

# RAPPORT

## **Onderzoek naar de effecten op en risico's naar mensen bij het vrijkomen van stoom en heet water uit een warmtetransportnet.**

Gebaseerd op het project 'Leiding door het Midden'

Klant: NV Nederlandse Gasunie

Referentie: BH4883IBRP2007200928

Status: S1/P01

Datum: 11-9-2020

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: Onderzoek naar de effecten op en risico's naar mensen bij het vrijkomen van stoom en heet water uit een warmtetransportnet.

Ondertitel:

Referentie: BH4883IBRP2007200928

Status: P01/S1

Datum: 11-9-2020

Projectnaam: GU-IC- Effectanalyse Warmwaterleiding ZH

Projectnummer: BH4883

Auteur(s): Annemarie Vermeer, Roland Boon & P Mink

Opgesteld door: Paul Mink

Gecontroleerd door: Annemarie Vermeer

Datum/paraaf: 10-08-2020

Goedgekeurd door:

Datum/paraaf:

Classificatie

Projectgerelateerd



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

## Inhoud

<b>1</b>	<b>Project beschrijving</b>	<b>6</b>
1.1	Introductie	6
1.2	Afbakening	6
1.3	Wettelijk kader	6
1.4	Aanpak	7
<b>2</b>	<b>Systeem beschrijving</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>Lek scenario verloop</b>	<b>9</b>
3.1	Reactie van mensen bij lekkage	11
<b>4</b>	<b>Criteria voor letsel en risico bepaling</b>	<b>12</b>
4.1	Verstikking	12
4.2	Warmte belasting	12
4.3	Risico	13
<b>5</b>	<b>Rekenmethodiek</b>	<b>15</b>
5.1	Bepaling effectgebied	15
5.2	Bepaling letselschadegebied	16
5.3	Bepaling risico	17
5.3.1	Toegepaste weerscondities	18
5.3.2	Toegepaste lekfrequenties	19
5.3.3	Kans op overlijden door verbranding	20
5.3.4	Model opbouw	21
<b>6</b>	<b>Resultaten</b>	<b>23</b>
6.1	Letselschadegebied	23
6.2	Plaatsgebonden risico	27
<b>7</b>	<b>Samenvatting en conclusies</b>	<b>28</b>

## Tabellen

Tabel 1: Faalwijzen van ondergronds georiënteerde warmtetransportleidingen.	9
Tabel 2: Overzicht van kwetsbare en beperkt kwetsbare objecten (niet uitputtend)	18
Tabel 3: Afstanden tot dispersiecontouren waarbinnen het volume percentage zuurstof minder dan 18 is.	23

Tabel 4: Afstanden tot dispersiecontour waarbinnen de temperatuur van het water / stoom 52° Celsius is. 24

## Figuren

Figuur 5-1: Mate van verbranding op basis van relatie tussen oppervlakte temperatuur van de huid en blootstellingsduur	17
Figuur 6-1: 20 mm lek - Dispersiecontour waarbinnen het volume percentage zuurstof minder dan 18% is.	24
Figuur 6-2: Verticale breuk - Dispersiecontour waarbinnen de temperatuur hoger dan 52° Celsius is.	25
Figuur 7-1: 1mm lek – Dispersiecontouren bij dag	33
Figuur 7-2: 1mm lek – Dispersiecontouren bij nacht	33
Figuur 7-3: 20mm lek – Dispersiecontouren bij dag	34
Figuur 7-4: 20mm lek – Dispersiecontouren bij nacht	34
Figuur 7-5: 50mm lek – Dispersiecontouren bij dag	35
Figuur 7-6: 50mm lek – Dispersiecontouren bij dag	35
Figuur 7-7: Breuk – Dispersiecontouren bij dag	36
Figuur 7-8: Breuk – Dispersiecontouren bij dag - ingezoomd	36
Figuur 7-9: Breuk – Dispersiecontouren bij nacht	37
Figuur 7-10: Breuk – Dispersiecontouren bij nacht - ingezoomd	37
Figuur 7-11 Zijaanzicht verticale breuk	39
Figuur 7-12 Zijaanzicht 45 graden breuk	39
Figuur 7-13 Boven aanzicht breuk 45 graden op 1.2 meter boven maaiveld.	40
Figuur 7-14 Zijaanzicht 45 graden 50 mm lek	40
Figuur 7-15 Boven aanzicht 50 mm lek 45 graden op 1.2 meter boven maaiveld.	40

## Bijlagen

BIJLAGE I – Incidenten met warmtedistributie netwerken

BIJLAGE II – Dispersiecontouren verstikkingsgebieden

BIJLAGE III – Dispersiecontouren Warmte

## Managementsamenvatting

Voor het bepalen van de effecten op en risico's naar mensen bij het blootgesteld worden aan uittredend warm water / stoom zijn geen wettelijk voorgeschreven rekenmethodieken beschikbaar. De rekenmethodieken die gebruikt zijn voor deze studie sluiten zoveel mogelijk aan op rekenmethodieken voorgeschreven volgens bestaande Nederlandse wet- en regelgeving; namelijk de Handleiding Risicoberekeningen Besluit externe veiligheid buisleidingen (HRB Bevb). Een belangrijk uitgangspunt op basis van voorgaand is dat de uitstromingsrichting voor ondergronds georiënteerde leidingen als verticaal wordt aangenomen.

### Effecten

Voor het bepalen van het letsel is onderscheid gemaakt tussen verstikking en verbranding.

Verstikkingsgevaar ontstaat indien uittredend stoom een hoeveelheid lucht uit een bepaald volume verdrijft waardoor het zuurstof percentage binnen dat volume afneemt tot minder dan de 'verstikkingsgrenswaarde'. In het Arbeidsomstandighedenbesluit paragraaf 2b, artikel 3.5g is opgenomen dat er in ieder geval sprake is van gevaar voor verstikking indien de atmosfeer minder dan 18 volume% zuurstof bevat. De resultaten van deze studie laten zien dat voor lekkages de afstand van het lek tot de contour waar verstikking kan optreden minder dan één meter bedraagt. In geval van een leiding breuk bedraagt de afstand tot deze contour maximaal zeven meter. Bij de resultaten dient wel te worden opgemerkt dat het door de auteurs van deze rapportage onwaarschijnlijk wordt geacht dat een persoon binnen deze (verstikkings)contouren blijft staan; dit gezien de ervaring van fysieke pijn door de overdracht van warmte van heet water / stoom naar het lichaam en de ervaring van benauwdheid. Verstikking door verdringing van zuurstof wordt dan ook niet als een reëel scenario beschouwd.

Verbranding van de huid kan optreden indien deze voor een bepaalde duur wordt blootgesteld aan een verhoogde temperatuur. In de Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen – Deel 1A is een relatie gegeven die mate van verbranding aangeeft bij een combinatie van blootstellingsduur en temperatuur. Ook wordt een beschouwing gegeven van hoe de blootstellingsduur van een persoon kan worden bepaald op basis van reactietijd en verplaatsingsnelheid (vluchten). Voor deze studie is uitgegaan van een maximale blootstellingsduur van 120 seconden op basis van: 5 seconden reactietijd, 15 seconden verplaatsen en 100 seconden om met heet water doorweekte kleding uit te trekken. Na deze 120 seconden wordt verondersteld dat de temperatuur waaraan de huid wordt blootgesteld afgenomen is tot normale atmosferische condities. Op basis van de eerder beschreven relatie geldt dat blootstelling van de huid aan een minimale temperatuur van 52° Celsius nodig is om binnen 120 seconden tweedegraads brandwonden op te lopen. De afstand van het lek tot waar ernstige verbranding en mogelijk overleiden kan optreden is op basis van voorgaand gesteld op de afstand waarbinnen de temperatuur van de (stoom)wolk 52° Celsius is. De resultaten van deze studie laten zien dat voor lekkages de afstand van het lek tot de contour waarbinnen de temperatuur minimaal 52° Celsius is minder dan 1 meter bedraagt en niet boven 1 meter boven het maaiveld uit komen. In geval van een leidingbreuk bedraagt de afstand tot deze contour maximaal 4 meter benedenwinds. De wolk zal een maximale breedte van 13.4 m bereiken.

### Risico

De huidige software die wettelijk gezien moet worden toegepast voor het bepalen van het risico naar aanleiding van lekkages aan buisleidingen, is (alleen) geschikt om het risico van toxische en/of brandbare stoffen te berekenen (Safeti-NL en CAROLA). Om toch risico te berekenen is een model gebouwd op basis van een spreadsheet. Dit model is geschikt om een vereenvoudigde risicoberekening uit te voeren voor een 10 kilometer lang buisleidingleidingtracé. Voor de berekening van het risico wordt ervan uitgegaan dat het een recht tracé betreft (zonder bochten) en er vier wind richtingen zijn, twee haaks op de leiding tracé en twee met het tracé mee.

De resultaten laten zien dat de  $10^{-6}$  en  $10^{-7}$  per jaar plaats gebonden contouren niet worden gehaald. De lek scenario's hebben een zeer beperkte effect afstand waardoor deze geen bijdrage aan de contouren geven. Het plaatsgebonden risico wordt in zijn geheel bepaald door de breuk scenario's. Het hoogste plaats gebonden risico is  $7,36E-08$  per jaar en ligt op 1,4 m afstand van het midden punt van de leiding.

## 1 Project beschrijving

### 1.1 Introductie

Gasunie is aangewezen om als onafhankelijke transportbeheerder bij te dragen aan het behalen van klimaatdoelstellingen. Dit doet zij door haar kennis op het gebied van (leiding) infrastructuur in te zetten voor duurzame energievoorziening.

Een tijdens het uitvoeren van deze studie actueel project betreft het zogenaamde 'Leiding door het Midden' project. Gasunie werkt in dit project samen met het Havenbedrijf Rotterdam aan de ontwikkeling van een regionaal warmtetransportnet in Zuid-Holland. Dit netwerk maakt het mogelijk om restwarmte van verschillende bedrijven uit de haven te benutten voor warmtelevering aan woningen en bedrijven in Den Haag, en de glastuinbouw bij Delft. Met de restwarmte wordt water verwarmd dat vervolgens naar de afnemers wordt geleid. Deze warmtelevering reduceert het aardgas gebruik in de provincie en zorgt daarmee voor CO<sub>2</sub> emissie reductie. Deze ontwikkeling draagt daarmee bij aan de lange termijn verduurzamingsopgave van Nederland. Voorgaande tekst is afgeleid uit het Uitvoeringsplan voor het Leiding door het Midden project [1].

Het doel van deze studie is om de gevaren voor mensen bij vrijkomen van het hete water en stoom te onderzoeken. Deze studie geeft inzicht in het verloop van een lekscenario, de effecten van uittredend heet water en stoom (in termen van letsel) en geeft een benadering van het plaatsgebonden risico.

Gasunie heeft Royal HaskoningDHV gevraagd om deze studie uit te voeren vanwege de ruime ervaring die Royal HaskoningDHV heeft met het ontwerpen van waterleiding netwerken en het bepalen van risico's bij het vrij komen van (gevaarlijke) stoffen.

### 1.2 Afbakening

Een warmtetransportnet bestaat uit diverse onderdelen; op hoog abstractieniveau omvatten deze onderdelen een installatie voor warmteoverdracht naar het transportnet, het transportnet zelf (bestaande uit aanvoer en retour leidingwerk en eventueel boosterstations) en een installatie voor warmteoverdracht vanuit het transportnet naar de afnemers/ lokaalnetwerk. Onderwerp van deze studie is alleen een aanvoerleiding met specificaties zoals beschreven in hoofdstuk 2 'Systeem beschrijving'.

Voor deze aanvoerleiding zijn de effecten op mensen bij vrijkomend water/ stoom bij onderstaande lekkengroottes bepaald en is een eenvoudige plaatsgebonden risicoberekening uitgevoerd.

- Guillotinebreuk in midden van leiding
- Lekken, met diameters van 1mm, 20mm, 50mm

### 1.3 Wettelijk kader

De NEN 3650-reeks stelt eisen aan buisleidingsystemen. De algemene eisen aan buisleidingsystemen zoals beschreven in de NEN 3650-1 zijn van toepassing [2]. Afhankelijk van het materiaal waar de leiding uit vervaardigd is, zijn er nog specifieke aanvullende eisen. Voor het in deze rapportage beschouwde tracé is dat de NEN 3650-2 die aanvullende eisen voor leidingen van staal beschrijft [3].

In sectie A.2.4. van de NEN 3650-1 wordt de classificatie van warmwaterleidingen behandeld. Op basis van deze sectie in combinatie met de ontwerp-specificaties van het beschouwde tracé (zie hoofdstuk 2 van

deze studie) is bepaald dat het te transporteren heet water onder groep-I moet worden gerangschikt. Daarmee wordt het heet water als gevaarlijke stof gecategoriseerd. De NEN 3650-1 stelt eisen aan buisleidingen die gevaarlijke stoffen transporteren. Wel wordt in sectie 6.1.1 van deze norm gesteld dat het plaatsgebonden risico en groepsrisico voor leidingen waarmee warm water wordt getransporteerd niet hoeft te worden bepaald (in tegenstelling tot andere stoffen die in groep-I dienen te worden gerangschikt):

*“Groep I-leidingen voor het transport van warm water (stadsverwarming en regioverwarming, zoals kassencomplexen) vallen niet onder het toepassingsgebied van het Bevb [1]. Voor deze leidingen behoeven het plaatsgebonden risico (PR) en het groepsrisico (GR) (zie 6.3) niet te worden bepaald.”*

Naar aanleiding van bovenstaand is voor de bepaling van letsel naar aanleiding van blootstelling aan warm water en/of stoom dan ook geen wettelijk voorgeschreven rekenmethodiek beschikbaar. De rekenmethodieken die gebruikt zijn voor deze studie sluiten zoveel mogelijk aan op bestaande Nederlandse wet- en regelgeving voor buisleidingen; namelijk het Besluit externe veiligheid buisleidingen en de daaraan verbonden Handleiding Risicoberekeningen Besluit externe veiligheid buisleidingen (HRB Bevb) [5].

