



Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

Safeti-NL versie 9.2

nieuwe versie rekensoftware voor omgevingsveiligheid

**Safeti-NL versie 9.2 – nieuwe versie
rekensoftware voor omgevingsveiligheid**

RIVM-rapport 2025-0035

Colofon

© RIVM 2025

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), de titel van de publicatie en het jaar van uitgave.

DOI 10.21945/RIVM-2025-0035

Y.G. Geertzema (auteur), RIVM
C.E. Pompe (auteur), RIVM
P.A.M. Uijt de Haag (auteur), RIVM

Contact:
Yannick Geertzema
Veiligheid/Omgevingsveiligheid
Omgevingsveiligheid@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat in het kader van het project Nieuw EV Rekeninstrumentarium (NERI, M/123003/24/NE)

Dit is een uitgave van:
**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**
Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven
Nederland
www.rivm.nl

Publiekssamenvatting

Safeti-NL versie 9.2 – nieuwe versie rekensoftware voor omgevingsveiligheid

Het gebruik, de productie, de opslag en het transport van gevaarlijke stoffen kan risico's hebben voor de omgeving. Bijvoorbeeld als er door een incident een gifwolk vrijkomt of brand ontstaat. Daarom wordt berekend tot welke afstand deze activiteiten bij een incident voor dodelijke slachtoffers kunnen zorgen. In delen van dit gebied zal de kans op een incident en het effect daarvan (het risico) te groot zijn. In deze delen mogen geen nieuwe scholen, woningen of ziekenhuizen worden gebouwd.

Voor bedrijven en transportleidingen met gevaarlijke stoffen worden de risico's berekend met een softwarepakket: Safeti-NL. De uitkomsten van Safeti-NL worden gebruikt voor de vergunningverlening en ruimtelijke ordening. Het RIVM heeft een nieuwe versie uitgebracht, die sinds januari 2025 in gebruik is. Het RIVM beheert Safeti-NL en heeft de verschillen tussen de vorige en de nieuwe versie beschreven. De uitkomsten verschillen heel weinig.

De nieuwe versie is makkelijker in het gebruik en kan de risico's sneller berekenen. Nieuwe technische functies maken het mogelijk om gegevens over buisleidingen met aardgas automatisch in te voeren. De software is daarmee een voorbereiding voor wet- en regelgeving die voor juli 2026 is gepland. Safeti-NL wordt dan het programma om risico's van buisleidingen met aardgas te berekenen.

Kernwoorden: omgevingsveiligheid, Safeti-NL, rekensoftware, gevaarlijke stoffen, risico

Synopsis

Safeti-NL version 9.2 – new version of modelling software for environmental safety

The use, production, storage and transport of hazardous substances can pose risks for the environment, for example if a toxic cloud is released or a fire erupts following an incident. For this reason, software is used to model the area in which an incident involving hazardous substances can result in fatalities. In some parts of this area, the chance of an incident and its effects (i.e. the risk) is too great for the construction of new schools, homes or hospitals.

The risks for businesses and transport pipelines using hazardous substances are modelled using the software package Safeti-NL. The outcomes of Safeti-NL modelling are used for licensing and spatial planning. The National Institute for Public Health and the Environment (RIVM) has released a new version, which has been in use since January 2025. As the administrator of Safeti-NL, RIVM has created an overview of the differences between the previous and the current version. In terms of outcomes, the differences are minimal.

The new version is more user-friendly and capable of faster risk modelling. New technical features make it possible to feed data on natural gas pipelines into the model automatically. This is to prepare the software for the entry into force of new legislation and regulations, which is currently foreseen for July 2026. As from that moment, Safeti-NL will be used to model the risks associated with natural gas pipelines.

Keywords: environmental safety, Safeti-NL, modelling software, hazardous substances, risk

Inhoudsopgave

Samenvatting — 9

1 Inleiding — 11

2 Modelverschillen Safeti-NL versie 9.2 en versie 8.3, RBM II en CAROLA — 13

- 2.1 Verschillen Safeti-NL versie 8.3 en versie 9.2 — 13
- 2.1.1 DIPPR 2018-database — 13
- 2.1.2 Een verbeterd model voor fakkels van waterstofgasbranden — 13
- 2.1.3 Een verbeterd model voor de uitstroming en verspreiding van koolstofdioxide uit ondergrondse buisleidingen — 14
- 2.1.4 Een verbeterd model voor verspreiding van zware gassen — 14
- 2.1.5 Een verbeterd model voor verticale uitstroming — 14
- 2.1.6 Overige verschillen — 14
- 2.2 Verschillen Safeti-NL versie 9.2 en RBM II — 15
- 2.3 Verschillen Safeti-NL versie 9.2 en CAROLA — 15
- 2.3.1 Faalfrequentie — 16
- 2.3.2 Effectmodellering — 16

3 Nieuwe functionaliteiten Safeti-NL versie 9.2 — 17

- 3.1 Specifieke studies voor vervoer gevaarlijke stoffen en buisleidingen — 17
- 3.2 Verbeteringen in de uitvoer — 17
- 3.3 FN-curve per km — 17
- 3.4 Parallelle routes — 17
- 3.5 Update stoffen — 17
- 3.6 Hogedruk aardgasleidingen — 18
- 3.6.1 Uitstroomtijd bij vertraagde ontsteking van aardgas — 19
- 3.6.2 Diepteligging bij de effectmodellering — 19

4 Verdieping consequentieonderzoek — 21

- 4.1 Algemene bevindingen uit het AVIV onderzoek — 21
- 4.1.1 Bedrijven — 21
- 4.1.2 Buisleidingen — 22
- 4.1.3 Vervoer gevaarlijke stoffen — 22
- 4.2 PGS15 onverbrand product — 23
- 4.3 Hogedruk aardgasleidingen — 24
- 4.3.1 18 inch leiding — 24
- 4.3.2 36 inch leiding — 25
- 4.4 Buisleidingen met koolstofdioxide — 26
- 4.5 Samenvatting — 26

