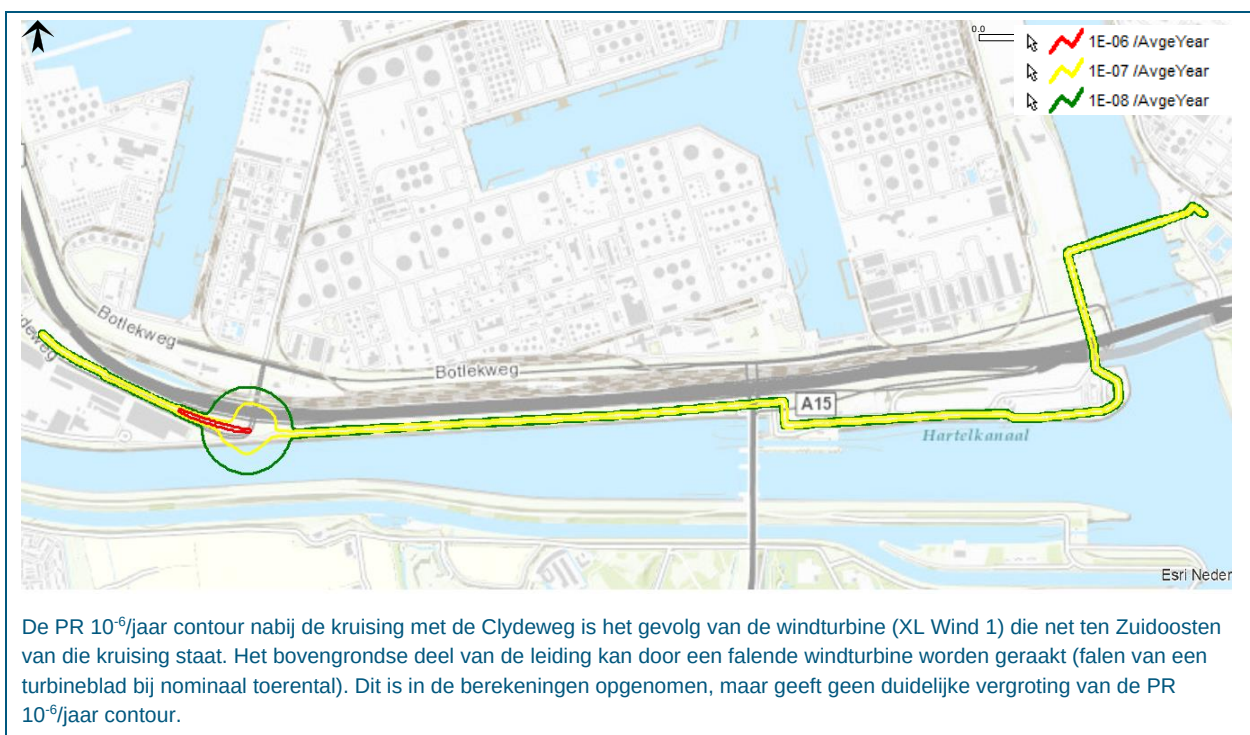
6.1.1 PR lage druk Tracé N-Az

Resultaten

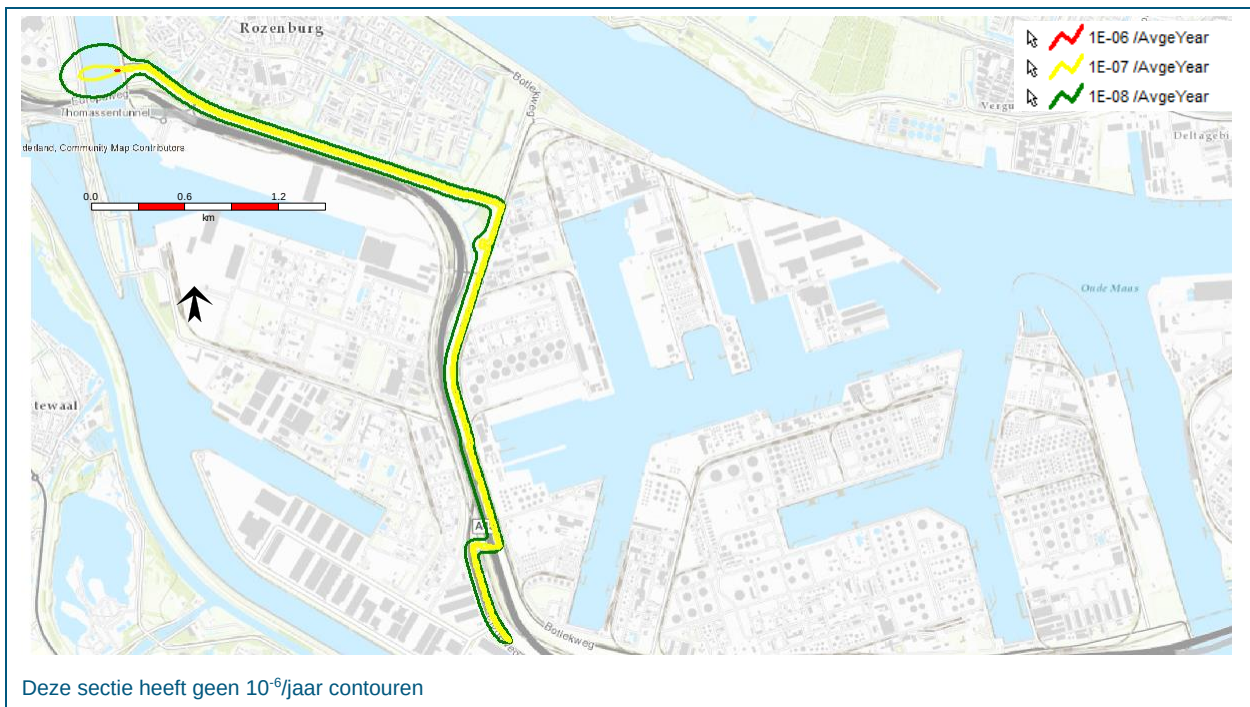
In de onderstaande figuren is het PR van het lage druk tracé N-Az weergegeven. *Figuur 6-1* toont de PR-contouren waarbij het gehele leidingtracé in één keer is beschouwd in Safeti-NL. Vanwege de grootte van het gebied rekent Safeti-NL met een grof rekgid, daarom is aanvullend het tracé onderverdeeld in vijf secties (van oost naar west) van elke ongeveer zes kilometer. De resultaten hiervan zijn opgenomen in *Figuur 6-2* tot en met *Figuur 6-6*.