Waar nodig aangevuld met binnen de industrie geaccepteerde normen en standaarden, dan wel informatie afkomstig uit wetenschappelijke bronnen.

De resultaten van deze studie zijn dan ook vooral bedoeld als ‘inzicht gevend’; zoals door Gasunie aangegeven in reactie op gestelde vragen is deze studie niet benodigd voor het verkrijgen van een vergunning [4].

## 1.4 Aanpak

Om tot het doel te komen zoals eerder in dit hoofdstuk beschreven worden onderstaande stappen gevolgd.

Als eerste stap wordt het verloop van een uitstromingsscenario vastgesteld. Daarbij wordt ingegaan op de wijze van detectie van een lek en het gedrag van omstanders om uitgangspunten voor het fysische effectgebied en het daaraan verbonden letsel aan personen vast te stellen.

Voor de rekenmethodiek worden voor deze fysische effecten criteria voor gewond raken en voor overlijden vastgesteld, zodat de afstand waarop het letsel optreedt bepaald kan worden.

Met de software Phast zal het fysisch effectgebied bepaald worden voor diverse lek groottes. Het letsel wordt veroorzaakt door verbranding en/of verstikking. Voor verbranding wordt de bepalende temperatuur in de omgeving berekend. Hiertoe wordt voor het vloeibare warm water een plasgrootte berekend met een gemiddelde plastemperatuur. Voor de stoom wordt een wolk berekend met de stoomtemperatuur als functie van afstand en tijd. Voor verstikking wordt de zuurstof concentratie in de omgeving berekend daartoe wordt verdringing door de stoom (concentratie) in ogenschouw genomen. Op basis van het fysisch effectgebied kan het letsel effectgebied worden herleid.

Voor de analyse naar het plaatsgebonden risico, wordt in een Excel-bestand een rekenmodel opgesteld, waarbij rekening gehouden wordt met windrichtingen, frequenties van windsnelheden, uitstroomrichting en weercondities conform Handleiding Risicoberekeningen Besluit externe veiligheid buisleidingen (Bebv) [5].



## 2 Systeem beschrijving

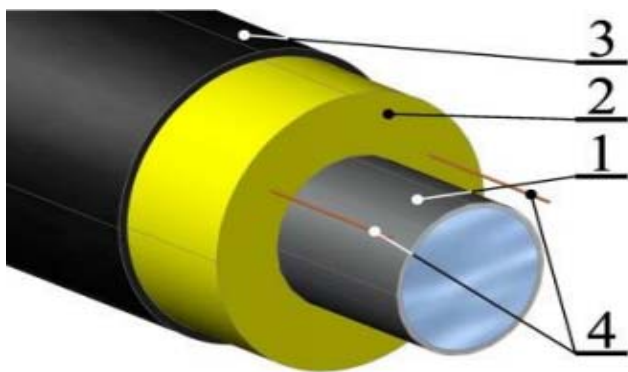
Het te analyseren systeem bestaat uit een stalen leiding voorzien van isolatie en PE buitenmantel. In onderstaande tabel is een aantal karakteristieken met betrekking tot de leiding opgenomen die uitgangspunt zijn bij deze studie.

Parameter	Kwantiteit
Diameter	DN700
Ontwerpdruk	25 barg
Dekking	1,2 m
Temperatuur	120 °C
Lengte	10 km
Rekgrens	355 MPa
Wanddikte	8,0 mm

Zoals aangegeven in bovenstaande tabel wordt voor de lengte van de leiding uitgegaan van 10km. Dit is niet de totale lengte van het tracé, maar een generiek gekozen leiding deel

Afhankelijk van de vraag, o.a. afhankelijk van het jaargetijde, zal er een hoeveelheid warmte uit het warmtenet worden afgenomen voor gebruikers. Dit bepaalt het verschil tussen de watertemperatuur van de aanvoer - en retourleiding. De door de industrie geproduceerde restwarmte wordt gebruikt om de temperatuur van het water weer naar 120 graden Celsius te verhogen; hoe hoger de afname, hoe meer restwarmte benut kan worden.

Een typisch ontwerp van een leiding met bovenstaande karakteristieken is weergegeven in onderstaande afbeelding.



In deze afbeelding is:

1. De stalen buisleiding
2. De isolatie laag (Polyurethaan)
3. De beschermende mantel (Polyethyleen of staal)
4. De lekdetectie bestaande uit diverse koperen kabels

De beschermingsmantel bestaat uit polyethyleen of staal afhankelijk van locatie en aanleg methode. Staal zal gevoeliger zijn voor corrosie maar beter bestendig zijn voor externe impact.

### 3 Lek scenario verloop

#### Oorzaken

Diverse publiek toegankelijke bronnen zijn beschikbaar die casuïstiek van leidingincidenten beschrijven. Vanuit overheidswege geeft het BevB veel informatie, maar ook internationale bronnen zoals, EGIG, CONCAWE, UKOPA kunnen geraadpleegd worden. Deze bronnen geven veel informatie over faalwijzen zoals: interactie door derden (o.a. graafwerkzaamheden), corrosie mechanismen, natuurlijke oorzaken (aardebevingen). Voor deze studie zijn faaloorzaken overgenomen uit een eerder uitgevoerde studie naar een warmte distributiesysteem [6]<sup>1</sup>. De faalwijzen zijn ingedeeld op basis van drie mogelijke tijdsafhankelijkheden. In tabel 1 zijn de faalwijzen weergegeven.

Tijdsafhankelijk:	Dit betreft factoren die gedurende het jaar of de gehele levensduur van de leiding een steeds belangrijkere rol gaan spelen. Hier onder vallen bijvoorbeeld: materiaal degradatie door inwerking van binnen- of buiten af (bv. corrosie), veroudering van kunststoffen, maar ook temperatuur variatie door seizoensgebonden vraag,
(tijds)Stabiel:	Dit betreft factoren die niet door tijd beïnvloed worden. Hier onder vallen bijvoorbeeld: operationele condities in relatie tot ontwerpcondities, kwaliteit van het water, belasting van leiding door gronddekking.
Tijdsonafhankelijk:	Dit betreft factoren die instantaan kunnen optreden. Hier onder vallen bijvoorbeeld: beschadiging door derden, aardbevingen, productie en installatie fouten.

Tabel 1: Faalwijzen van ondergronds georiënteerde warmtetransportleidingen.

Tijdsafhankelijk	(tijds)stabiel	Tijdsonafhankelijk
Veroudering/ materiaal degradatie Corrosie Loslaten van PUR van de leiding Mechanische belasting door: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Verzakking</li> <li>• Zetting/ verschuiving van originele locatie</li> <li>• Seizoensgebonden omgevingscondities (grondwaterniveau, temperatuur)</li> </ul>	Mechanische belasting door <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fluctuaties in operationele condities (druk, temperatuur - deflection)</li> <li>• Dekkingslaag/ verkeer</li> <li>• Waterslag</li> <li>• Bij overgang van vaste diepteligging naar flexibele diepteligging (drijfvermogen - buoyancy)</li> </ul> Waterkwaliteit (vervuiling, pH graad)	Natuurrampen Beschadiging door derden (bv. graafwerkzaamheden) Fouten tijdens ontwerp, constructie & installatie

#### Verloop

Bij een breuk zal in een zeer korte tijd een grote hoeveelheid water vrijkomt. De druk in de leiding zal snel afnemen waardoor het water zal gaan koken waarbij vervolgens stoom vrijkomt. De stoom zal een grote hoeveelheid kokend water verplaatsen en de grond bedekking weg blazen. Daarna zal er een stoomwolk vormen. De personen die zich bij de leiding bevinden op het moment van het ontstaan van het lek zullen worden getroffen door stoom, en heet water te komen overliden. Daarna zal stoom het maatgevende scenario zal zijn voor dodelijke slachtoffers.

<sup>1</sup> De studie waar naar gerefereerd wordt betreft een studie uitgevoerd voor een derde; de geïnventariseerde faalwijzen kunnen echter voorkomen bij buisleidingen in het algemeen en worden daarom niet als vertrouwelijke informatie beschouwd.

Bij medium en kleinere lekken zal de grond langzaam weg spoelen. Pas op het moment dat de leiding vrij komt te liggen zal de stoom een wolk met mogelijk hoge temperaturen vormen. Er wordt voor de berekeningen dus ook uitgegaan van een onbedekte leiding voor de bepaling van de effecten.

### **Detectie**

#### Lekkage van de buisleiding (medium treedt naar buiten)

- Indien het lek is veroorzaakt door personen (werkzaamheden) wordt verondersteld dat dit worden gemeld; met uitzondering van doelbewuste beschadiging.
- Indien het lek ontstaat zonder dat daar personen bij betrokken zijn, is de lek grootte bepalend voor de wijze van detectie.
  - (Zeer) grote lekken kunnen door verschilmetingen (druk en debiet) real-time worden gedetecteerd en (zeer) waarschijnlijk visueel worden waargenomen. De verwachting is dat waarneming vooral door publiek wordt gedaan en dat daar melding van wordt gemaakt via het alarmnummer (112).
  - Lekken die niet op basis van real-time verschilmeting worden gedetecteerd, kunnen gedetecteerd worden tijdens periodieke doormeten van het (koperen) lekdetectie systeem in de isolatielaag. Voorwaarde voor detectie is dat het lek voldoende groot is om een bepaalde mate van verzadiging van het isolatiemateriaal te realiseren. Het water in de isolatielaag is warm en zal ook warm blijven doordat er warmteoverdracht tussen de stalenleiding en het water plaatsvindt. Deze warmte kan op zijn beurt weer naar het omringende grondwater worden overgedragen wat daardoor kan verdampen; dit kan waarneembaar zijn als stoom.
  - Indien gelekt medium door de isolatielaag en mantel naar buiten treedt, kan mogelijk stoom worden waargenomen door omstanders. Ook is het mogelijk dat grond (in verloop van tijd ) wordt weggespoeld.

#### Beschadiging van de mantel (grondwater treedt de isolatielaag in)

- Indien de beschadiging is veroorzaakt door personen (werkzaamheden) wordt verondersteld dat dit wordt gemeld; met uitzondering van doelbewuste beschadiging.
- Indien de beschadiging is ontstaan zonder dat daar personen bij betrokken zijn, is de mate van beschadiging bepalend voor de wijze van detectie.
  - Lekken kunnen gedetecteerd worden tijdens periodiek doormeten van het (koperen) lekdetectie systeem in de isolatielaag. Voorwaarde voor detectie is dat het lek voldoende groot is om een bepaalde mate van verzadiging van het isolatiemateriaal te realiseren.
  - Water dat de isolatie laag binnentreedt zal verhit worden door contact met de stalenleiding en tot stoom overgaan. Deze stoom kan vervolgens weer naar buitentreden en waarneembaar zijn.

Voor alle kleine niet detecteerbare lekken wordt verondersteld dat deze met de tijd groter worden totdat ze wel detecteerbaar zijn.

In bijlage I is een aantal afbeeldingen opgenomen die weergeven wat er visueel kan worden waargenomen bij een lekkage; het betreft voorbeelden uit de praktijk.

### **Reparatie**

Afhankelijk van de aard van het lek zal er een bepaalde inzet van mensen, materieel en materiaal benodigd zijn. Los van de benodigde inzet zal het betreffende leidingdeel uitgegraven moeten worden. Indien de leiding niet buiten gebruikt wordt genomen, dit kan de reparatiemethode zijn voor (hele) kleine lekken (hot tap), moet er rekening mee worden gehouden dat met het verwijderen van de gronddekking de uitstroming niet meer belemmerd wordt en dat een vrije uitstroming kan ontstaan.

### 3.1 Reactie van mensen bij lekkage

Indien mensen een calamiteit waarnemen, zal hun eerste reactie afhankelijk zijn van de inschatting van de ernst van het incident voor hun zelf. Zo zullen mensen die getraind zijn in het omgaan met gevaarlijke stoffen of die werkzaam zijn binnen de procesindustrie waarschijnlijk eerder bescherming zoeken dan mensen die niet met dergelijke gevaren bekend zijn. En zullen bijvoorbeeld volwassenen anders reageren dan (spelende) kinderen omdat ze het gevaar anders inschatten. Er wordt in deze studie vanuit gegaan dat een persoon niet zal blijven staan indien er zich een plas van heet water aan het vormen is; zichtbaar uitdampen van het water wordt beschouwd als voldoende waarschuwing voor een persoon om zich naar een veilige afstand te begeven.

Voor blootstellingsduur aan warm water en/of stoom speelt naast reactie(tijd) ook de zelfredzaamheid een rol. Mensen die minder mobiel zijn zoals bijvoorbeeld ouderen of gehandicapten kunnen langer blootgesteld worden. In de De Publicatie Reeks Gevaarlijke stoffen deel 1A – Effecten van branden op personen [9], wordt voor het bepalen van de blootstellingsduur voorgesteld om van een reactietijd van 5 seconden en een loopsnelheid van 4m/s uit te gaan.

Wel moet worden opgemerkt dat uit de praktijk blijkt dat mensen juist ook de locatie van het incident benaderen (tot op een afstand die zij als veilige beschouwen).

## 4 Criteria voor letsel en risico bepaling

Op basis van de fysische eigenschappen van uittredend heet water en stoom zijn onderstaande mogelijke wijzen van het oplopen van letselschade bepaald. Voor deze wijzen wordt vervolgens besproken wat de specifieke criteria zijn en hoe deze bepaald zijn.