5 Acceptatietest Safeti-NL versie 9.2 — 29

- 5.1 Nieuwe functionaliteiten — 29
- 5.2 Verschil in uitkomsten tussen Safeti-NL versie 8.8 en versie 9.2 — 29
- 5.2.1 Benchmark studie — 29
- 5.2.2 Resultaten van de vergelijking — 31

6 Conclusies en aanbevelingen — 33

Referenties — 35

7 Bijlage 1 Overzicht aanwezige stoffen in Safeti-NL 9.2 — 37

8 Bijlage 2 Wijziging uitgangspunten hogedruk aardgasleidingen — 41

- 8.1 Uitstroomtijd bij vertraagde ontsteking van aardgas — 41
- 8.2 Diepteligging bij de effectmodellering — 45

9 Bijlage 3 Verdieping consequentieonderzoek buisleidingen met koolstofdioxide — 51

- 9.1.1 Methode — 51
- 9.1.2 Resultaten — 51
- 9.1.3 Toekomstige ontwikkelingen — 53

Samenvatting

Voor het berekenen van de externe veiligheidsrisico's van milieubelastende activiteiten met gevaarlijke stoffen die opgenomen zijn in Bijlage VII van het Besluit kwaliteit leefomgeving (Bkl) zijn rekenmethoden voorgeschreven. Een rekenmethode bestaat uit een rekenvoorschrift in combinatie met rekensoftware. De rekensoftware betreft RBM II voor het berekenen van de risico's van het vervoer van gevaarlijke stoffen over het basisnet, CAROLA voor het berekenen van de risico's van hogedruk aardgasleidingen en Safeti-NL voor het berekenen van de risico's van stationaire activiteiten en ondergrondse buisleidingen voor andere stoffen dan aardgas.

Vanaf 1 januari 2025 is Safeti-NL versie 9.2 voorgeschreven in de Omgevingsregeling. Deze versie vervangt Safeti-NL versie 8.3, die tot 1 januari 2025 was voorgeschreven. Aanleiding om over te gaan op een nieuwe versie van Safeti-NL was dat het bestaande contract uit 2006 met DNV, de leverancier van de rekensoftware Safeti-NL, begin 2025 afloopt. Het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat heeft daarom een nieuw contract met DNV afgesloten voor het gebruik van Safeti-NL in 2025 en daarna. Hierbij is overgegaan op een nieuwe versie van Safeti-NL, namelijk versie 9.2.

Het RIVM is per 31 december 2024 gestopt met het beheer van RBM II en CAROLA, omdat deze versies niet meer onderhouden worden en een goede werking niet meer is te garanderen. Met Safeti-NL versie 9.2 kunnen ook de risico's van hogedrukaardgasleidingen (als alternatief voor CAROLA) en de risico's van het vervoer van gevaarlijke stoffen over het basisnet (als alternatief voor RBM II) berekend worden. Hiermee zijn de berekeningen van de risico's van activiteiten met gevaarlijke stoffen op een uniforme, transparantere wijze uit te voeren.

Dit rapport beschrijft de verschillen tussen Safeti-NL versie 9.2 enerzijds en Safeti-NL versie 8.3, RBM II en CAROLA anderzijds, de uitgevoerde consequentieonderzoeken en de acceptatietest van Safeti-NL versie 9.2.

De verschillen tussen Safeti-NL versie 8.3 en versie 9.2 betreffen het gebruik van een nieuwe stoffendatabase, DIPPR 2018, en verbeterde modellen, zoals een nieuw fakkelbrandmodel voor waterstof, een nieuw model voor *dense phase*-koolstofdioxide en een verbeterd verspreidingsmodel voor met name zware gassen. Daarnaast zijn er stoffen en functionaliteiten toegevoegd, met name om risicoberekeningen voor het vervoer van gevaarlijke stoffen en hogedruk aardgasleidingen te kunnen uitvoeren. De verschillen tussen Safeti-NL versie 9.2 enerzijds en RBMII en CAROLA anderzijds zijn in dit rapport kwalitatief beschreven.

AVIV heeft in 2024 een consequentieonderzoek uitgevoerd om te bepalen of de overgang naar een nieuwe versie van Safeti-NL leidt tot significante knelpunten in de ruimtelijke ordening. Het RIVM heeft een casus nader onderzocht, waarbij het vrijkomen van onverbrand product bij een PGS15-loads leidt tot een toename in de PR 10^{-6} -contour. Hierbij

is een bug in versie 8.3 geconstateerd, die is opgelost in versie 9.2. Ook heeft het RIVM gedetailleerder gekeken naar buisleidingen. Uit het aanvullend onderzoek van het RIVM blijkt dat Safeti-NL versie 9.2 voor hogedruk aardgasleidingen tot iets grotere contouren leidt. Ook voor *dense phase*-koolstofdioxide geeft het nieuwe verspreidingsmodel grotere risicocontouren.

Het RIVM heeft ook onderzocht of de resultaten van de voorgeschreven versie van Safeti-NL, versie 9.2, binnen een bandbreedte van 5 procent overeenkomen met de resultaten van de versie waarmee AVIV het consequentieonderzoek heeft uitgevoerd, namelijk versie 8.8. Uit het onderzoek blijkt dat de resultaten binnen deze bandbreedte overeenkomen. Het consequentieonderzoek van AVIV geeft daarom een goed beeld van de consequenties van de invoering van Safeti-NL versie 9.2.

Het onderzoek leidt tot de aanbeveling om bij de verdere ontwikkeling van Safeti-NL een aantal verbeteringen door te voeren. Dit betreft het implementeren van het nieuwe uitstromingsmodel Pipebreak-II waarin beter rekening wordt gehouden met de initiële drukval na breuk, het inbouwen van een onderbouwde, transparante methode voor het berekenen van faalfrequenties van hogedruk aardgasleidingen en het verbeteren van de validatie van het fakkelfmodel voor deze leidingen.