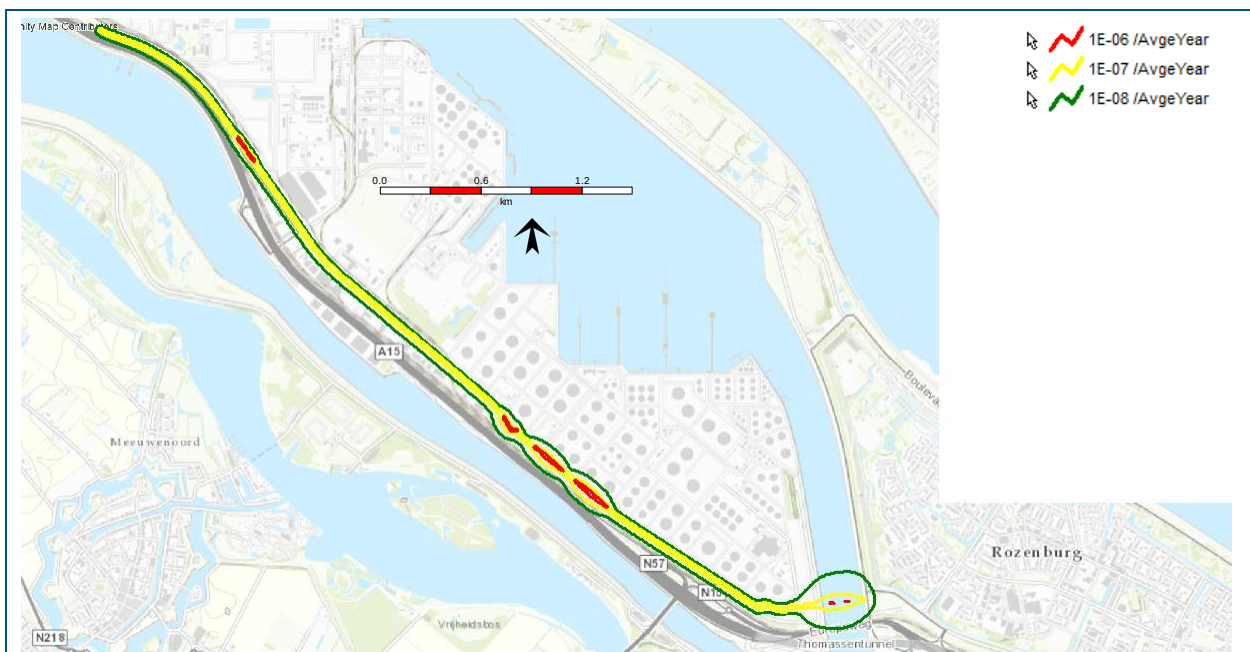
Figuur 6-1. Tracé N-Az lage druk; geheel