- Verstikking: Uittredend stoom verdringt de lucht waardoor de zuurstofconcentratie afneemt.
- Warmte belasting (verhitting)
  - Door contact van heet water/ stoom met de huid kunnen brandwonden van bepaalde ernst ontstaan.
  - Door inademen kan hete stoom het respiratoire systeem beschadigen waardoor zuurstofopname bemoeilijkt wordt (opzetten van de keel, longen en/of aantasten van longblaasjes).
- Rondvliegende objecten.

### 4.1 Verstikking

Wanneer er te weinig zuurstof uit de ingeademde lucht wordt overgedragen aan het lichaam om het zuurstofniveau in de bloedsomloop op een bepaalde waarde te houden treedt verstikking op. In het Arbeidsomstandighedenbesluit paragraaf 2b, artikel 3.5g [7] is opgenomen dat er in ieder geval sprake is van gevaar voor verstikking indien de atmosfeer minder dan 18 volume% zuurstof bevat.

### 4.2 Warmte belasting

Letsel aan de huid door een te hoge warmte belasting wordt gewoonlijk gekarakteriseerd als eerst-, tweede- of derdegraadsverbranding; deze karakterisering geeft aan in welke mate en tot welke diepte de huid beschadigd is. Binnen tweedegraadsverbranding wordt nog onderscheid gemaakt tussen 'oppervlakkig' en 'diep' (in relatie tot de aangetaste huidlaag). Volgens de Nederlandse Brandwondenstichting kan afhankelijk van de ernst van verbranding dit resulteren in verlies van beschermende werking van de huid; bacteriën kunnen makkelijker binnendringen, groter risico op infecties en meer verlies van vocht en warmte [8]. Tevens wordt aangegeven dat:

- Een eerstegraadsbrandwond zich beperkt tot de opperhuid
- Een tweedegraadsbrandwond de daaronder gelegen lederhuid aantast (oppervlakkig of diep)
- Een derdegraadsbrandwond het daaronder gelegen onderhuids vetweefsel aantast

De PGS-deel 1A [9] stelt het volgende:

*“Een eerstegraadsverbranding is oppervlakkig en wordt gekenmerkt door een rode, droge en pijnlijke huid. Bij een tweedegraadsverbranding is de epidermis (dikte 0,07-0,12 mm) verbrand; een dergelijke verbranding kenmerkt zich door blaarvorming en een natte huid, die nog rood is. Een derdegraadsverbranding strekt zich uit tot de dermis (dikte 1-2 mm) waarin zich onder meer de haarwortels en de vrije zenuwuiteinden bevinden; de verbrande huid is gevoelloos en droog en heeft een witte, gele of zwarte kleur.”*

Naast brandwonden op de huid kan ook inhalatieletsel ontstaan aan het respiratoire systeem. Als gevolg daarvan zal ademen en zuurstofopname bemoeilijkt worden als gevolg van schade aan longblaasjes en met name oedeem van de keel en luchtpijp. Afhankelijk van de ernst van het letsel kan dit fataal zijn. Uit informatie op de website van de Federatie Medisch Specialisten [10] wordt afgeleid dat belangrijke factoren voor mogelijk inhalatieletsel zijn: brand in afgesloten ruimte, duur van blootstelling aan rook en

rookontwikkeling. Zoals verderop in dit document wordt beschreven is de verwachte blootstellingsduur aan een stoomwolk kort (minder dan een halve minuut). Ook is de verwachting dat de warmtecapaciteit van het respiratoire systeem groter is dan dat van de huid omdat het respiratoire systeem vochtiger is; dit zorgt dat er meer warmte moet worden toegevoerd om de temperatuur van het respiratoire systeem te verhogen dan de temperatuur van de huid.

Er is zeer beperkt wetenschappelijk onderzoek bekend over schade aan longen als gevolg van het inademen van stoom, de gevallen die zijn gedocumenteerd gaat het om kinderen die in besloten ruimte aan super-heated stoom waren blootgesteld. Waarbij met name de verstikking als gevolg van oedeem de belangrijkste oorzaak was.

Er is geen data beschikbaar over welke temperatuur stoom nodig heeft om schade te veroorzaken aan de longen er is vanuit gegaan dat dit bij vergelijkbare of hogere temperaturen zal zijn, dan de temperatuur die nodig is voor schade aan de huid.

### 4.3 Rondvliegende objecten

Naast mogelijk letsel door contact met stoom/heet water kan ook letsel optreden door contact met wegslingerende brokstukken. Het modelleren van brokstukken is zeer complex en sterk afhankelijk van de dikte en type van de bovenlaag. Er zijn geen eenvoudige modellen beschikbaar die inzicht geven in mate van vorming van brokstukken en de afstand die deze kunnen overbruggen. Er zijn echter verschillende beelden beschikbaar van (grote) lekkages / breuken van waterleidingen. Op beelden van in Nederland voorgekomen incidenten is te zien dat brokstukken (voornamelijk asfalt en (stoep)tegels) dicht bij het lek zelf liggen. Beelden van incidenten die in het buitenland hebben plaatsgevonden laten zien dat (kleinere) brokstukken, voor zover op te maken uit de beelden, afstanden kunnen overbruggen van meerdere meters. Het is dus mogelijk dat brokstukken gevormd worden en over meerdere meters weggeslingerd worden, de effecten zijn echter sterk locatie afhankelijk en daarom niet mee genomen in deze studie.

Tijdens de inventarisatie zijn er geen (nieuws)artikelen zijn gevonden waarbij werd gesproken over letsel naar personen door contact met weggeslingerde brokstukken; dit zou kunnen betekenen dat de kans op om (serieus)letsel als gevolg door het getroffen worden door een brokstuk (veel) kleiner is dan de kans op letsel door stoom/heet water.

### 4.4 Risico

Het risico dat bepaald wordt is het zogenaamde 'plaatsgebonden risico' (PR). Dit is het risico op een plaats nabij een transportroute, buisleiding of inrichting, uitgedrukt als de kans per jaar dat een persoon die onafgebroken en onbeschermd (wel gekleed) op die plaats verblijft, overlijdt als rechtstreeks gevolg van een ongewoon voorval met de buisleiding, op de transportroute of binnen de inrichting, waarbij een gevaarlijke stof betrokken is.

De volgende norm wordt aangehouden voor PR: Voor nieuwe situaties geldt de 10<sup>-6</sup> per jaar PR-contour als grenswaarde voor kwetsbare objecten en als richtwaarde voor beperkt kwetsbare objecten.

Kwetsbare objecten	Beperkt kwetsbare objecten
Woningen	Verspreid liggende woningen (2/ha)
Ziekenhuizen, bejaarden- en verpleeghuizen e.d.	Dienst- en bedrijfswoningen

Scholen en dagopvang minderjarigen	Kantoorgebouwen (< 1500 m <sup>2</sup> )
Kantoorgebouwen en hotels (> 1500 m <sup>2</sup> )	Hotels en restaurants (< 1500 m <sup>2</sup> )
Winkelcentra (> 1000 m <sup>2</sup> > 5 winkels)	Winkels
Winkel met supermarkt (> 2000 m <sup>2</sup> )	Sport-, kampeer- en recreatieterreinen (<50 personen)
Kampeer- en verblijfsrecreatieterrein (> 50 pers.)	Bedrijfsgebouwen
Andere gebouwen met veel personen gedurende een groot deel van de dag	Objecten met hoge infrastructurele waarde

Tabel 2: Overzicht van kwetsbare en beperkt kwetsbare objecten (niet uitputtend)

## 5 Rekenmethodiek

### 5.1 Bepaling effectgebied

Voor de bepaling van het effectgebied is gebruik gemaakt van de software Phast versie 8.3, zoals ontwikkeld door DNV GL. Deze software is binnen de industrie bekend en geaccepteerd voor effectberekeningen aan gevaarlijke stoffen.

De systeemp parameters zoals opgenomen in hoofdstuk 2 zijn in het model ingevoerd (met uitzondering van de dekking) Voor de effect berekeningen zijn in de gebruikte modellen de rekgrens en wanddikte niet van belang en zijn dus niet mee genomen.

Het scenario verloop laat zien dat bij de breuk de bedekking snel weg zal zijn geslagen en er geen grond meer boven de leiding bevindt. Bij medium en kleinere lekken zal de grond langzaam weg spoelen. Pas op het moment dat de leiding vrij komt te liggen zal de stoom een wolk met mogelijk hoge temperaturen vormen. Er wordt voor de berekeningen dus ook uitgegaan van een onbedekte leiding voor de bepaling van de effecten.

Voor de kleine en medium lekken geldt wel dat er mogelijk waarschuwingen zijn zoals bijvoorbeeld mist boven de grond waarbij ingegrepen kan worden voordat het scenario zich helemaal heeft ontwikkeld. Dit heeft geen impact of de bepaling van het effect gebied maar zou als mitigerende maatregel meegenomen kunnen worden in de faal frequentie.

Aansluitend op de HRB Bevb [5],

- Wordt het leidingtracé gemodelleerd als een drukvat.
- Wordt de uitstromingsrichting als verticaal verondersteld voor de risicoberekeningen.  
*Wel worden voor de effectberekeningen de dispersiecontouren naast voor verticale uitstroming ook uitstroming onder een hoek van 45 graden bepaald; dit ter beeldvorming.*
- Worden de effecten bepaald voor de weerscondities 9.0/D, 5.0/D, 1.5/F en 3.0/B (de windsnelheid respectievelijk Pasquill stabiliteitsklasse), behorend bij dag en nacht condities van de atmosfeer.
- Worden de effecten bepaald op een hoogte van 1 meter boven maaiveld.  
*Aangezien de leiding ondergronds georiënteerd is met een gronddekking van 1,2 meter zijn de effecten bepaald op hoogteverschil van 2,2 meter in relatie tot de leiding.*

#### Toelichting op weerscondities

De stabiliteit van de atmosfeer is verreweg de belangrijkste parameter die turbulentie en daarmee dispersie van een (verontreinigende) stof beïnvloedt. Een neutrale atmosfeer versterkt of remt turbulentie niet. Een onstabiele atmosfeer bevordert turbulentie, terwijl een stabiele atmosfeer turbulentie remt. Hoe onstabiel de atmosfeer, hoe sneller een stof disperseert. De mate van turbulentie kan worden onderverdeeld in gedefinieerde stappen of "stabiliteitsklassen". De meest gebruikte categorieën zijn de Pasquill-stabiliteitsklassen A, B, C, D, E en F (gebaseerd op D. Bruce Turners Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates). Klasse A staat voor de meest onstabiele atmosferische omstandigheden en klasse F staat voor de meest stabiele atmosferische omstandigheden.



## 5.2 Bepaling letselschadegebied

Op basis van de ingevoerde parameters is door de software de dispersie van stoom bepaald. Voor verstikking is specifiek de concentratie waterdamp in relatie tot lucht van belang. Voor verbranding is specifiek de temperatuur van de stoomwolk versus afstand tot het lek is van belang.

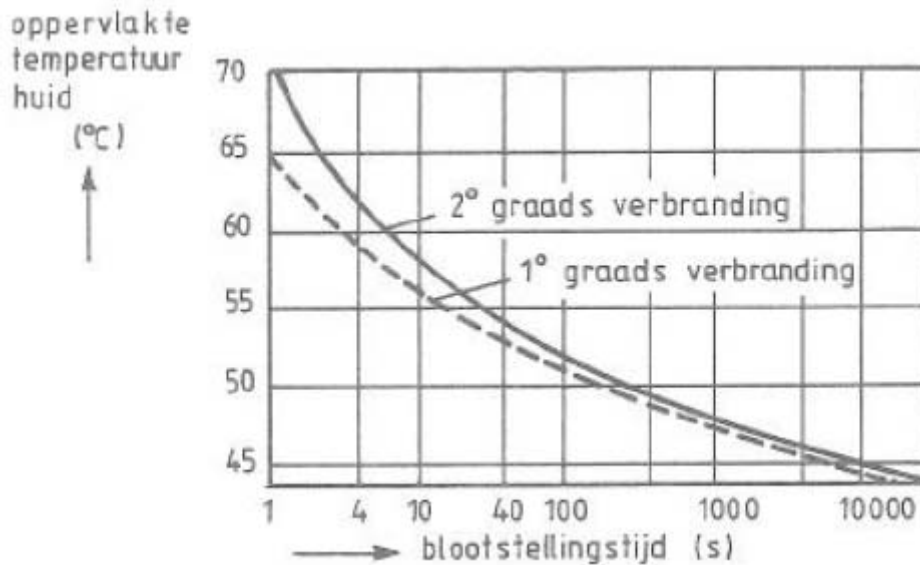
De personen die zich bij de leiding bevinden op het moment van het ontstaan van het lek zullen worden getroffen door stoom, en heet water waarbij stoom het maatgevende scenario zal zijn voor dodelijke slachtoffers. Daarna zal er een plas met heet water vormen deze plas zal mogelijk tot brandwonden leiden aan voeten, maar, zoals aangegeven in paragraaf 3.1, wordt verondersteld dat personen contact met het water zullen vermijden.

### Verstikking

Zoals aangegeven in hoofdstuk **Error! Reference source not found.** is er gevaar voor verstikking indien het volume percentage zuurstof in de lucht lager dan 18% wordt. Om te bepalen of een lekkage dit tot gevolg kan hebben wordt eerst bepaald welk percentage van lucht verdrongen moet worden door waterdamp om het percentage zuurstof onder de 18 volume% te brengen. Het benodigde volume percentage waterdamp wordt vervolgens ingevoerd in de software waarna bij elk lek de bijbehorende dispersiecontouren tot dit percentage waterdamp wordt bepaald; dit is de omvang van het letselschade gebied ingeval van verstikking.