1 Inleiding

Voor het berekenen van de externe veiligheidsrisico's van milieubelastende activiteiten met gevaarlijke stoffen die opgenomen zijn in Bijlage VII van het Besluit kwaliteit leefomgeving (Bkl) [1], zijn rekenmethoden voorgeschreven. Een rekenmethode bestaat uit een rekenvoorschrift in combinatie met rekensoftware. De rekenmethoden zijn voorgeschreven in de Regeling basisnet [2] voor het vervoer van gevaarlijke stoffen en in de Omgevingsregeling [3] voor andere activiteiten met gevaarlijke stoffen en betreffen:

- de Handleiding risicoanalyse transport (HART) [4] en de rekensoftware RBM II, versie 2, voor het berekenen van de risico's van het vervoer van gevaarlijke stoffen over het basisnet;
- het Rekenvoorschrift omgevingsveiligheid module V [5] en de rekensoftware CAROLA versie 1.0.0.53 [6] voor het berekenen van de risico's van hogedruk aardgasleidingen (Bkl, Bijlage VII, D.2);
- het Rekenvoorschrift omgevingsveiligheid modules I, II en V, oktober 2020 [5, 7, 8] en de rekensoftware Safeti-NL versie 8, 2021 (hierna versie 8.3 genoemd) voor het berekenen van de risico's van de activiteiten in Bijlage VII van het Bkl onder A, B en E.2 tot en met E.13 en ondergrondse buisleidingen voor andere stoffen dan aardgas (Bkl, Bijlage VII, D.2) tot 1 januari 2025. Vanaf 1 januari 2025 is de rekensoftware Safeti-NL versie 9.2, 2025, voorgeschreven in de Omgevingsregeling met het bijbehorende Rekenvoorschrift omgevingsveiligheid modules I, II en V, januari 2025.

Het contract van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat met AVIV, de leverancier van RBM II, eindigt in 2025 en de software wordt inmiddels niet meer verder ontwikkeld en beheerd. CAROLA is inmiddels end-of-life en de software is technisch niet meer in beheer bij een (externe) softwareontwikkelaar. Per 31 december 2024 is het RIVM gestopt met het beschikbaar stellen van beide rekenprogramma's en worden RBM II en CAROLA formeel uit beheer genomen. Het RIVM kan namelijk niet meer garanderen dat deze rekenprogramma's blijven werken.

Safeti-NL versie 9.2 is vanaf 1 januari 2025 voorgeschreven in de Omgevingsregeling voor de activiteiten waarvoor eerder Safeti-NL versie 8.3 was voorgeschreven [9]. Aanleiding om over te gaan op een nieuwe versie van Safeti-NL was dat het bestaande contract uit 2006 met DNV, de leverancier van de rekensoftware Safeti-NL, begin 2025 afloopt. Het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat heeft daarom een nieuw contract met DNV afgesloten voor het gebruik van Safeti-NL in 2025 en daarna. Hierbij wordt overgegaan op een nieuwe versie van Safeti-NL, namelijk versie 9.2. Met Safeti-NL versie 9.2 kunnen ook de risico's van hogedrukaardgasleidingen (als alternatief voor CAROLA) en de risico's van het vervoer van gevaarlijke stoffen (als alternatief voor RBM II) berekend worden. Hiermee kunnen de berekeningen van de risico's van activiteiten met gevaarlijke stoffen op een uniforme, transparantere wijze worden uitgevoerd.

Voordat Safeti-NL versie 9.2 is voorgeschreven in de Omgevingsregeling en verspreid onder de gebruikers zijn verschillende stappen gezet. Deze zijn beschreven in dit rapport en betreffen:

- na het uitbrengen van Safeti-NL versie 8.3 heeft DNV verbeterde modellen ontwikkeld voor onder andere fakkelbranden en de uitstroming en verspreiding van gevaarlijke stoffen. Deze verbeterde modellen zijn opgenomen in versie 9.2. De verschillen in modellen tussen versie 8.3 en versie 9.2 zijn beschreven in hoofdstuk 2. Dit hoofdstuk beschrijft ook de belangrijkste verschillen tussen Safeti-NL versie 9.2 enerzijds en CAROLA en RBM II anderzijds.
- Safeti-NL versie 9.2 is ook geschikt gemaakt voor het berekenen van de risico's van het vervoer van gevaarlijke stoffen en hogedruk aardgasleidingen. Ook zijn andere aanpassingen doorgevoerd waarmee het gebruikersgemak vergroot is. De aanpassingen die hiervoor in Safeti-NL zijn doorgevoerd, zijn beschreven in hoofdstuk 3.
- Voordat Safeti-NL versie 9.2 voorgeschreven kon worden, was inzicht nodig in de consequenties voor de ruimtelijke ordening. Hiervoor heeft AVIV een consequentieonderzoek uitgevoerd met Safeti-NL versie 8.8 [10]. Het RIVM heeft nog enkele aanvullende onderzoeken gedaan. Deze zijn beschreven in hoofdstuk 4.
- Nadat DNV Safeti-NL versie 9.2 heeft opgeleverd, is een acceptatietest uitgevoerd. Hierbij is ook gekeken naar de verschillen in uitkomst tussen versie 8.8, waarmee AVIV het consequentieonderzoek heeft uitgevoerd, en versie 9.2. De acceptatietest is beschreven in hoofdstuk 5.
- Hoofdstuk 6 beschrijft ten slotte de conclusies en aanbevelingen.