Figuur 6-2. Tracé N-Az lage druk; sectie 1

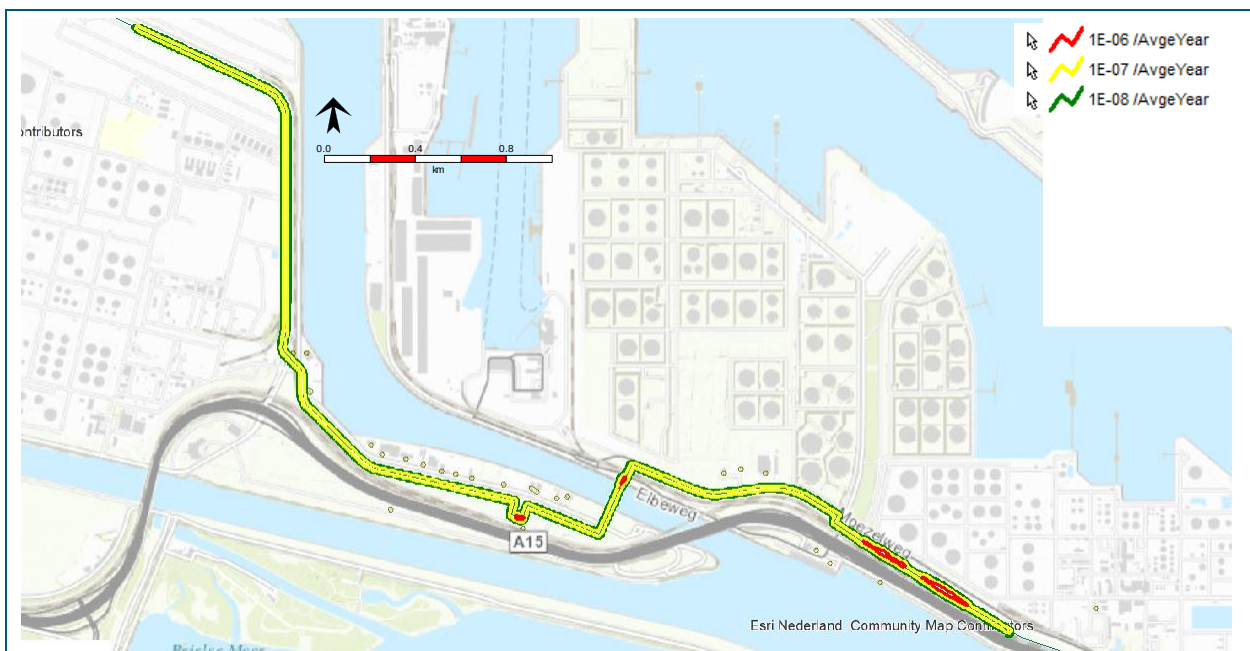


Figuur 6-3. Tracé N-Az lage druk; sectie 2



De PR 10^{-6} /jaar contouren ter hoogte van de Moezelweg zijn het gevolg van de windturbines van Greenchoice en Hartelkanaal. Er is een kleine 10^{-6} /jaar contour zichtbaar bij de waterkruising

Figuur 6-4. Tracé N-Az lage druk; sectie 3



De PR 10^{-6} /jaar contouren ter hoogte van de Moezelweg en na de Dintelhavenbrug zijn het gevolg van de windturbines van Hartelkanaal, Dintelhaven en Schuurhofbrug.

Figuur 6-5. Tracé N-Az lage druk; sectie 4



Figuur 6-6. Tracé N-Az lage druk; sectie 5

Conclusie

Op basis van voorgaande figuren wordt het volgende geconcludeerd:

- Er is een duidelijk verschil zichtbaar tussen de PR-contouren voor de delen van de leiding die ondergronds worden aangelegd en de delen die onder het water doorgaan. Dit verschil wordt verklaard door de andere modellering voor het vrijkomen van CO₂ onder water.
- De 10^{-6} /jaar contouren van de waterkruisingen zijn telkens kleiner dan vijf meter buiten het hart van de leiding.
- De 10^{-6} /jaar contouren ter hoogte van de windturbines zijn telkens groter dan vijf meter buiten het hart van de leiding. De afstand tot de 10^{-6} /jaar contour is maximaal circa 10 meter.

6.1.2 PR hoge druk Tracé N-Az

In de onderstaande figuur is het plaatsgebonden risico van het hoge druk tracé N-Az weergegeven.



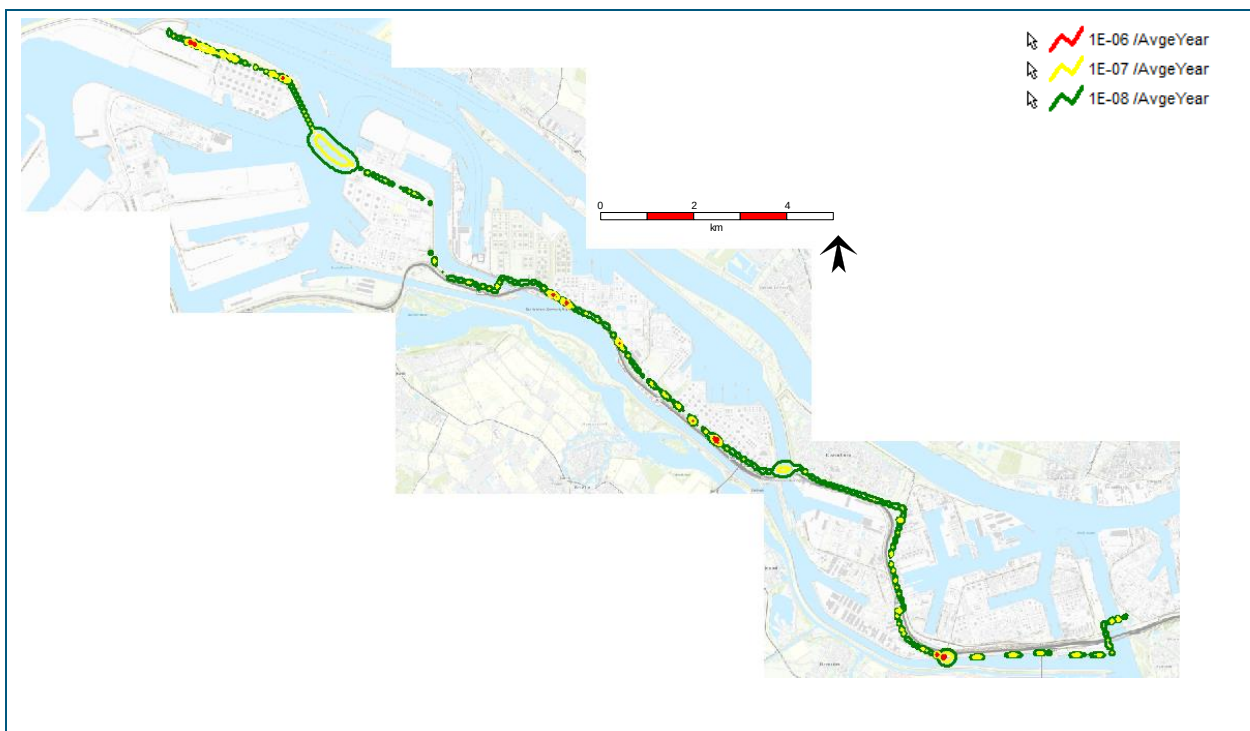
Figuur 6-7. Tracé N-Az hoge druk

De 10^{-6} /jaar contouren bij het afsluiterstation zijn circa 12,5 meter buiten het hart van de leiding.