### Warmte belasting

Voor het bepalen van de letselschade naar mensen is gebruik gemaakt van de PGS-deel 1A [9]. Dit deel van de publicatiereeks beschrijft onder andere letselschade door warmteoverdracht op de huid. Het beschreven mechanisme van warmteoverdracht is direct contact met een vlam of overdracht door warmtestraling afkomstig van een vlam. Hoewel beide niet toegepast kunnen worden voor de warmteoverdracht door contact met heet water en/stoom, kan wel gebruikt gemaakt worden van de ernst van de letselschade door warmteoverdracht omdat deze wordt bepaald aan de hand van het temperatuurverloop in de huid als gevolg van warmtebelasting. Voor met kleding bedekte huid is een relatie opgenomen die aangeeft welke mate van brandwonden ontstaat bij een oppervlaktetemperatuur van de huid gedurende een bepaalde blootstellingsduur. In Figuur 5-1 is deze relatie weergegeven. Op basis van literatuurgegevens is geconcludeerd dat verbranding kan ontstaan als de temperatuur van de huid (laag) tenminste toeneemt met 9 graden; uitgaande van een lichaamstemperatuur van de 36° Celsius betekent dit een huid temperatuur van 45° Celsius. De ernst van de verbranding (graad) is afhankelijk van tot welke huiddiepte de temperatuur met 9 graden stijgt.



Figuur 5-1: Mate van verbranding op basis van relatie tussen oppervlaktetemperatuur van de huid en blootstellingsduur

Zoals in paragraaf 3.1 aangegeven is de blootstellingsduur te bepalen aan de hand van de reactiesnelheid en de verplaatsingssnelheid van een door het incident getroffen persoon. Hierbij dient wel in oogschouw te worden genomen dat als een door het incident getroffen persoon zich heeft verplaatst tot buiten het effectgebied, de temperatuur van de huid niet meteen tot reguliere lichaamstemperatuur is gedaald. Blootstelling aan stoom en/of heet water resulteert namelijk in het doorweekt raken van de kleding van de getroffen persoon met het gevolg dat de warmteoverdracht gedurende het tijdsbestek benodigd voor de kleding om af te koelen tot een temperatuur van maximaal 45° Celsius bijdraagt aan de totale warmte belasting op de huid.

Op basis van de in paragraaf 3.1 beschreven reactie van mensen bij een lekkage, wordt uitgegaan van een reactietijd van 5 seconden en een vluchtsnelheid van 4m/s. Indicatieve berekeningen hebben aangetoond dat afstand tot de temperatuurgrens van 45° Celsius van de stoomwolk georiënteerd is op een afstand variërend van enkele meters tot enkele tientallen meters. Voor de reactietijd plus vluchttijd wordt uitgegaan van 20 seconden; waarbij een persoon 60 meter afstand heeft afgelegd. Er wordt daarmee vanuit gegaan dat personen zich na het afleggen van 60 meter buiten het gebied bevinden dat een stoomwolk omvat; mogelijk door zicht te bewegen in een richting anders dan de benedenwindse dispersierichting (de maximale dispersie afstand). Voor het uitrekken van kleding wordt 100 seconden aangehouden. De totale verwachte blootstellingsduur komt daarmee op 120 seconden. Op basis van Figuur 5-1 wordt daarom voor het letselschadegebied de afstand tot de temperatuur grens van 52° Celsius aangehouden; tweedegraads verbrandingen. Dit bij de aanname dat binnen het tijdsbestek van 120 seconden personen waarvan de oppervlaktetemperatuur van de huid 52° Celsius of hoger is kunnen komen te overlijden.

Vanwege argumentatie in hoofdstuk 4 wordt er in deze studie vanuit gegaan dat (significant) letselschade met in het ernstigste geval overlijden door inademing van stoom optreed bij vergelijkbare of hogere temperaturen. Inademing van stoom is dan ook niet verder in deze studie niet afzonderlijk beschouwd.

### 5.3 Bepaling risico

De huidige software die wettelijk gezien moet worden toegepast voor het bepalen van het risico naar aanleiding van lekkages aan buisleidingen, is (alleen) geschikt om het risico van toxische en/of brandbare

stoffen te berekenen (Safeti-NL en CAROLA). Om toch risico te berekenen is een model gebouwd op basis van een spreadsheet. Dit model is geschikt om een vereenvoudigde risicoberekening uit te voeren voor een 10 kilometer lang buisleidingleidingtracé; het systeem zoals beschreven in hoofdstuk 2. Voor de berekening van het risico wordt ervan uitgegaan dat het een recht tracé betreft (zonder bochten). Alleen het worstcase risico wordt bepaald.

### 5.3.1 Toegepaste weerscondities

In het spreadsheetmodel is een selectie opgenomen van de weerscondities zoals in paragraaf 5.1 beschreven. Dit om het model handzaam te houden. Deze selectie geeft een goed beeld van de verschillende weersconditie die in Nederland voorkomen. De volgende weerscondities zijn opgenomen:

- 3.0/B: Turbulente weersconditie veroorzaakt door bijvoorbeeld bebouwing die de laminaire stroom onderbreken
- 5.0/D Ongeveer de gemiddelde weersconditie in Nederland
- 9.0/D De meest voorkomende weersconditie in Nederland
- 1.5/F Rustige weersconditie die eigenlijk alleen 's nachts voorkomt-

Hoe veel tijd per jaar een bepaalde weersconditie optreedt is bepaald als fractie van het totaal (op jaarbasis). De fractie is gebaseerd op de windrozen zoals gebruikt in Safeti-NL 8.3 voor Nederland. Er is geen onderscheid gemaakt tussen dag en nacht. Dit levert de onderstaande verdeling op. In het model is geen rekening gehouden met de windrichting. Er is besloten om de wind loodrecht op de leiding te modelleren; wederom om het model handzaam te houden. Door deze keuzen zal de bijdrage van een scenario aan het risicoprofiel altijd haaks op de buisleidingloop georiënteerd zijn; dit resulteert in een onderschatting van het risico dicht bij de buisleiding (parallel) een overschatting op grotere afstand (loodrecht).

*Een gedetailleerde risicoberekening volgens het HRB Bevb [5] bevat meer weerscondities en ook afhankelijkheid ten aanzien van windrichting; voor het doel van deze studie, een eenvoudige pr-berekening zoals beschreven in paragraaf 1.2, wordt bovenstaand als toereikend gezien.*

Weersconditie	Fractie
3.0/B	0,13
5.0/D	0,34
9.0/D	0,40
1.5/F	0,14

Tabel 3: Overzicht van weerscondities toegepast voor bepaling van het risicoprofiel

Er is gekozen voor de worst case effectafstand van een verticaal lek.

### 5.3.2 Toegepaste lekfrequenties

De frequenties zijn gebaseerd op de rekenmethodiek voorgeschreven in de HRB Bevb [5]. Er is voor gekozen om de frequenties uit deel D (chemicaliën) te gebruiken, waarbij ervan uit wordt gegaan dat de leiding voldoet aan de stand ter techniek. In tabel 4 staan de basis frequenties.

Faalfrequentie [/km/jaar]				Aandeel (%)	
Faaloorzaak	Breuk	Lek	Totaal	Breuk	Lek
Beschadiging door derden	1,77E-05	2,63E-05	4,40E-05	47,9	21,9
Mechanisch	7,96E-06	3,86E-05	4,66E-05	21,5	32,2
Inwendige corrosie	1,41E-06	1,17E-05	1,31E-05	3,8	9,8
Uitwendige corrosie	4,25E-06	3,52E-05	3,95E-05	11,5	29,3
Natuurlijke oorzaken	2,26E-06	3,60E-06	5,86E-06	6,1	3,0
Operationeel	3,40E-06	4,56E-06	7,96E-06	9,2	3,8
Totaal	3,70E-05	1,20E-04	1,57E-04	100	100

Tabel 4: Overzicht van basis lekfrequenties, overgenomen uit de HRB Bevb [5]

De diepteligging van de leiding wordt verdisconteerd in de faaloorzaak 'Beschadiging door derden' aan de hand van de volgende factor:

$$Faalfrequentie_{Beschadiging\ door\ derden, gecorrigeerd} = \frac{Faalfrequentie_{Beschadiging\ door\ derden}}{factor}$$

$$factor = e^{-2,4 \times (0,84 - z)}$$

waarbij:

z = diepteligging (m).

Voor een diepteligging van 1,2 meter bedraagt de factor 2,4. Dit resulteert in de (gecorrigeerde) faalfrequenties zoals weergegeven in onderstaande tabel. Er is geen correctie toegepast voor (eventuele) andere aanvullende maatregelen omdat deze per locatie zullen verschillen.

Faalfrequentie [/km/jaar]			
Faaloorzaak	Breuk	Lek	Totaal
Beschadiging door derden	7,46E-06	1,11E-05	1,85E-05
Mechanisch	7,96E-06	3,86E-05	4,66E-05
Inwendige corrosie	1,41E-06	1,17E-05	1,31E-05
Uitwendige corrosie	4,25E-06	3,52E-05	3,95E-05
Natuurlijke oorzaken	2,26E-06	3,60E-06	5,86E-06
Operationeel	3,40E-06	4,56E-06	7,96E-06
Totaal	2,67E-05	1,05E-04	1,31E-04

Tabel 5: Overzicht van gecorrigeerde lekfrequenties

### 5.3.3 Kans op overlijden door verbranding

Of een persoon komt te overlijden naar aanleiding van verbranding, is afhankelijk van de leeftijd en het percentage van de huid dat verbrand is. In de PGS-deel 1A [6] is het verband tussen deze parameters gegeven; onderstaande tabel is overgenomen uit dit document en geeft dit verband weer.

%	Leeftijd (jaar)																	
	0-4	5-9	10-14	15-19	20-24	25-29	30-34	35-39	40-44	45-49	50-54	55-59	60-64	65-69	70-74	75-79	80-84	85+
93+	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
88-92	0.9	0.9	0.9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
83-87	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
78-82	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
73-77	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	1	1	1	1	1	1	1	1	1
68-72	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	1	1	1	1	1	1	1	1
63-67	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9	1	1	1	1	1	1	1
58-62	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.9	0.9	1	1	1	1	1	1
53-57	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1	1	1	1	1
48-52	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1	1	1	1
43-47	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.7	0.9	1	1	1	1	1
38-42	0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.6	0.8	0.9	1	1	1	1
33-37	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.5	0.7	0.9	1	1	1	1
28-32	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.5	0.8	0.9	1	1	1
23-27	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.4	0.6	0.8	0.9	0.9	1
18-22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.3	0.5	0.7	0.8	0.8	0.9
13-17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.3	0.5	0.6	0.6	0.7
8-12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4
3-7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2
0-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1

Tabel 6: Overlijdenskans op basis van leeftijd en percentage van het lichaamsoppervlak dat verbrand is

### 5.3.4 Model opbouw

Het model is opgebouwd als rasterstructuur waarbij elke individuele cel een rasterpunt voorstelt. Elk rasterpunt heeft een afmeting van 0,1 bij 0,1 meter. Binnen dit raster is het buisleidingtracé geprojecteerd. Op het tracé wordt om de 0,1 m afstand een lek bron geprojecteerd. Vervolgens wordt voor elk rasterpunt binnen het gehele raster bepaald of de effecten, in termen van lengte en breedte van een stoomwolk op het betreffende rasterpunt komen. Indien dit het geval is wordt een frequentie aan het betreffende rasterpunt toegekend. Voor rasterpunten waar op effecten vanuit meerdere lekbronnen van toepassing zijn, worden de toegewezen frequenties opgeteld; dit geeft het risico binnen het betreffende rasterpunt.

- Omdat het gemodelleerde buisleidingtracé als recht beschouwd is (zonder bochten), is de afstand tussen het tracé en de contouren vanuit elke mogelijk lekkagepunt gelijk. Daarom hoeft niet het gehele tracé van 10 kilometer gemodelleerd te worden, maar volstaat een beperktere lengte.
- De effecten (afstanden) zijn overeenkomstig met de afstanden zoals bepaald voor de warmtebelasting behorend bij het letselschadegebied. Concreet betreffen dit de lengte en breedte van een stoomwolk waarbij de wolk temperatuur tenminste 52° Celsius is.
- In het model is vanuit gegaan dat de wind evenredig uit vier richtingen komt, haaks op het buisleidingtracé en parallel aan het buisleidingtracé (beide van twee kanten).

- De frequentie die aan een rasterpunt wordt toegekend is bepaald op basis van de gecorrigeerde lekfrequentie vermenigvuldigd met de fractie van de weersconditie behorend bij de betreffende stoomwolk (al dan niet een sommatie van frequenties zoals bovenstaand beschreven).
- Conservatief wordt ervan uitgegaan dat ieder persoon die direct wordt getroffen door uittredend warm water/ stoom komt te overlijden; onafhankelijk van leeftijd en percentage lichaamsoppervlak dat verbrand is. Deze aanname wordt mede gedaan omdat het moeilijk is om te bepalen wel percentage van de huid zou verbranden.
- In deze studie wordt ervan uitgegaan dat druppels die uitregenen zijn afgekoeld tot een temperatuur die niet meer significante verbranding kan veroorzaken.
- Het (direct) verbranden van een persoon door contact met de vormende plas, wordt meegenomen als het direct geraakt worden van een persoon door uittredend warm water/ stoom. Het wordt niet realistisch geacht dat een persoon op een later tijdstip in een vormende plas terecht komt. Dit ervan uitgaande dat een persoon wegvlucht voor de vormende plas; gewaarschuwd voor mogelijk gevaar door de stoomvorming.