2 Modelverschillen Safeti-NL versie 9.2 en versie 8.3, RBM II en CAROLA

Safeti-NL versie 9.2 bevat andere modellen dan de in 2024 voorgeschreven rekensoftware. De verschillen in modellen zijn beschreven in de volgende paragrafen voor:

- Safeti-NL versie 8.3 voor stationaire activiteiten met gevaarlijke stoffen en ondergrondse buisleidingen voor andere stoffen dan aardgas (zie paragraaf 2.1);
- RBM II versie 2 voor vervoer van gevaarlijke stoffen over het basisnet (zie paragraaf 2.2);
- CAROLA versie 1.0.0 voor hogedrukaardgasleidingen (zie paragraaf 2.3).

Met deze modelverschillen kunnen verschillen in resultaten geduid worden.

Naast deze modelverschillen zijn in Safeti-NL versie 9.2 ook functionaliteiten toegevoegd. Deze zijn beschreven in hoofdstuk 3.

2.1 Verschillen Safeti-NL versie 8.3 en versie 9.2

Safeti-NL is de voorgeschreven rekensoftware voor stationaire activiteiten en ondergrondse buisleidingen voor andere stoffen dan aardgas. Tot 1 januari 2025 was versie 8.3 voorgeschreven, na 1 januari 2025 is versie 9.2 voorgeschreven. De belangrijkste modelverschillen tussen versie 8.3 en versie 9.2 zijn hier samengevat op basis van de Release Notes van Safeti-NL versies 8.5 [11], 8.8 [12] en 9.2 [13]. De impact van deze wijzigingen is onderzocht in het consequentieonderzoek dat is uitgevoerd door AVIV [10].

2.1.1 *DIPPR 2018-database*

De DIPPR-database is een database waarin verschillende stofconstanten en temperatuurafhankelijke stofeigenschappen zitten, zoals molecuulgewicht, verdampingswarmte en ontstekingsgrenzen. De database is opgesteld door de Design Institute for Physical Properties (DIPPR) [14]. In Safeti-NL 8.3 worden stofeigenschappen van de DIPPR-database uit 2000 gebruikt voor berekeningen. Vanaf Safeti-NL 8.5 wordt standaard de DIPPR-database uit 2018 gebruikt. In deze database zijn sommige stofeigenschappen aangepast naar de nieuwste wetenschappelijke inzichten.

2.1.2 *Een verbeterd model voor fakkels van waterstofgasbranden*

In Safeti-NL versie 8.3 wordt voor fakkelbranden van ontvlambare gassen het zogenoemde conemodel toegepast. DNV heeft voor een fakkelbrand van waterstofgas een verbeterd model geïmplementeerd in het programma, het Miller-model. Dit model wordt daarom in Safeti-NL versies 8.8 en 9.2 toegepast voor fakkels van zuiver waterstofgas.

2.1.3 *Een verbeterd model voor de uitstroming en verspreiding van koolstofdioxide uit ondergrondse buisleidingen*

In Safeti-NL 8.3 wordt de uitstroming van koolstofdioxide uit een ondergrondse buisleiding berekend met een verticale uitstroming. Na inmenging van lucht in de krater, verspreidt de koolstofdioxide vervolgens met de wind mee. Uit twee grootschalige experimenten met uitstroming uit een ondergrondse buisleiding met *dense phase*¹-koolstofdioxide (het COSHER² project) [15] blijkt echter dat er rondom de bron een cirkelvormige wolk ontstaat, die zich deels op maaiveldniveau bevindt en ook deels tegen de windrichting in beweegt. Ook blijkt dat Safeti-NL versie 8.3 de verticale snelheid van de uitstroming na luchtinmenging in de krater overschat. Dit leidt tot een onderschatting van de gemeten concentraties op leefniveau.

DNV heeft daarom een aangepast model ontwikkeld, dat een lagere verticale snelheid van de uitstroming na luchtinmenging in de krater geeft en rekening houdt met de vorming van een cirkelvormige wolk. Dit nieuwe model geeft goede overeenstemming met de twee bovengenoemde COSHER-experimenten. Dit is het aanbevolen model in Safeti-NL versies 8.8 en 9.2 voor die situaties waarvoor de COSHER-experimenten representatief zijn. Deze aanbeveling is ook opgenomen in Module I en Module V van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid. De gebruiker kan in Safeti-NL (vanaf versie 8.8) zelf een keuze maken voor het te gebruiken model.

2.1.4 *Een verbeterd model voor verspreiding van zware gassen*

In het Jack Rabbit II-project zijn veldexperimenten met chloor uitgevoerd, waarbij de verspreiding van chloorgas na een grootschalige uitstroming (tot 20 ton) in de omgeving is gemonitord [16]. In het project zijn de berekende concentraties van verschillende verspreidingsmodellen vergeleken met de gemeten concentraties. De vergelijking van de resultaten van Safeti-NL versie 8.5 met de experimenten laat zien dat de concentraties op grotere afstand met Safeti-NL versie 8.5 onderschat werden. DNV heeft daarna een verbeterd model voor de verspreiding van zware gassen ontwikkeld [17]. Dat model is opgenomen in Safeti-NL versies 8.8 en 9.2. In samenhang daarmee is ook de modellering van de overgang van zwaar naar licht gas verbeterd in versie 8.8.

2.1.5 *Een verbeterd model voor verticale uitstroming*

Er zijn aanwijzingen uit experimenten dat Safeti-NL versie 8.3 de concentraties in de pluim onderschat in geval van een verticale uitstroming met lage snelheid, bijvoorbeeld uitstroming uit een schoorsteen. DNV heeft dit onderzocht en een verbeterd model³ ontwikkeld, dat beter rekening houdt met de luchtinmenging en het afbuigen van de pluim [12]. Dit verbeterde model is opgenomen in Safeti-NL versies 8.8 en 9.2.