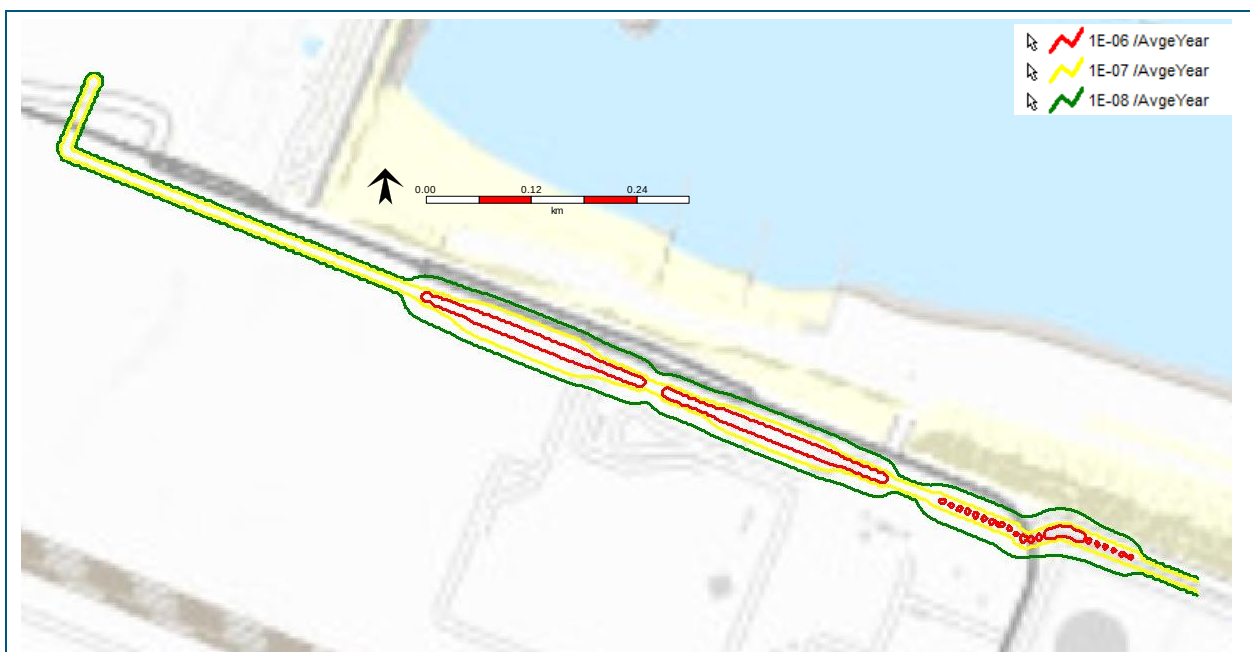
De 10^{-6} /jaar contouren ter hoogte van de windturbines van Maasmond zijn groter dan 5 meter buiten het hart van de leiding (circa 10 meter).

6.1.3 PR Lage Druk Tracé N-Ed

Het tracé voor de variant N-Ed is grotendeels identiek aan dat van tracé N-Az. De berekende risicocontouren vanaf het begin van de leiding tot en met de windturbines van Zuidwal zijn identiek. Hieronder wordt de gehele leiding en worden de verschillen weergegeven voor de windturbines Maasmond.