## 6 Resultaten

### 6.1 Letselschadegebied

#### Verstikking

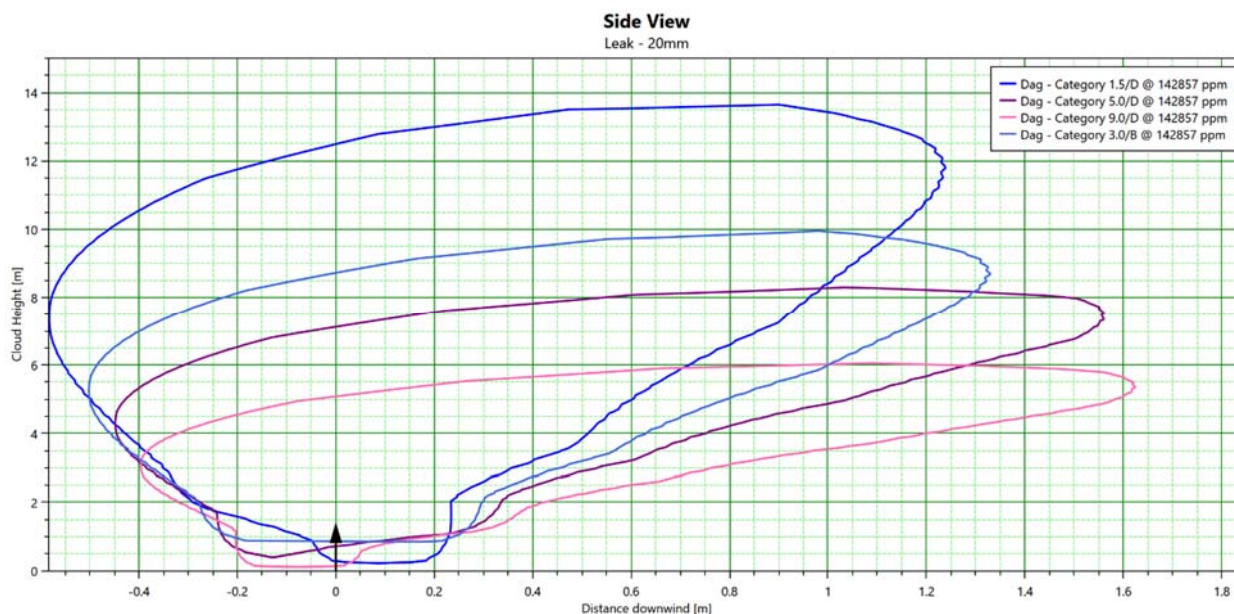
De samenstelling van lucht bij atmosferische condities is voor ca. 78 vol % stikstof, 21 vol % zuurstof en bijna 1 vol % Argon. Om het volume percentage zuurstof af te laten nemen tot 18 volume % moet ca. 14 vol % water worden toegevoegd. De resulterende verhouding wordt daarmee ca. 67 vol % stikstof, 18 vol % zuurstof, ca. 14 vol % water en minder dan 1 vol % Argon. Onderstaande tabel geeft voor de diverse scenario's de afstand tot de dispersie contour waarbinnen het volume percentage zuurstof lager is dan 18% en waarbij het gevaar voor verstikking kan optreden indien een persoon binnen deze contour blijft staan. Na deze tabel volgt een afbeelding van de dispersiecontouren voor het 20 mm lek scenario bij dag.

Bij de resultaten dient wel te worden opgemerkt dat het door de auteurs van deze rapportage onwaarschijnlijk wordt geacht dat een persoon binnen deze contouren blijft staan; dit gezien de ervaring van fysieke pijn door de overdracht van warmte van warm water/ stoom naar het lichaam en de ervaring van benauwdheid. Daarnaast is de 18% een conservatieve aannamen waarbij men niet onmiddellijk onwel zal worden of overlijden. Verstikking door verdringing van zuurstof wordt dan ook niet als een reëel scenario beschouwd.

Scenario	Dag/ Nacht	Weerscondities voor max afstand tot 18 vol % contour	max afstand tot 18 vol % contour
1 mm gat	Dag	Niet bereikt	Niet bereikt
	Nacht	Niet bereikt	Niet bereikt
20 mm gat	Dag	9.0/D	< 1m
	Nacht	9.0/D	< 1m
50 mm gat	Dag	9.0/D	< 1m
	Nacht	9.0/D	< 1m
Leidingbreuk	Dag	3.0/B	≈ 7m
	Nacht	5.0/D	< 5m

Tabel 7: Afstanden tot dispersiecontouren waarbinnen het volume percentage zuurstof minder dan 18% is.





Figuur 6-1: 20 mm lek - Dispersiecontour waarbinnen het volume percentage zuurstof minder dan 18% is<sup>2</sup>.

### Warmte belasting dodelijke slachtoffers

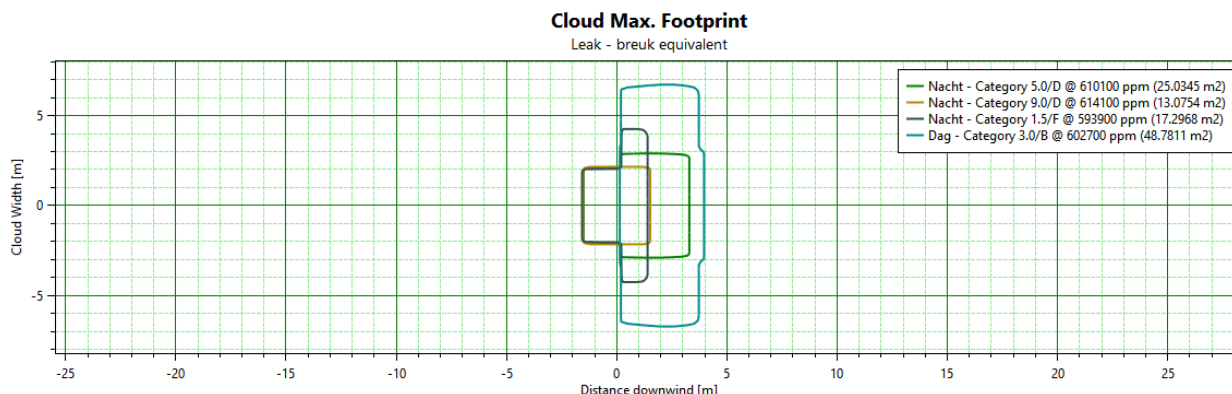
Phast berekent de temperatuur van de stoom in de wolk. Phast rapporteert echter niet direct de temperatuur op een specifieke hoogte. Phast geeft echter wel de concentratie die bij de temperatuur behoort. Aan de hand van deze concentratie is de contour bepaald. In bijlage 3 staan de concentraties weergegeven.

Onderstaande tabel geeft voor de diverse scenario's de afstand tot de contour waarbinnen de temperatuur van het water/ stoom 52° Celsius is; de contour waarbinnen het gevaar voor tweedegraads brandwonden bestaat. Na deze tabel volgt een afbeelding van contouren van de concentratie die bij 52°C Celsius hoort.

Scenario	Dag/ Nacht	Weerscondities voor wolk met max afstand tot 52° Celsius	Max afstand tot 52° Celsius	Max breedte tot 52° Celsius
1 mm gat	Dag	-	Niet bereikt	Niet bereikt
	Nacht	-	Niet bereikt	Niet bereikt
20 mm gat	Dag	-	Niet bereikt	Niet bereikt
	Nacht	-	Niet bereikt	Niet bereikt
50 mm gat	Dag	-	Niet bereikt	Niet bereikt
	Nacht	-	Niet bereikt	Niet bereikt
Leidingbreuk	Dag	3B	4.0	13.4
	Nacht	5D	3.3	5.8

Tabel 8: Afstanden tot dispersiecontour waarbinnen de temperatuur van het water/ stoom 52° Celsius is.

<sup>2</sup> Deze dispersiecontour is gelijk aan de dispersiecontour van water / stoom tot ca 14 volume procent; overeenkomstig met 142857 ppm)



Figuur 6-2: Verticale breuk - Dispersiecontour waarbinnen de temperatuur hoger dan 52° Celsius is.

In bijlage 3 staan de overige contouren weergegeven.

De resultaten laten zien dat contouren rond de lekken zeer beperkt zijn en 1 meter boven maaiveld niet halen. Er kan dus van uit worden gegaan dat de kleine lekken niet tot dodelijke slachtoffers zal leiden. Het kan echter wel zijn dat er gewonden vallen door dat de stoom de benen van omstanders raakt en er op een beperkt lichaamsoppervlakte brandwonden ontstaan.

De breuk scenario's laten grotere afstanden tot ruim 4 meter benedenwinds en ruim 13 meter breedte zien, waarbij er van uit mag gegaan worden dat mensen volledig worden geraakt en komen te overlijden als gevolg van brandwonden over een groot oppervlakte van het lichaam.

De stoomwolk is redelijk smal rond 1 m boven het maaiveld, maar wordt op grotere hoogte breder en zal grotere afstanden halen tot meer dan 100 m bij weersconditie 1,5F. De wolk zal dus ook op grotere afstand zichtbaar zijn. Er is dan ook te verwachten dat er water zal uitregenen tot grote afstanden. Dit water zal echter afgekoeld zijn tegen de tijd dat het de grond heeft bereikt en wordt als niet gevaarlijk beschouwd. Daarnaast zal de plas zich verspreiden; er is van uit gegaan dat de mensen zich in veiligheid hebben kunnen stellen zodra ze de plas waarnemen.

In bijlage is de rapportage van Phast toegevoegd.

### Warmte belasting plas

Naast de dodelijke slachtoffers als gevolg van stoom is er een kans op brandwonden als gevolg het hete water wat vrij komt. De brandwonden zullen zich beperken tot de plekken waar het hete water de huid kan raken dit zal naar verwachting alleen de voeten zijn met mogelijk spetters over blote huid als gevolg van opspattend heet water tijdens vlucht.

Voor de kleine lekken geldt dat de plas zich langzaam opbouwt en er wordt verwacht dat mensen de pas zien vormen en op tijd kunnen ontsnappen.

Voor medium, grote lekken en breuken kan zich een plasvormen met een zere grote diameter. De temperatuur van de plas zal echter snel afnemen en op de grote afstand niet hoog genoeg zijn om brandwonden te veroorzaken. Op korte afstand van de lek zullen er hogere temperatuur zijn. De plas zal zich snel vormen en het is mogelijk dat personen in de nabijheid van de plas verrast worden. Deze personen zullen mogelijk gewond raken aan hun voeten en er kunnen mogelijk brandwonden als gevolg



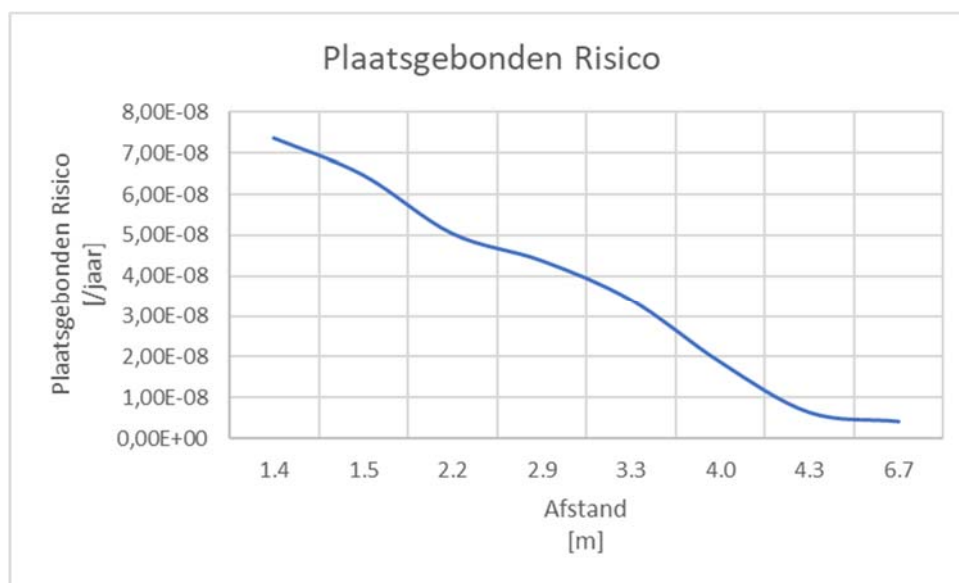
van opspattend water zijn, maar het is niet te verwachten dat de brandwonden dodelijk zijn. Na de initiële incident zal men snel weg lopen van de plas en het is niet te verwachten dat men dan nog gewond raakt.

## 6.2 Plaatsgebonden risico

Omdat het gemodelleerde buisleidingtracé als recht beschouwd is (zonder bochten), is de afstand tussen het tracé en de contouren vanuit elke mogelijk lekkagepunt gelijk. Onderstaande tabel geeft afstanden van het middelpunt van het leidingtracé weer tot waar mensen kunnen komen te overlijden en de bijbehorende frequentie.

Tabel 9 Plaatsgebonden Risico

Afstand tot overlijden [m]	Frequentie van overlijden [-/jaar] (=PR contour)
1.4	7,36E-08
1.5	6,47E-08
2.2	5,04E-08
2.9	4,38E-08
3.3	3,41E-08
4.0	1,88E-08
4.3	6,48E-09
6.7	4,26E-09



Figuur 3 Plaatsgebonden Risico

De resultaten laten zien dat de worden dat de  $10^{-6}$  en  $10^{-7}$  contouren niet worden gehaald. De lek scenario's hebben een zeer beperkte effect afstand waardoor deze geen contour geven. Het plaatsgebonden risico wordt in zijn geheel bepaald door de breuk scenario's.

## 7 Samenvatting en conclusies

Op basis van de uitgevoerde studie wordt geconcludeerd dat het gevaar voor mensen bij het vrijkomen van heet water en stoom bepaald wordt door de mogelijkheid tot (ernstige) brandwonden. Verstikking door verdringing van zuurstof door stoom/ waterdamp wordt niet als een reëel gevaar beschouwd. Dit gebaseerd op de aanname dat personen niet binnen een dispersiecontour blijft staan, waarbinnen het volume procent zuurstof in de atmosfeer lager is dan 18 vol %, gezien het ervaren van fysieke pijn door de overdracht van warmte van de wolk naar het lichaam en de ervaring van benauwdheid.