2.1.6 *Overige verschillen*

Naast bovenstaande verbeteringen in de effectmodellering zijn er ook verbeteringen aangebracht in de risicoberekeningen. Dit betreft met

¹ Tot vloeistof verdicht of superkritisch

² COSHER staat voor CO₂ Safety, Health, Environment and Risk

³ het Morton (crosswind modified) model

name de post-processing, waarbij de resultaten van de verspreidings- en effectberekeningen op risicogrids worden geprojecteerd en gecombineerd voor de verschillende scenario's.

2.2 Verschillen Safeti-NL versie 9.2 en RBM II

RBM II is de voorgeschreven rekensoftware voor het vervoer van gevaarlijke stoffen over weg, water en spoor. Een beschrijving van de modellen in RBM II staat in de toelichting van het Rekenvoorschrift omgevingsveiligheid versie maart 2022, hoofdstuk 2 [18].

RBM II en Safeti-NL zijn apart van elkaar (door-)ontwikkeld door verschillende softwareleveranciers. Hierdoor verschillen de toegepaste modellen van elkaar. In 2008, toen onderzocht werd of RBM II gebruikt kon worden voor het basisnet, is een aantal verschillen in kaart gebracht [19]. Ook daarna is de modellering in RBM II en Safeti-NL op ad-hoc basis nog vergeleken. Zonder een uitputtende opsomming te geven, zijn er relevante verschillen tussen RBM II en Safeti-NL, zoals:

- De modellen voor het berekenen van de *rain-out-fractie* zijn verschillend. Dit bepaalt de hoeveelheid gevaarlijke stof die in de dampfase blijft en zich verspreidt in de omgeving. Dit is voor ammoniak specifiek onderzocht. Voor een 75 mm gat in een ketelwagen ammoniak is de *rain-out-fractie* in RBM II een factor drie hoger dan in Safeti-NL. Hierdoor is de bronterm van de giftige wolk ammoniak in Safeti-NL een factor 2 tot 3 groter.
- RBM II neemt de plasverdamping na *rain-out* niet mee voor tot vloeistof verdichte gassen, Safeti-NL neemt deze plasverdamping wel mee in de berekening. Het verwaarlozen van de plasverdamping leidt tot een lagere blootstelling aan giftige stof in de omgeving.
- RBM II gaat voor de verspreiding van giftige vloeistoffen uit van neutraal gasverspreiding (de verspreiding van gassen met een dichtheid gelijk aan die van de omgevingslucht). In Safeti-NL hangt het verspreidingsmodel af van de stof en omstandigheden. Afhankelijk van de dichtheid van de stof, kan de emissie ook stijgen of aan de grond blijven hangen (zwaar-gasmodel).
- De modellen voor de verspreiding van stoffen in de omgeving zijn verschillend.
- De modellering van de vuurbal verschilt, namelijk een statisch model in RBM II en een dynamisch model in Safeti-NL.

De verschillen in de modellen leiden ertoe dat risico- en effectafstanden wijzigen bij de overgang van RBM II naar Safeti-NL.

2.3 Verschillen Safeti-NL versie 9.2 en CAROLA

Het voorgeschreven softwarepakket voor hogedruk aardgasleidingen betreft CAROLA. CAROLA is enkel geschikt voor berekeningen voor hogedruk aardgasleidingen. De aanpassingen in Safeti-NL voor het berekenen van de risico's van hogedruk aardgasleidingen en de verschillen in effectmodellen tussen CAROLA en Safeti-NL versie 9.2 zijn hier samengevat.

2.3.1 *Faalfrequentie*

In Safeti-NL versie 9.2 is de berekening van de faalfrequentie van een hogedruk aardgasleiding op basis van de leidingkenmerken toegevoegd. Hierbij zijn de faalfrequenties uit CAROLA ongewijzigd overgenomen in Safeti-NL versie 9.2.

In CAROLA zijn de faalfrequenties ingebouwd in het softwarepakket in de zogenaamde CAROLA.dll. De CAROLA.dll bevat onder andere faalfrequenties voor beschadiging door derden en corrosie. De faalfrequenties zijn afkomstig uit PIPESAFE en zijn in PIPESAFE uitgerekend met behulp van de FFREQ- en CORROSION-modellen. Het FFREQ-model gebruikt de druk, staalsoort, wanddikte, taaiheid van het staal en diameter om een breukfrequentie te berekenen. Het model is gebaseerd op een breukmechanica model en de Weibull-verdeling van beschadigingen aan Britse leidingen. Vervolgens worden de resultaten gecorrigeerd voor de diepteligging, zodat de uitkomsten consistent worden met de faaldata van Gasunie-leidingen. Het CORROSION-model berekent de faalfrequenties als gevolg van corrosie op basis van breukmechanica en casuïstiek van corrosie incidenten in het Britse leidingnet [20].

De faalfrequentie-modellen in PIPESAFE zijn gevalideerd. De informatie die is gebruikt voor de validatie en de exacte beschrijving van de modellen is echter niet openbaar. Het is hierdoor niet mogelijk om de faalfrequenties te controleren of te reproduceren. Het model voldoet daarmee niet (meer) aan de beoordelingscriteria voor de acceptatie van aanpassing van de rekeninstrumenten van het RIVM [21]. Het RIVM streeft ernaar dat de modellen en bijbehorende validatie openbaar zijn. Als dit niet mogelijk is, moeten de faalfrequenties opnieuw worden afgeleid uit openbare data. Deze nieuw gevalideerde faalfrequenties worden daarna geïmplementeerd in Safeti-NL en daarmee wordt de CAROLA.dll vervangen.

2.3.2 *Effectmodellering*

CAROLA maakt gebruik van de resultaten van twee modellen. Het Pbreak-model berekent de gasuitstroom na een leidingbreuk. Het CRISTAL-model berekent de resulterende effecten van deze uitstroom, namelijk de verdere uitstroomkarakteristieken, de vlamstructuur en de warmtestraling [20, 22]. In CAROLA zijn tabellen opgenomen met de resultaten van deze modellen, waardoor de rekentijd van CAROLA aanzienlijk verkort wordt.