Figuur 6-8. Tracé N-Ed lage druk; geheel

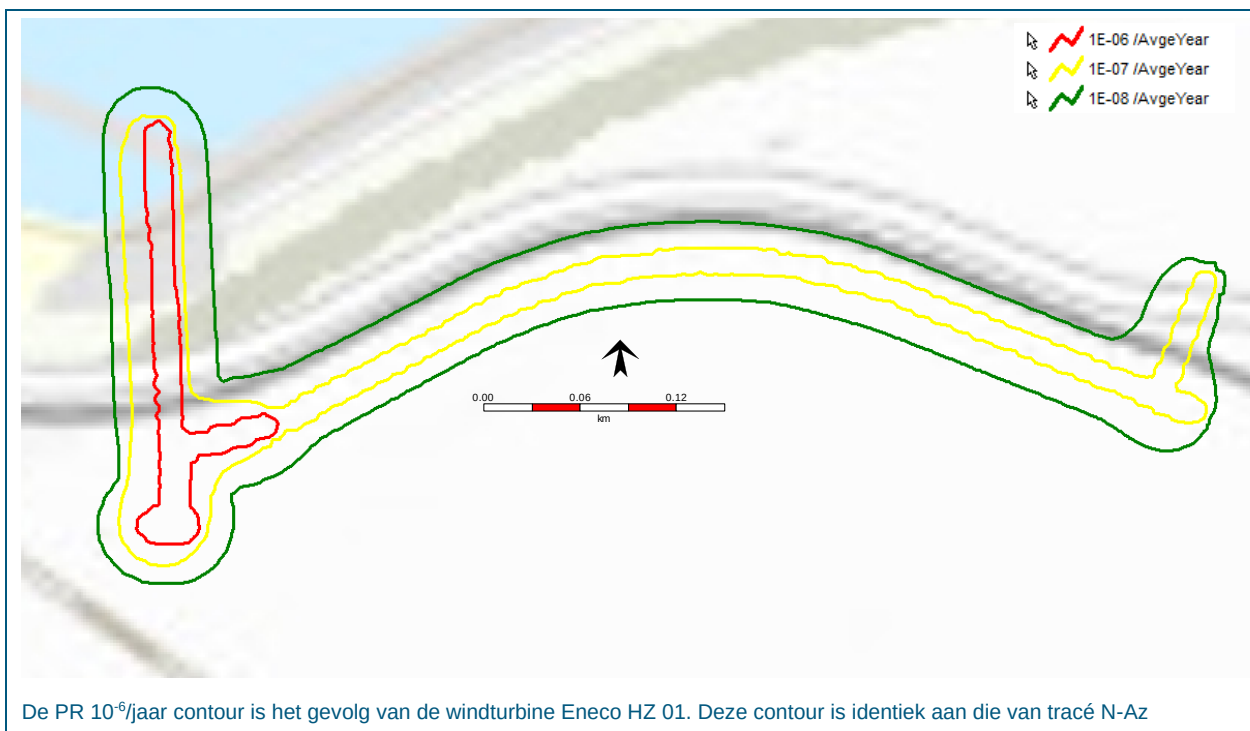


De PR 10^{-6} /jaar contouren zijn het gevolg van de windturbines Maasmond.

Figuur 6-9. Tracé N-Ad lage druk Windturbines Maasmond tot compressorstation

6.1.4 PR Hoge Druk Tracé N-Ed

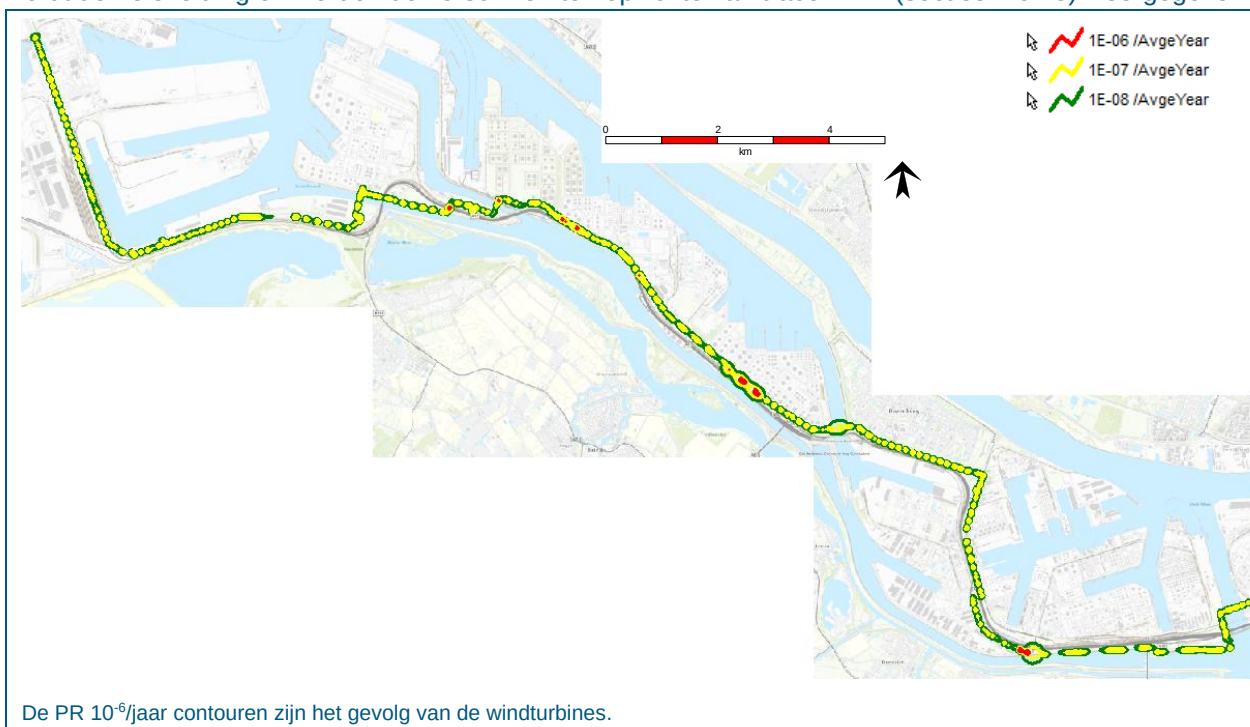
Het tracé voor de variant N-Ed is grotendeels identiek aan dat van tracé N-Az. De windturbines Maasmond 1 t/m 3 liggen nu in het lage druk deel.