Op hoofdlijnen kan gesteld worden dat effectafstanden ten aanzien van warmtebelasting zich rond de lekken zeer beperkt zijn en 1 meter boven maaiveld niet halen. Er kan dus van uit worden gegaan dat de kleine lekken niet tot doden zal leiden. Het kan echter wel zijn dat er gewonden vallen door dat de stoom de benen van omstanders raakt en er op een beperkt lichaamsoppervlakte brandwonden ontstaan. Daarnaast zal er een plas vormen met een initieel hoge temperatuur rond de lek, die snel zal afnemen met afstand. De plas bouwt langzaam op en er wordt verwacht dat mensen de pas zien vormen en op tijd kunnen ontsnappen.

De breuk scenario's laten grotere afstanden tot ruim 4 meter benedenwinds en ruim 13 meter breedte zien, waarbij er van uit mag gegaan worden dat mensen volledig worden geraakt en komen te overlijden als gevolg van brandwonden over een groot oppervlakte van het lichaam.

Er kan zich een plasvormen met een zere grote diameter. De temperatuur van de plas zal echter op de grote afstand niet hoog genoeg zijn om brandwonden te veroorzaken. Op korte afstand van de lek zullen er hogere temperatuur zijn de plas zal zich zeer snel vormen en het is mogelijk dat personen in de nabijheid van de plas verrast worden. Deze personen zullen mogelijk gewond raken aan hun voeten en er kunnen mogelijk brandwonden als gevolg van opspattend water zijn, maar het is niet te verwachten dat de brandwonden dodelijk zijn.

Ten aanzien van het plaatsgebonden risico kan gesteld worden dat de  $10^{-6}$  en  $10^{-7}$  contouren niet worden gehaald. De lek scenario's hebben een zeer beperkte effect afstand waardoor deze geen contour geven. Het plaatsgebonden risico wordt in zijn geheel bepaald door de breuk scenario's.

## Verklarende woordenlijst

Num mer	Beschrijving
1	Gasunie, Uitvoeringsplan Gasunie Leiding door het Midden, versie 1.2 Definitief, 18 december 2019
2	Stichting Koninklijk Nederlands Normalisatie Instituut, NEN 3650-1:2020(nl) Eisen voor buisleidingsystemen - Deel 1: Algemene eisen, januari 2020
3	Stichting Koninklijk Nederlands Normalisatie Instituut, NEN 3650-1:2020(nl) Eisen voor buisleidingsystemen - Deel 2: Aanvullende eisen voor leidingen van staal, januari 2020
4	Email van Heidi de Rooij-Mol (Gaunie) aan Marcel Tichelhoven (Royal HaskoningDHV), Onderwerp: Doc2478404598 - Analyse Warmwaterleiding ZH-effecten bij falen, 29 juni 2020
5	Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Handleiding Risicoberekeningen Besluit externe veiligheid buisleidingen, versie 3.1, 1 april 2020
6	Royal HaskoningDHV, Risk management plan for Diemen heat distribution pipelines, 2019
7	Rijksoverheid, Arbeidsomstandighedenbesluit, Geldend van 01-07-2020 t/m heden
8	<a href="https://brandwondenstichting.nl/brandwonden/">https://brandwondenstichting.nl/brandwonden/</a>
9	PGS-beheerorganisatie, Publicatierreeks Gevaarlijke Stoffen 1 - Deel 1A: Effecten van brand op personen, december 2003
10	<a href="https://richtlijnendatabase.nl/richtlijn/eerste_opvang_brandwondpatienten_acute_fase/intubatie_1e_opvang_brandwondpatienten/indicatie.html">https://richtlijnendatabase.nl/richtlijn/eerste_opvang_brandwondpatienten_acute_fase/intubatie_1e_opvang_brandwondpatienten/indicatie.html</a>
11	



## Acronyms

Acronym	Acronym description
---------	---------------------



## Verklarende woordenlijst

Glossary Term

Glossary Text



## BIJLAGE I – Incidenten met warmtedistributie netwerken

In de onderstaande linken zijn enkele voorbeelden met foto's van incidenten met warmtedistributie netwerken.

Stoom uit de grond in Amsterdam Zuid

Bron: <https://www.at5.nl/artikelen/175457/stoom-uit-de-grond-in-zuid>,

Schade aan stadsverwarmingsleiding in de Hoogstraat in Rotterdam door boorwerkzaamheden.

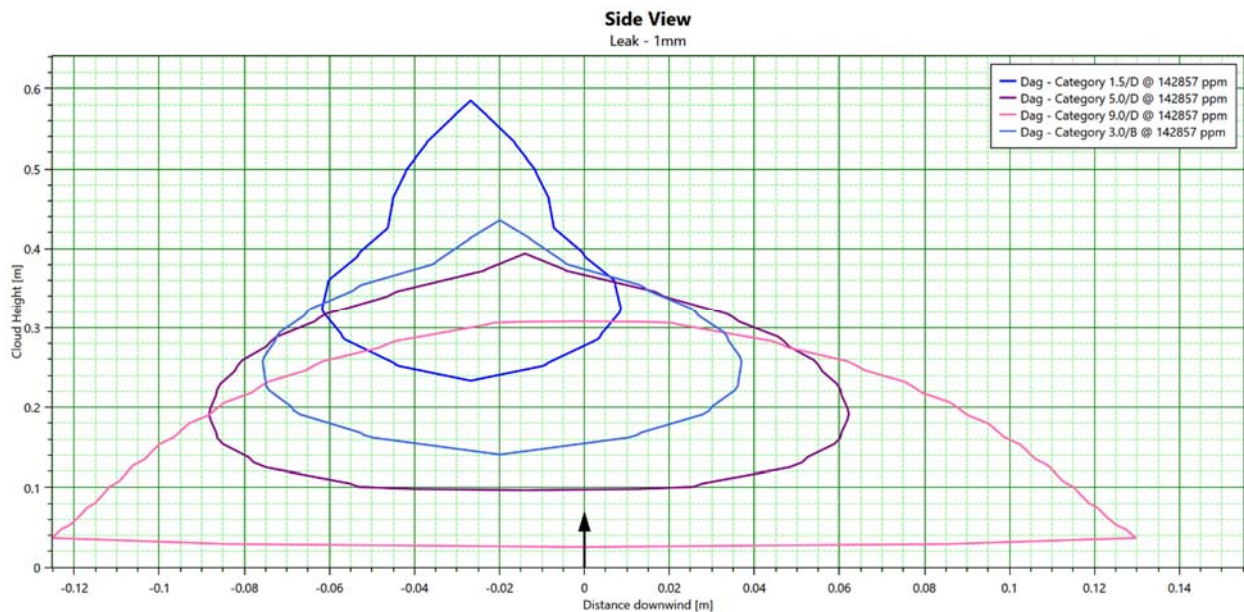
Bron: <https://dagblad010.nl/algemeen/grote-lekkage-in-centrum-na-werkzaamheden>,

Lekkage van stadsverwarming leiding ter hoogte van de parkeerplaats Hespelaar bij het tankstation aan de A59 bij Den Hout

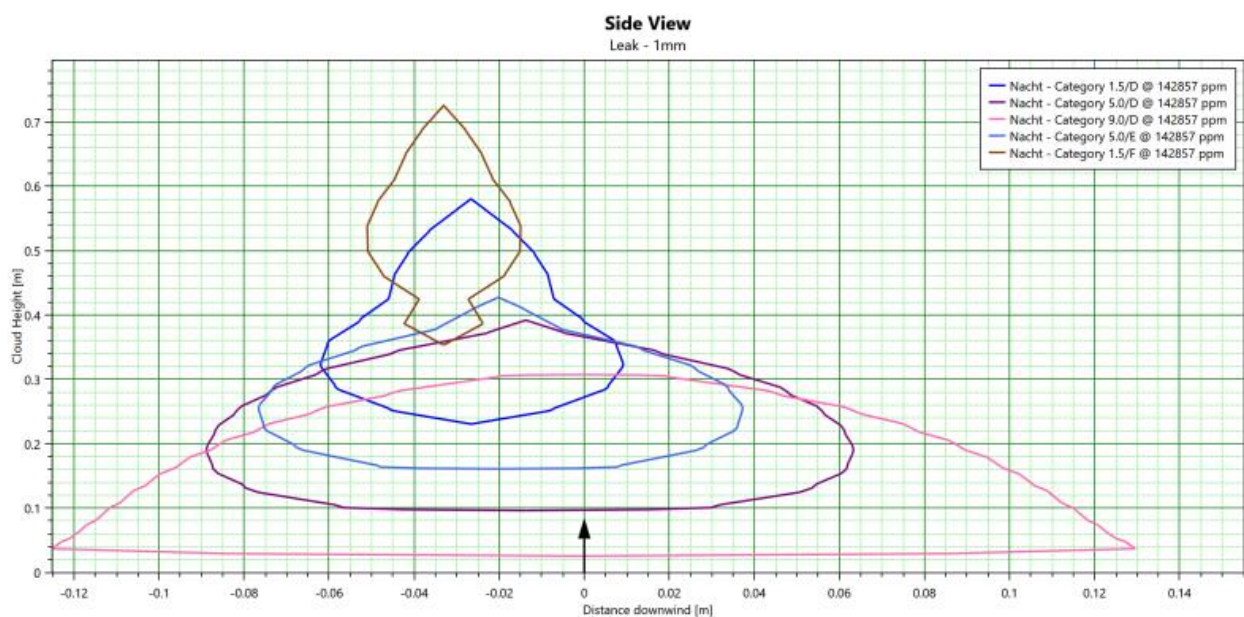
Bron: <https://www.ad.nl/oosterhout/lekkage-in-leiding-stadsverwarming-den-hout-parkeerplaats-aan-a59-afgesloten~a5e8b98d/?referrer=https://www.google.com/>

## BIJLAGE II – Dispersiecontouren verstikkingsgebieden

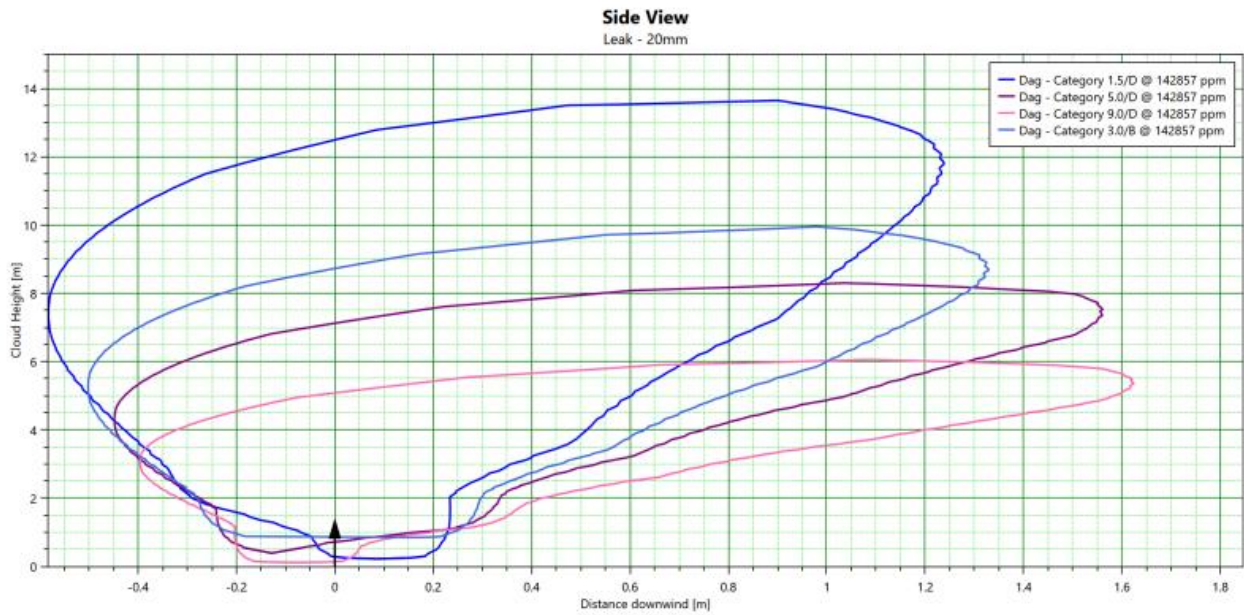
Onderstaande afbeeldingen geven de dispersiecontouren waarbinnen het volume percentage zuurstof minder dan 18 is en waarbij het gevaar voor verstikking bestaat indien een persoon in deze contour aanwezig is. Deze dispersiecontouren zijn gelijk aan de dispersiecontouren van water/ stoom tot ca 14 volume procent; overeenkomstig met 142857 ppm)