Safeti-NL maakt gebruik van de Crater- en Gaspipe-modellen voor de uitstroom en het JFSH Jet fire-model voor de bepaling van de vlam en resulterende warmtestraling.

Zowel de modellen van CAROLA als die van Safeti-NL zijn gevalideerd. De modellen van CAROLA zijn gevalideerd aan full-scale-experimenten van hogedruk aardgasbuisleidingbreuken [20, 22]. Deze informatie is echter niet volledig openbaar. Safeti-NL is gevalideerd aan andere, openbare, experimenten [23]. De effectmodellering is daarmee vergelijkbaar, maar niet identiek. De openbare validatie voldoet beter aan de beoordelingscriteria voor de acceptatie van aanpassing van de rekeninstrumenten van het RIVM [21] en daarmee hebben de modellen in Safeti-NL de voorkeur.

3 Nieuwe functionaliteiten Safeti-NL versie 9.2

Dit hoofdstuk geeft een beschrijving van de toegevoegde functionaliteiten in Safeti-NL versie 9.2 ten opzichte van eerdere versies.

3.1 Specifieke studies voor vervoer gevaarlijke stoffen en buisleidingen

Safeti-NL versie 9.2 is geschikt gemaakt voor risicoberekeningen van het vervoer van gevaarlijke stoffen per weg, water en spoor en door buisleidingen. Hiervoor zijn parametersets toegevoegd voor de verschillende vervoersmodaliteiten. Bij het openen van een nieuwe studie ('*Workspace*') kan de gebruiker een modaliteit (bedrijven, spoor, weg, water, buisleiding, hogedrukaardgasleiding) kiezen. Vervolgens wordt automatisch het juiste parameterbestand met de gebeurtenissenbomen van die modaliteit ingeladen.

3.2 Verbeteringen in de uitvoer

In versie 9.2 zijn enkele uitvoeropties toegevoegd op verzoek van gebruikers, zoals contouren in GeoJSON-format. Daarnaast wordt het mogelijk om voor brandaandachtsgebieden de omhullende contour van 10 kW/m² voor de plasbranden en fakkelbranden te tonen en te exporteren. Ook is het mogelijk alle contouren (plaatsgebonden risicocontouren of aandachtsgebieden) in één keer te exporteren.

3.3 FN-curve per km

In eerdere versies werd de FN-curve berekend voor een ingevoerde route als geheel. In versie 9.2 is het mogelijk de FN-curve per km route weer te geven. Dit geldt zowel voor routes (transport en buisleidingen) als voor het *long pipeline* model (buisleidingen).

3.4 Parallele routes

In Safeti-NL 9.2 is het mogelijk om parallele routes in te voeren voor brede transportroutes. Hiervoor hoeft de gebruiker de routes niet apart in te voeren. De gebruiker kan de afstand van bijvoorbeeld de rijbanen of sporen ten opzichte van het midden van de route invoeren.

3.5 Update stoffen

De aanwezige stoffen in Safeti-NL 9.2 zijn veranderd ten opzichte van versie 8.3. Ten opzichte van versie 8.3 is een groot aantal stoffen toegevoegd en is een aantal stoffen verwijderd. Een volledig overzicht van de aanwezige stoffen en de indeling (giftig en/of ontvlambaar) in Safeti-NL 9.2 is te vinden in Bijlage 1.

De toegevoegde stoffen betreffen stoffen waarvoor een probitrelatie met de status 'inhoudelijk vastgesteld' is afgeleid en de interactie met water beschikbaar is. Deze probitrelaties met de status 'inhoudelijk vastgesteld' zijn beoordeeld door de Toetsgroep (TG) probitrelaties. Deze stoffen hebben daarom de toevoeging 'TG' gekregen. Daarnaast is 1-penteen als de voorbeeldstof voor klasse 0-stoffen toegevoegd. Ook is koolstofdioxide toegevoegd met de probitrelatie die is afgeleid door de

HSE. De toetsgroep probitrelaties kon voor deze stof geen probitrelatie afleiden.

De probitrelaties met de aanduiding 'TG' zijn afgeleid volgens de meest actuele wetenschappelijke inzichten. Deze probitrelaties zijn wettelijke echter niet voorgeschreven. De probitrelaties kunnen wel gebruikt worden om inzicht te krijgen in de giftige effecten en wanneer geen voorgeschreven probitrelatie beschikbaar is.

De verwijderde stoffen betreffen stoffen met de indeling giftig of giftig en ontvlambaar, waarvoor geen probitwaarden waren opgenomen. De stoffen hadden daarom geen toegevoegde waarde. Voor deze stoffen is wel de variant met de aanduiding 'TG' aanwezig als een probitrelatie met de status 'inhoudelijk vastgesteld' is afgeleid.

Voor alle stoffen zijn, indien beschikbaar, de interventiewaarden uit 2023 toegevoegd [24].

De classificatie van de risico's (giftig en/of ontvlambaar) van stoffen gebeurt in de rekenmethode op basis van de CLP-database [25]. Voor alle stoffen is de classificatie opnieuw bekeken aan de hand van de CLP-database. Alleen de indeling van de stof trimethylamine (zonder de aanduiding 'TG') is gewijzigd. De stof was giftig en ontvlambaar geclassificeerd in Safeti-NL 8.8 en is ontvlambaar geclassificeerd in Safeti-NL 9.2. Indien een stof in de CLP-database als alleen ontvlambaar is geclassificeerd, maar er wel een (inhoudelijk vastgestelde) probitrelatie is afgeleid door de toetsgroep probitrelaties, dan is de stof twee keer opgenomen in Safeti-NL 9.2. De standaardstof is dan opgenomen als alleen ontvlambaar. De stoffen met de toevoeging 'TG' zijn ingedeeld als giftig, of giftig en ontvlambaar indien de stoffen ook ontvlambaar zijn.