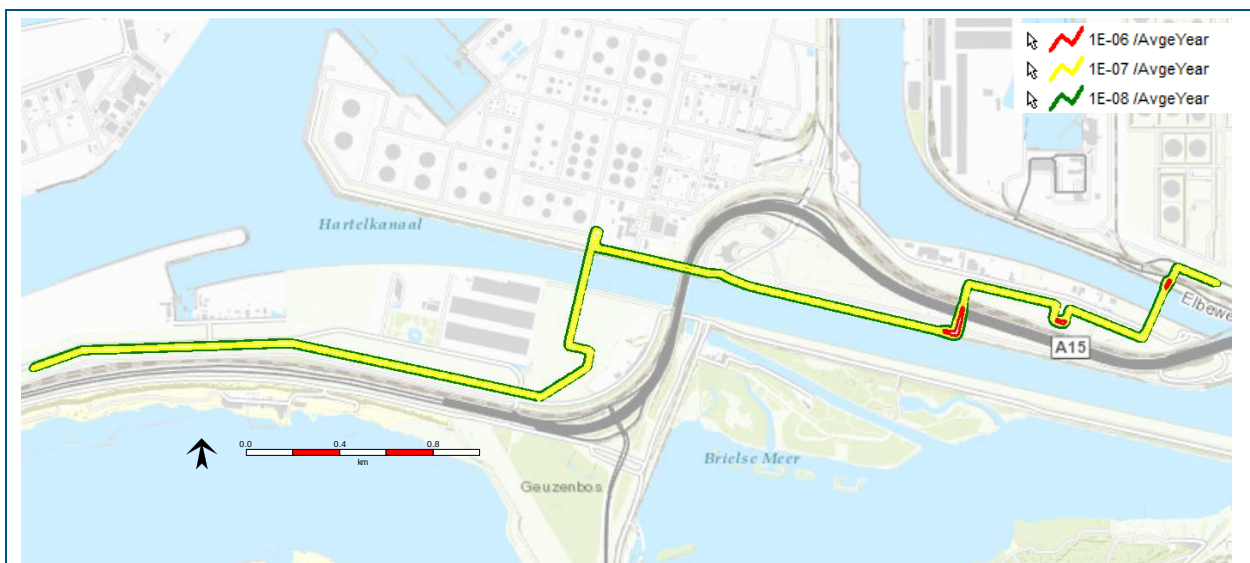
Figuur 6-10. Tracé N-Ad hoge druk

6.1.5 PR Lage Druk Tracé Z-Eu

Het tracé voor de variant Z-Eu is deels identiek aan dat van tracé N-Az. De berekende risicocontouren vanaf het begin van de leiding tot en met de windturbine van Schuurhofbrug 2 zijn identiek. Hieronder wordt de hele leiding en worden de verschillen ten opzichte van tracé N-Az (secties 4 en 5) weergegeven.

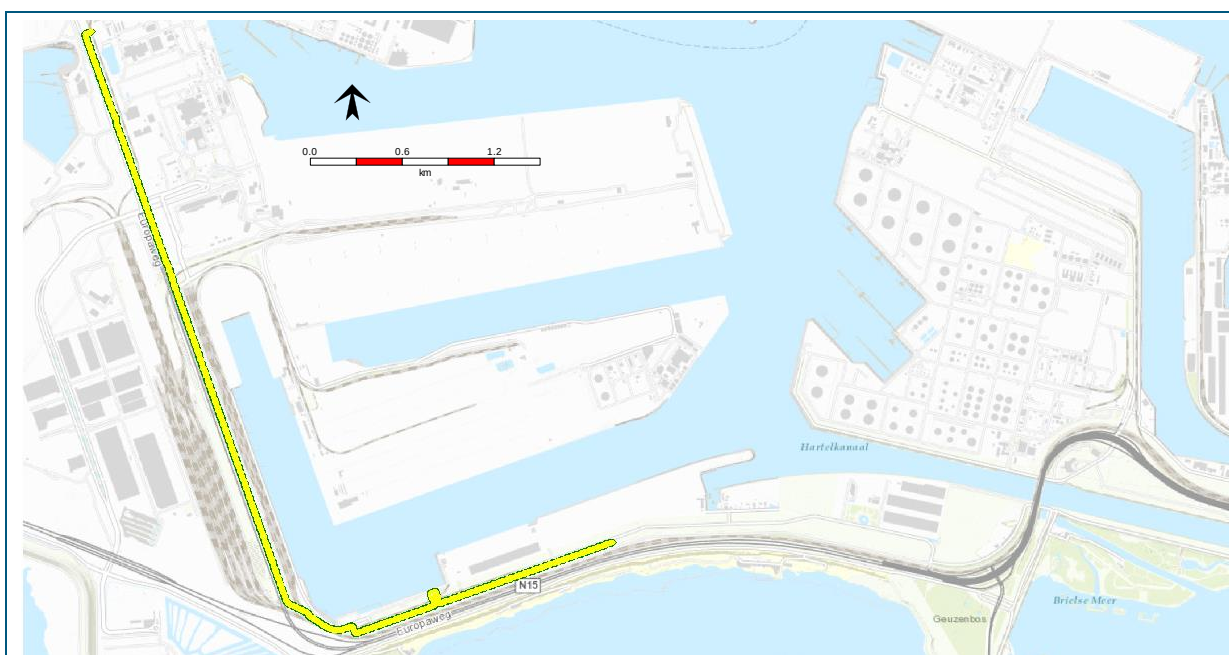


Figuur 6-11. Tracé Z-Eu lage druk; geheel



De PR 10^{-6} /jaar contouren zijn het gevolg van de windturbines Dintelhaven en Schuurhof 1 en 2.