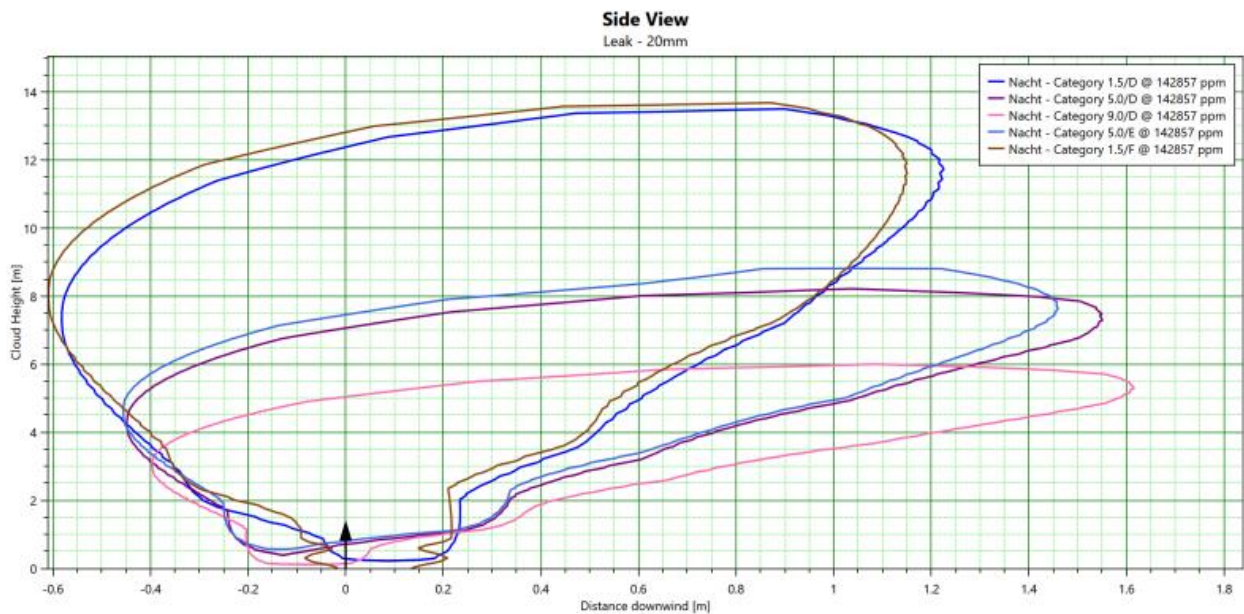
Figuur 7-1: 1mm lek – Dispersiecontouren bij dag



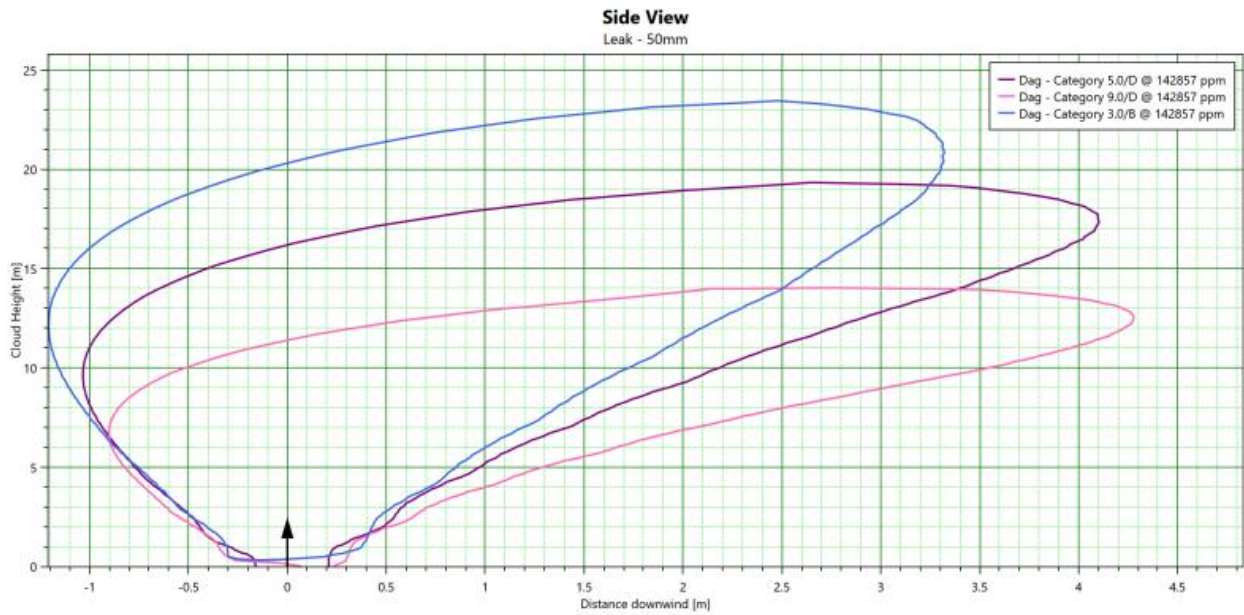
Figuur 7-2: 1mm lek – Dispersiecontouren bij nacht



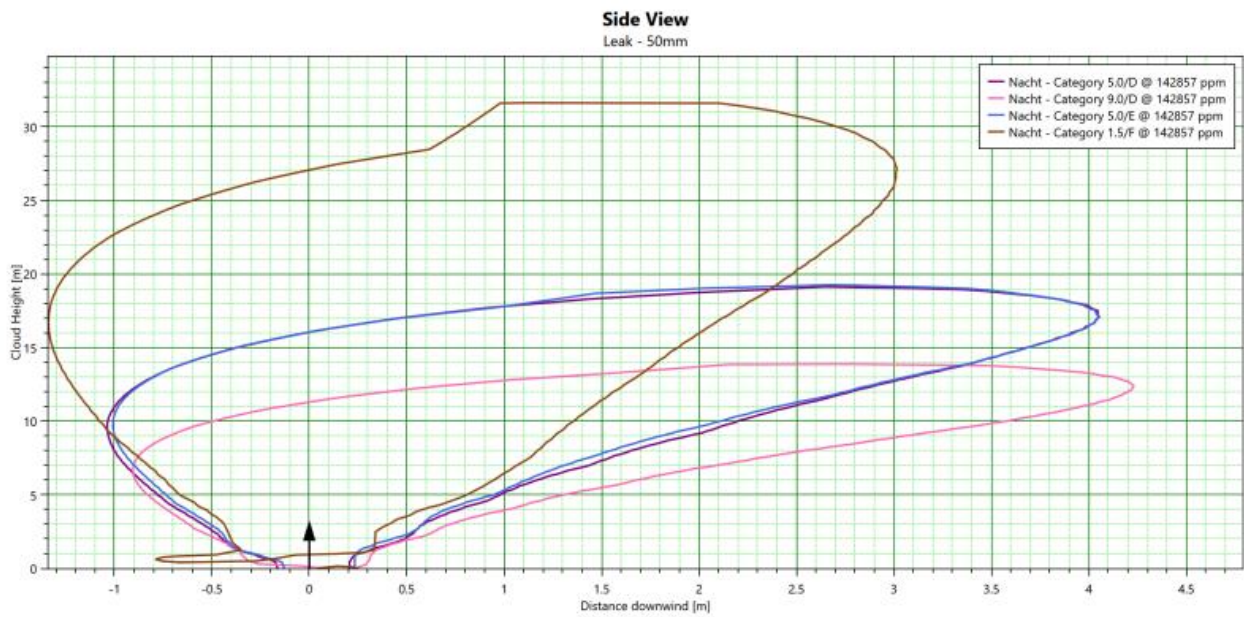
Figuur 7-3: 20mm lek – Dispersiecontouren bij dag



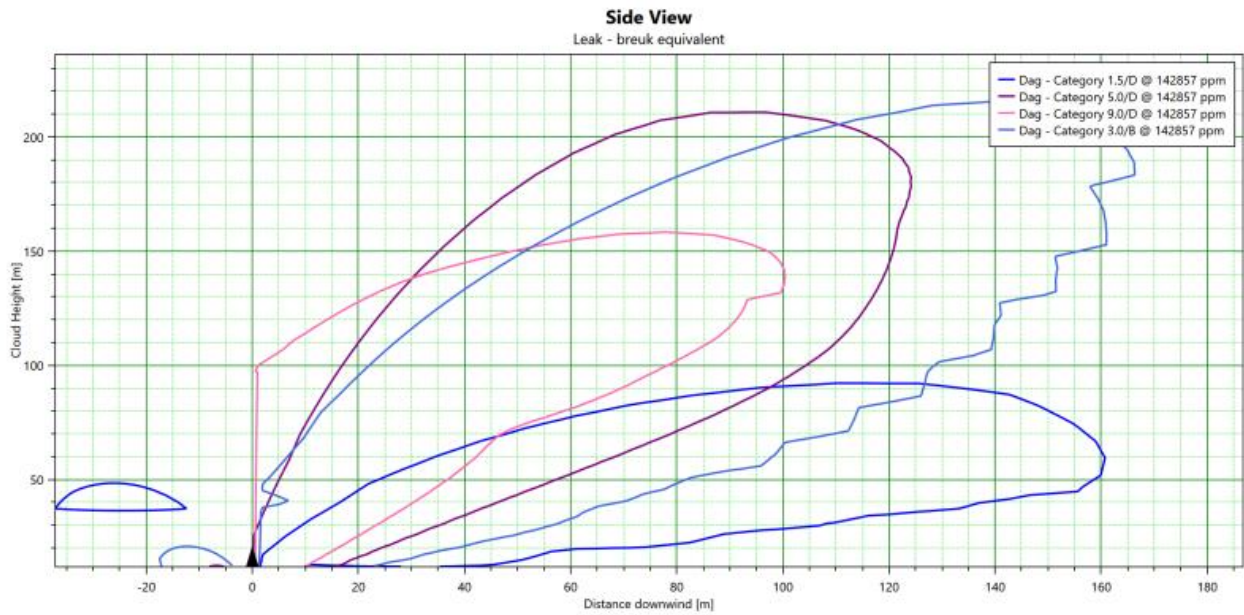
Figuur 7-4: 20mm lek – Dispersiecontouren bij nacht



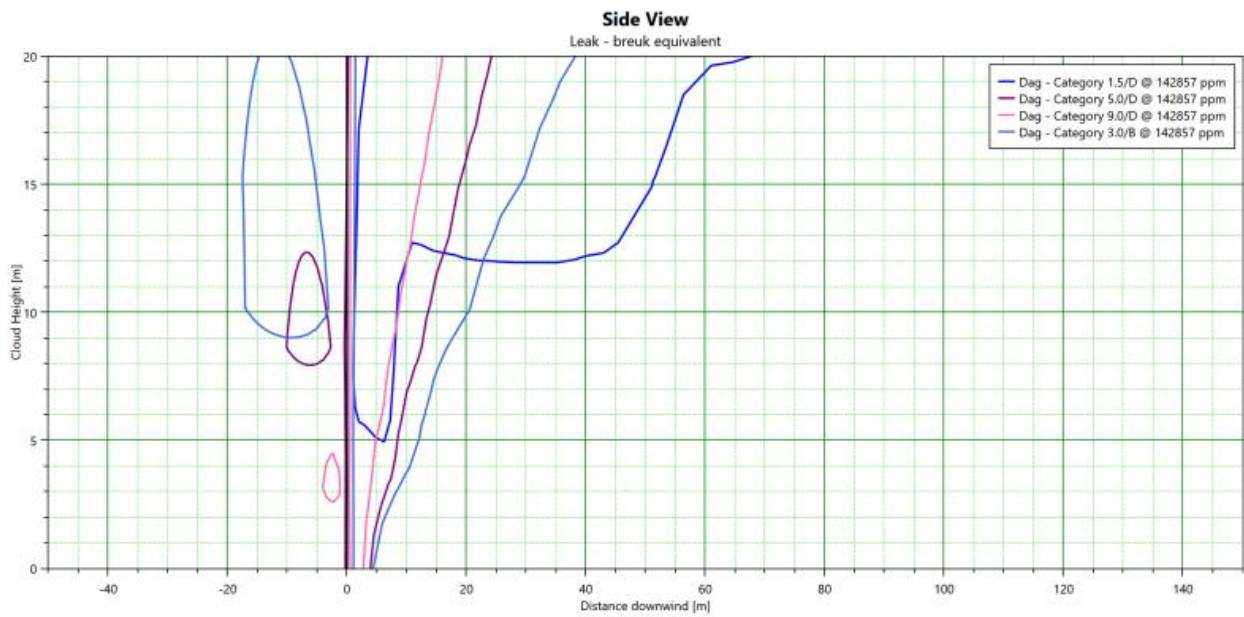
Figuur 7-5: 50mm lek – Dispersiecontouren bij dag



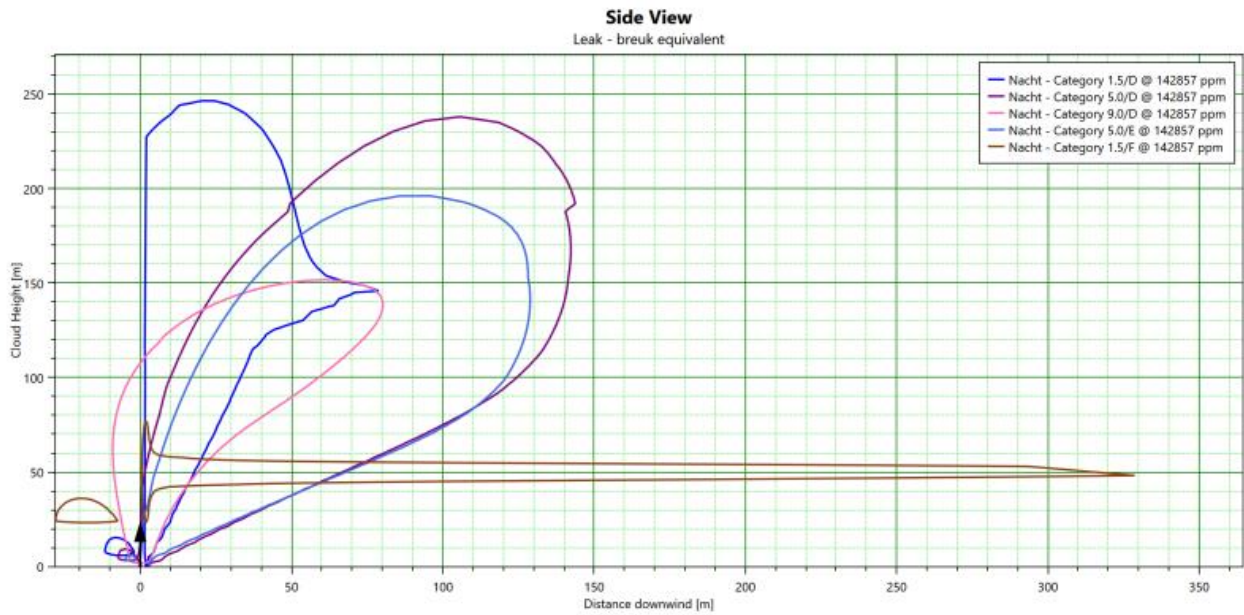
Figuur 7-6: 50mm lek – Dispersiecontouren bij dag