Vier stoffen waarvoor wel een probitrelatie is afgeleid, zijn niet opgenomen in Safeti-NL 9.2, omdat er aandachtspunten zijn bij het modelleren met deze stoffen. Het betreft cis-decahydronaphtaleen, trans-decahydronaphtaleen, oleum en salpeterzuur (<70%). Voor deze stoffen zijn stofbestanden, met de bijbehorende aandachtspunten, op te vragen bij de Safeti-NL helpdesk.

3.6 Hogedruk aardgasleidingen

In Safeti-NL 9.2 zijn de faalfrequenties en ontstekingskansen uit CAROLA geïmplementeerd. Hiermee kunnen hogedruk aardgasleidingen met Safeti-NL 9.2 worden gemodelleerd zonder externe berekeningen.

Voor Safeti-NL 9.2 kan direct gebruikgemaakt worden van een leidingbestand. Hierdoor is de invoertijd vergelijkbaar met CAROLA (doorgaans enkele minuten). Aan de hand van de maatregelen in het leidingbestand en de gekozen leidingexploitant, berekent Safeti-NL 9.2 de faalfrequenties op dezelfde manier als CAROLA.

Om de rekensnelheid en het gebruiksgemak van Safeti-NL 9.2 verder te verhogen, zijn twee uitgangspunten uit de rekenmethode aangepast. De

aanpassingen en onderbouwing van deze aanpassingen zijn in de volgende twee paragrafen beschreven.

3.6.1 *Uitstroomtijd bij vertraagde ontsteking van aardgas*

In de rekenmethode voor het berekenen van een fakkelbrand uit een hogedruk aardgasleiding met CAROLA worden twee scenario's gemodelleerd. Er wordt uitgegaan van ofwel direct ontsteken (fakkelbrand 0s – 20s), ofwel vertraagd ontsteken (120s – 140s). Hiervoor wordt voor de fakkelbrand het gemiddelde uitstroomdebiet gebruikt voor de twee tijdsintervallen. Deze ontstekings tijden zijn gebaseerd op casuïstiek van 36 incidenten wereldwijd, waarbij 75 procent van de gevallen in de eerste twintig seconden ontsteekt. 25 procent ontsteekt vertraagd, gemiddeld na 120s-140s [26].

De huidige versie van Safeti-NL kan vertraagde fakkelbranden meenemen op basis van het debiet op één tijdstip, zonder dat hiervoor een extra scenario aangemaakt hoeft te worden. Dit vereenvoudigt de invoer en versnelt de berekeningen. Bijlage 2 paragraaf 8.1 vergelijkt de uitkomsten van vertraagde fakkelbranden (120-140s) met fakkelbranden op één tijdstip (120s dan wel 130s). Ook wordt het resulterende risico vergeleken voor de verschillende methodes. Ten slotte worden de methodes getoetst aan de toetsingscriteria van het RIVM afkomstig uit het rapport Advies aandachtsgebieden [21]. In Tabel 1 zijn de scores van de drie opties naast elkaar gezet. De vaste uitstroomtijd 130s krijgt de beste score, omdat de uitkomst voldoende representatief is voor de periode 120-140s en omdat de rekentijd aanzienlijk kleiner is dan bij middeling over 120 tot 140s.

Tabel 1 Overzicht toetsing van de beschreven methodes aan de in het protocol rekenmethodieken beschreven criteria.

	120-140s	120s	130s
Ontvankelijkheid	+	+	+
Validiteit	+	0	+
Betrouwbaarheid	+	0	+
<i>Reproduceerbaar</i>	+	+	+
<i>Conservatief</i>	+	-	+
Toepasbaarheid	0	+	+

3.6.2 *Diepteligging bij de effectmodellering*

De diepteligging van hogedruk aardgasleidingen heeft een effect op de warmtestraling. Vaak nemen de effectafstanden voor de warmtestraling toe met toenemende diepteligging. De diepteligging van aardgasleidingen is in detail bekend. In CAROLA wordt echter voor de berekening uitgegaan van een vaste waarde van de diepteligging, ongeacht de daadwerkelijke diepteligging van de leiding. Voor buisleidingen met een diameter kleiner dan of gelijk aan 407 mm wordt een diepteligging van 1,2 m verondersteld. Voor buisleidingen met een diameter groter dan 407 mm wordt een diepteligging van 1,75 m verondersteld. Het kiezen voor een vaste diepteligging voor de effectmodellering zorgt voor verlies in nauwkeurigheid. Daartegenover staat een verkorting van de rekentijd ten opzichte van het gebruik van de daadwerkelijke diepteligging van alle leidingsegmenten.

De berekeningen voor de afmetingen van de krater in CAROLA en Safeti-NL komen niet overeen. Daarom is het uitgangspunt van een vaste diepteligging opnieuw beoordeeld. In Bijlage 2 paragraaf 8.2 wordt de warmtestraling voor twee hogedruk aardgasleidingen voor verschillende diepteligging en weertype met elkaar vergeleken. Hieruit blijkt dat de warmtestraling als functie van de afstand in Safeti-NL nauwelijks varieert met de diepteligging. Er is daarom gekozen voor een vaste diepteligging voor alle leidingdiameters. Ten slotte wordt in Bijlage 2 paragraaf 8.2 de verschillende opties voor de vaste diepteligging getoetst aan de toetsingscriteria van het RIVM afkomstig uit het rapport Advies aandachtsgebieden [21]. In Tabel 2 zijn deze scores naast elkaar gezet. De vaste diepteligging van 1,5 m krijgt de beste score. Deze heeft namelijk de hoogste betrouwbaarheid van de opties met een vaste diepteligging. Ook is de rekentijd aanzienlijk kleiner dan bij een variabele diepteligging.

Tabel 2 Overzicht toetsing van de beschreven methodes aan de in het protocol rekenmethodieken beschreven criteria.