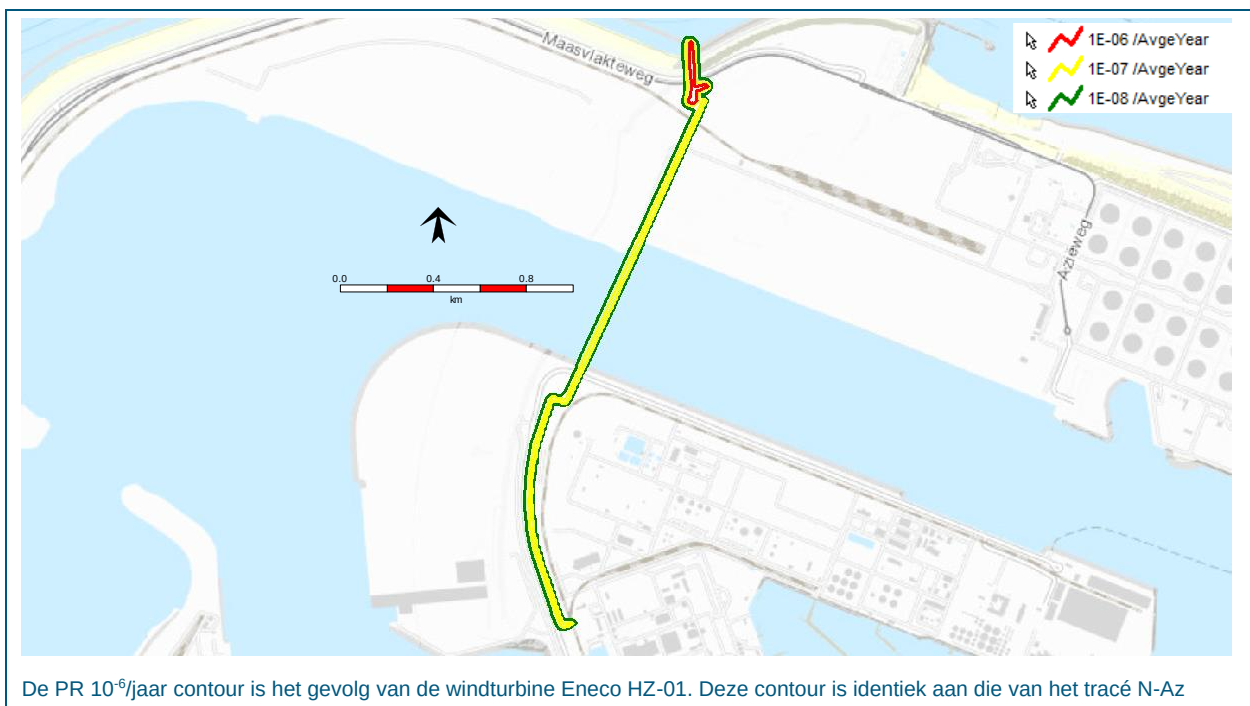
Figuur 6-12. Tracé Z-Eu lage druk; sectie 4



Deze sectie heeft geen windturbines of waterkruisingen.

Figuur 6-13. Tracé Z-Eu lage druk; sectie 5

6.1.6 PR Hoge Druk Tracé Z-Eu



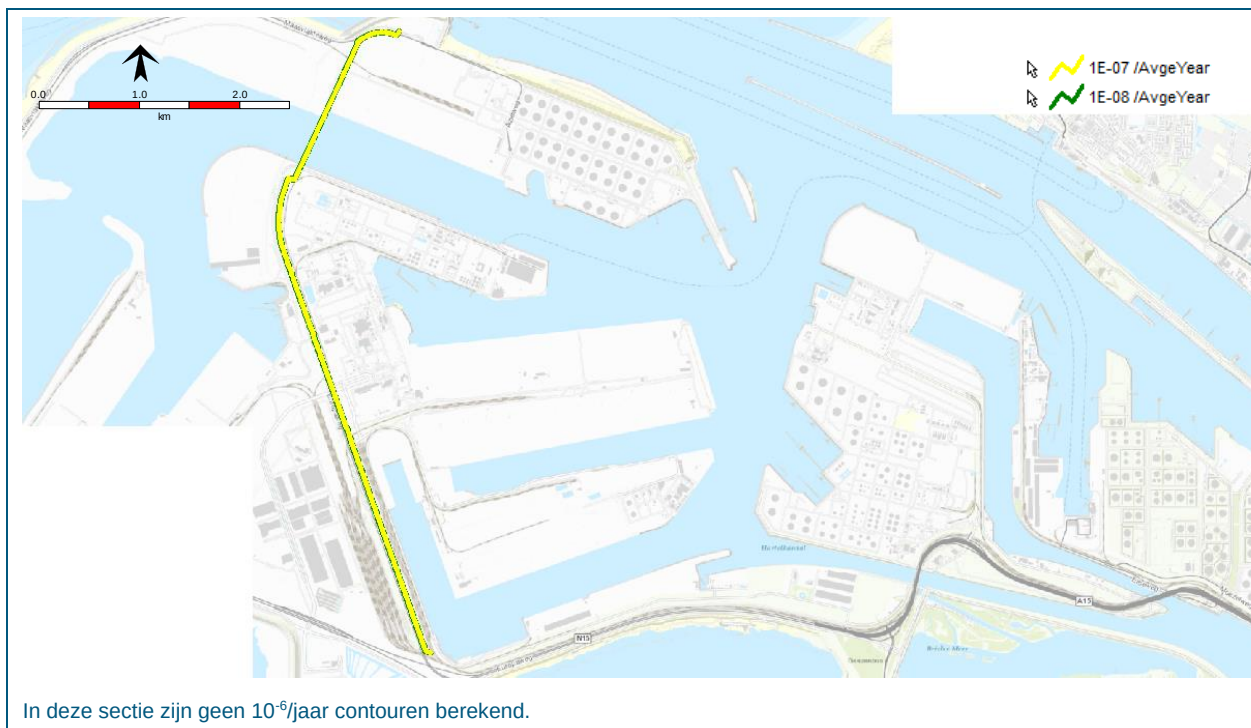
Figuur 6-14. Tracé Z-Eu hoge druk; geheel