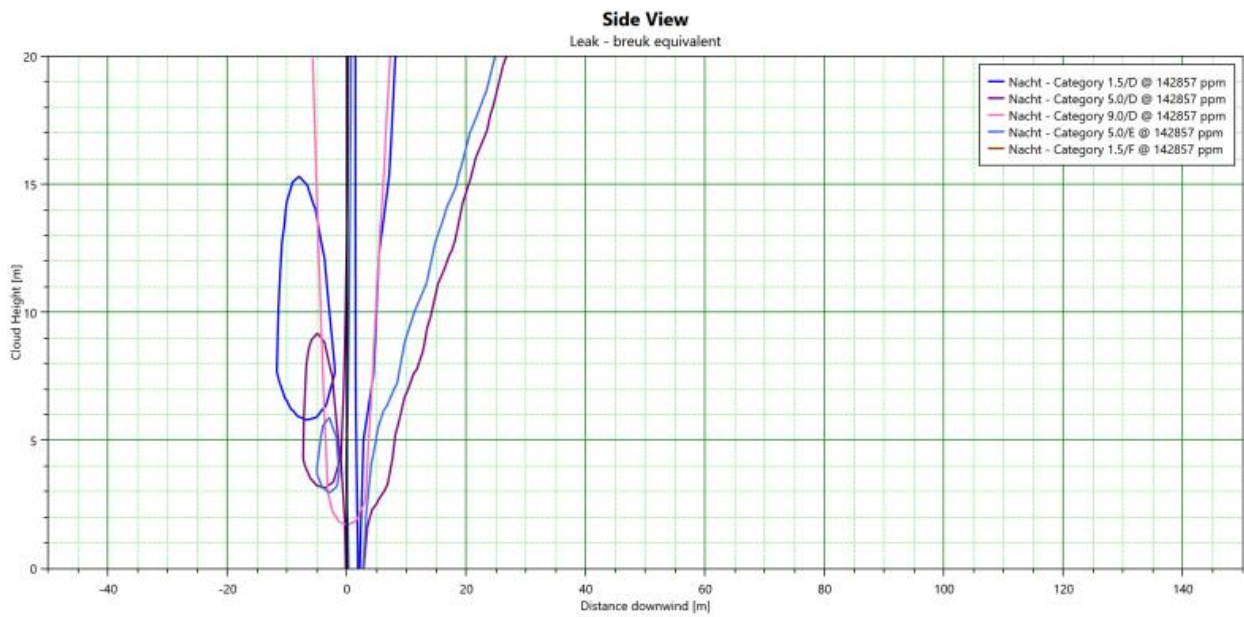
Figuur 7-7: Breuk – Dispersiecontouren bij dag



Figuur 7-8: Breuk – Dispersiecontouren bij dag - ingezoomd



Figuur 7-9: Breuk – Dispersiecontouren bij nacht



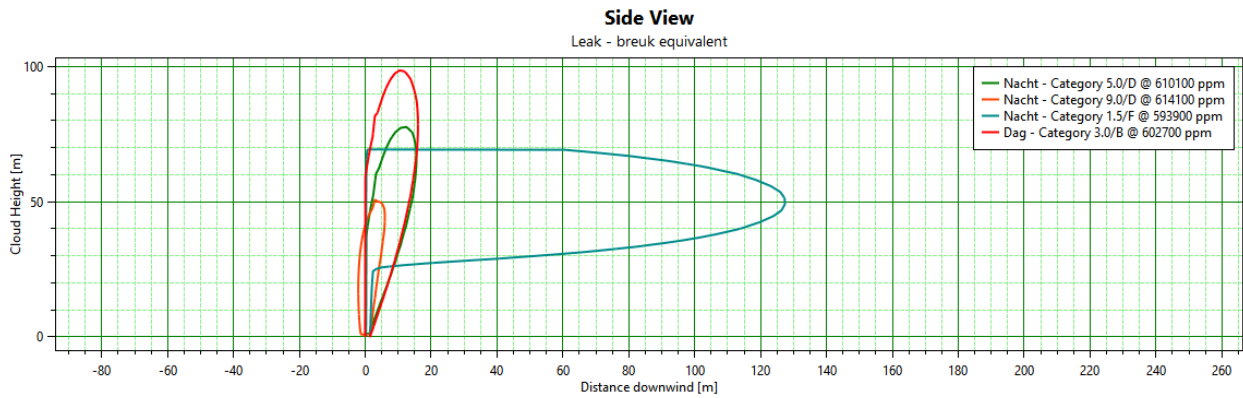
Figuur 7-10: Breuk – Dispersiecontouren bij nacht - ingezoomd

## BIJLAGE III – Dispersiecontouren Warmte

In de onderstaande tabel staat de effect afstanden weergegeven voor de contour tot 52°C.

Uitstroom richting	Gat grootte [mm]	weersconditie	Concentratie [ppm]	Maximale effect afstand [m]	Maximale breedte [m]
Verticaal	1	3B	559600	<1	<1
		5D	569000	<1	<1
		9D	555600	<1	<1
		1,5F	590200	<1	<1
	20	3B	693600	<1	<1
		5D	713300	<1	<1
		9D	716400	<1	<1
		1,5F	696800	<1	<1
	50	3B	659400	<1	<1
		5D	673100	<1	<1
		9D	683700	<1	<1
		1,5F	658800	<1	<1
	Full bore	3B	602700	4.0	13.4
		5D	610100	3.3	5.8
		9D	614100	1.5	4.4
		1,5F	593900	1.4	8.6
45 graden	1	3B	565000	<1	<1
		5D	576200	<1	<1
		9D	563600	<1	<1
		1,5F	593700	<1	<1
	20	3B	706600	<1	<1
		5D	723000	<1	<1
		9D	724200	<1	<1
		1,5F	711900	<1	<1
	50	3B	675500	2.5	0.2
		5D	687400	2.4	0.2
		9D	692500	2.4	0.2
		1,5F	678800	<1	<1
	Full bore	3B	600600	4.0	5.4
		5D	605100	4.1	5.4

Uitstroom richting	Gat grootte [mm]	weersconditie	Concentratie [ppm]	Maximale effect afstand [m]	Maximale breedte [m]
		9D	608100	4.3	5.4
		1,5F	591200	3.6	5.4

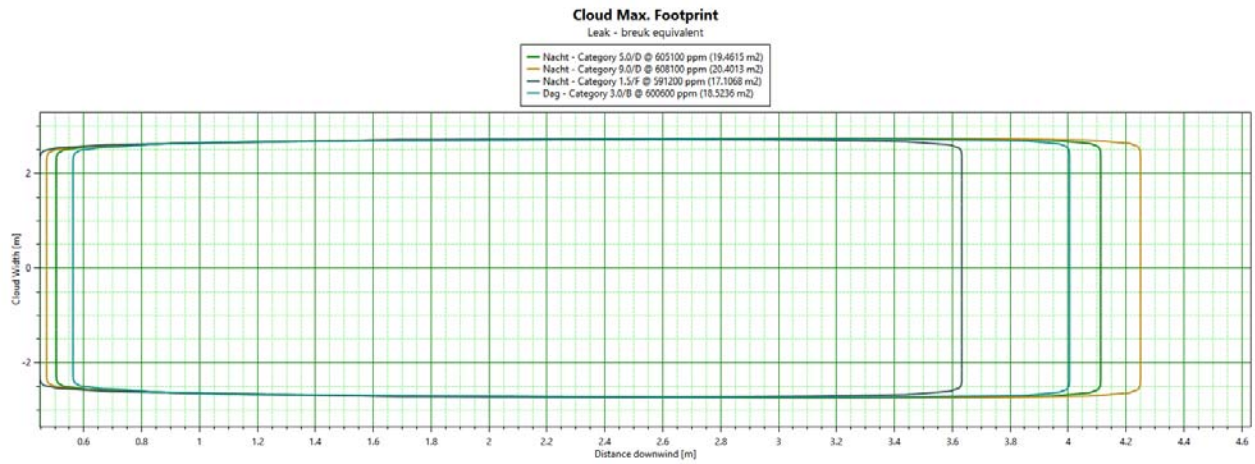


Figuur 7-11 Zijaanzicht verticale breuk

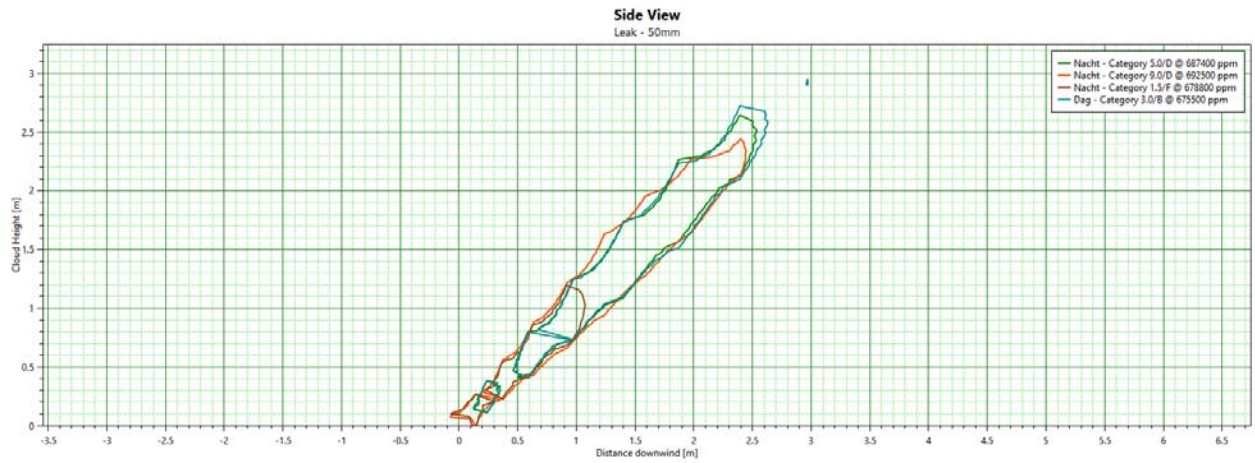


Figuur 7-12 Zijaanzicht 45 graden breuk

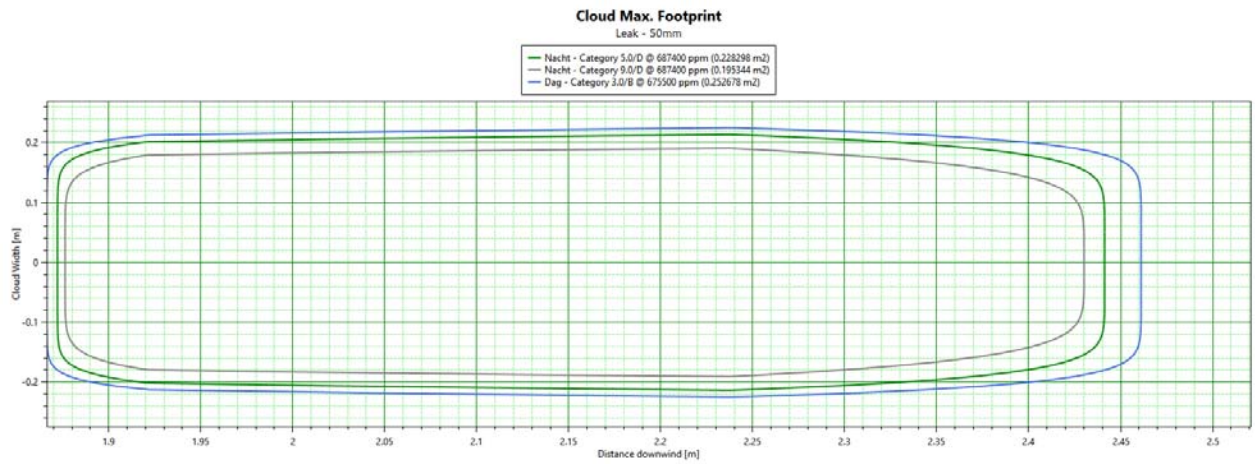




Figuur 7-13 Boven aanzicht breuk 45 graden op 1.2 meter boven maaiveld.



Figuur 7-14 Zijaanzicht 45 graden 50 mm lek



Figuur 7-15 Boven aanzicht 50 mm lek 45 graden op 1.2 meter boven maaiveld.



## BIJLAGE IV – Rapportage



Dispersion  
results.docx



Royal HaskoningDHV is an independent, international engineering and project management consultancy with over 138 years of experience. Our professionals deliver services in the fields of aviation, buildings, energy, industry, infrastructure, maritime, mining, transport, urban and rural development and water.

Backed by expertise and experience of 6,000 colleagues across the world, we work for public and private clients in over 140 countries. We understand the local context and deliver appropriate local solutions.

We focus on delivering added value for our clients while at the same time addressing the challenges that societies are facing. These include the growing world population and the consequences for towns and cities; the demand for clean drinking water, water security and water safety; pressures on traffic and transport; resource availability and demand for energy and waste issues facing industry.

We aim to minimise our impact on the environment by leading by example in our projects, our own business operations and by the role we see in “giving back” to society. By showing leadership in sustainable development and innovation, together with our clients, we are working to become part of the solution to a more sustainable society now and into the future.

Our head office is in the Netherlands, other principal offices are in the United Kingdom, South Africa and Indonesia. We also have established offices in Thailand, India and the Americas; and we have a long standing presence in Africa and the Middle East.



[royalhaskoningdhv.com](http://royalhaskoningdhv.com)