6.1.7 PR Lage Druk Tracé Z-Ed

Het tracé voor de variant Z-Ed is grotendeels identiek aan dat van tracé Z-Eu. De berekende risicocontouren vanaf het begin van de leiding tot de locatie van het compressorstation Europaweg zijn identiek. Hieronder wordt de hele leiding en worden de verschillen ten opzichte van tracé Z-Eu (sectie 5) weergegeven.



Figuur 6-15. Tracé Z-Ed lage druk; geheel



Figuur 6-16. Tracé Z-Ed lage druk; sectie 5

6.1.8 PR Hoge Druk Tracé Z-Ed

Dit tracé is identiek aan het hoge druk tracé van N-Ed.

6.2 Groepsrisico

Het groepsrisico (GR) is de kans per jaar dat een groep van een bepaalde omvang tegelijk dodelijk slachtoffer wordt van een ongeval. Het GR wordt vastgelegd in een zogenaamde fN-curve en is in tegenstelling tot het PR afhankelijk van de bevolkingsverdeling in de omgeving van de risicobron. In een fN-curve staat op de verticale as de kans weergegeven dat meer dan N slachtoffers ten gevolge van het beschouwde scenario komt te overlijden. Deze kans wordt uitgedrukt in de eenheid "per jaar". Op de horizontale as staat het aantal slachtoffers weergegeven.

6.2.1 Groepsrisico alle tracés

Lage druk tracé

Het aantal berekende slachtoffers is lager dan 10. Er is geen Groepsrisico berekend voor het lage druk tracé.

Hoge druk tracé

Het aantal berekende slachtoffers is lager dan 10. Er is geen Groepsrisico berekend voor het hoge druk tracé.

7 Conclusie

7.1 Plaatsgebonden risico

Uit de berekeningen van het PR voor de vier tracévarianten (lage druk en hoge druk) blijkt dat bij alle drie de tracés de PR-contouren van de landleiding over het algemeen kleiner zijn dan 10^{-6} per jaar. Ter hoogte van windturbines ontstaan echter 10^{-6} per jaar contouren die groter zijn dan vijf meter uit het hart van de leiding. Dit is in Revb niet toegestaan voor nieuwe leidingen. Ook ter hoogte van de waterkruisingen ontstaat soms een 10^{-6} per jaar contour. Deze contouren zijn echter steeds (veel) kleiner dan vijf meter uit het hart van de leiding.

7.2 Groepsrisico

Uit de berekeningen van het GR voor de drie tracévarianten blijkt dat voor alle vier de tracés geldt dat het groepsrisico nihil is. Het maximum aantal slachtoffers dat wordt berekend is lager dan tien.

8 Referenties

- [1] <https://www.portofrotterdam.com/nl/havenmeester-havenkaart; geraadpleegd februari 2020.>
- [2] [https://www.portofrotterdam.com/sites/default/files/factsheet-port-of-rotterdam-de-kracht-van-windenergie-nl-2019.pdf?token=tNix9H7u \(201901ID-FS001 \(0119/NL\)\)](https://www.portofrotterdam.com/sites/default/files/factsheet-port-of-rotterdam-de-kracht-van-windenergie-nl-2019.pdf?token=tNix9H7u (201901ID-FS001 (0119/NL))).
- [3] <https://populatieservice.demis.nl/#/>
- [4] Handleiding Risicoberekeningen Bevb, versie nr. 3.1, uitgave 2020.
- [5] Handboek risicozonering windturbines, herziene versie 3.1 september 2014, DNV-GL in opdracht van Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.
- [6] Safeti-NL 8.21, softwareprogramma voor de uitvoering van kwantitatieve risico analyses van chemicaliënleidingen conform Revb, DNV-GL.
- [7] Besluit externe veiligheid buisleidingen (Bebv), laatste wijziging in werking getreden op 31 maart 2018.
- [8] Regeling externe veiligheid buisleidingen (Revb), laatste wijziging in werking getreden op 1 april 2020.
- [9] Riser & pipeline release frequencies, Report no. 434-4, International Association of Oil & Gas Producers, March 2010.
- [10] Very Large Deep-Set Bubble Plumes From Broken Gas Pipelines, Petroleumtilsynet, report 6201, Torstein K. Fanneløp og Marco Bettelini, 18th November 2007.
- [11] Ridgeway, P., "Carbon dioxide Dangerous Toxic Load (DTL) assessment", Memo MH07-05, 5 June 2007, HSE, Bootle, UK.
- [12] Modelling of discharge and atmospheric dispersion for carbon dioxide releases, Henk Witlox, Mike Harper, Adeyemi Oke, Journal of Loss Prevention in the Process Industries 22 (2009) 795-802.