	Variabel	1 m	1,31 m	1,5 m
Ontvankelijkheid	+	+	+	+
Validiteit	+	+	+	+
Betrouwbaarheid	0	-	0	0/+
<i>Reproduceerbaar</i>	+	+	+	+
<i>Conservatief</i>	0	-	0	0/+
Toepasbaarheid	0	+	+	+

4 Verdieping consequentieonderzoek

Het consequentieonderzoek van AVIV is uitgevoerd voor een aantal bedrijven en een aantal fictieve buisleidingen en routes voor het vervoer van gevaarlijke stoffen [10]. In aanvulling op dit consequentieonderzoek (paragraaf 4.1) keek het RIVM specifiek naar een onverwachtse toename in de risicocontour van een PGS15-opslag (paragraaf 4.2), enkele bestaande hogedruk aardgasleidingen (paragraaf 4.3) en leidingen met koolstofdioxide (paragraaf 4.4).

4.1 Algemene bevindingen uit het AVIV onderzoek

Om inzicht te krijgen in de consequenties van de overgang naar Safeti-NL 9.2 heeft AVIV in opdracht van het RIVM een consequentieonderzoek uitgevoerd [10]. Hierbij is onderzocht of het voorschrijven van Safeti-NL 9.2 leidt tot knelpunten in de ruimtelijke ordening. Tijdens het onderzoek was Safeti-NL 9.2 nog in ontwikkeling. De berekeningen zijn daarom uitgevoerd met Safeti-NL versie 8.8 in plaats van Safeti-NL 9.2. De uitkomsten zijn vergeleken met Safeti-NL 8.3, RBM II en CAROLA.

Met de leverancier van Safeti-NL, DNV, is afgesproken dat er geen nieuwe modellen worden toegevoegd aan Safeti-NL 9.2 en dat de veranderingen in oppervlak van risicocontouren voor de teststudies kleiner zijn dan 10 procent. Grotere verschillen zijn alleen toegestaan voor het verhelpen van bugs. Hiermee wordt het consequentieonderzoek met Safeti-NL 8.8 als 'voldoende representatief' gezien voor de nieuwe versie, Safeti-NL 9.2.

In het consequentieonderzoek van AVIV is gekeken naar bedrijven (paragraaf 4.1.1), buisleidingen (paragraaf 4.1.2) en vervoer van gevaarlijke stoffen over het basisnet (paragraaf 4.1.3).

4.1.1 *Bedrijven*

De inhoudelijke verschillen tussen Safeti-NL versie 8.3, versie 8.8 en versie 9.2 zijn beschreven in paragraaf 2.1. Op basis van deze verschillen zijn 42 bedrijven geselecteerd in het consequentieonderzoek waarvoor een verandering van de PR 10^{-6} -contour te verwachten is. Aanvullend op deze gerichte selectie zijn ook 19 bedrijven meegenomen waarvoor geen verandering verwacht wordt. Dit levert in totaal 61 bedrijven op voor het consequentieonderzoek, waarbij 2 bedrijven dubbel zijn geselecteerd. Uiteindelijk zijn 59 bedrijven doorgerekend met Safeti-NL versie 8.3 en versie 8.8.

Uit het consequentieonderzoek blijkt dat voor de onderzochte steekproef van 59 bedrijven in de meeste gevallen de plaatsgebonden risicocontouren (10^{-6} /jaar) niet toenemen. Voor 19 bedrijven worden de risicocontouren (PR 10^{-6}) wel groter. De grootste toename, tussen 60 en 100 procent, wordt gevonden voor een PGS15-opslag met onverbrand giftige stof. Dit is verder onderzocht in paragraaf 4.2. De grotere risicocontouren leiden in de uitgevoerde steekproef tot één mogelijk knelpunt, omdat een (zeer) kwetsbaar gebouw nieuw binnen de PR 10^{-6} -contour van een bedrijf kwam te liggen.

4.1.2 *Buisleidingen*

Het consequentieonderzoek voor buisleidingen bestaat uit twee delen. Er is onderscheid gemaakt tussen hogedruk aardgas en overige gevaarlijke stoffen. Voor beide delen zijn representatieve, fictieve buisleidingen geselecteerd.

Hogedruk aardgasleidingen

De geselecteerde hogedruk aardgasleidingen hebben in zowel CAROLA als Safeti-NL 8.8 geen PR 10^{-6} -contour. De PR 10^{-7} - en PR 10^{-8} -contouren zijn voor vrijwel alle gekozen leidingen vergelijkbaar. Enkel bij de 36 inch-leiding is het PR berekend door Safeti-NL 8.8 groter dan CAROLA.

Om te onderzoeken wat voor aardgasleidingen met een PR 10^{-6} -contour de consequenties zijn bij overgang van CAROLA naar Safeti-NL heeft het RIVM een vervolgonderzoek uitgevoerd, zie paragraaf 4.3. Gezien de toename in risico van een 36 inch-leiding in het onderzoek van AVIV, is deze diameter specifiek meegenomen in het vervolgonderzoek.

Leidingen met overige gevaarlijke stoffen

Voor de overige gevaarlijke stoffen zijn berekeningen uitgevoerd voor waterstof, ammoniak, n-octaan, propyleen, butaan, ethyleenoxide, waterstof en waterstofchloride. Voor het merendeel van de beschouwde leidingen is er geen groot verschil in PR tussen Safeti-NL 8.3 en Safeti-NL 8.8. Enkel bij waterstof is een relatief groot verschil zichtbaar. In Safeti-NL 8.8 neemt het berekende risico sneller af met de afstand tot de leiding. Dit verschil wordt veroorzaakt door het nieuwe fakkelbrand model voor waterstof in Safeti-NL 8.8.

Voor koolstofdioxide heeft het RIVM een vervolgonderzoek uitgevoerd, zie paragraaf 4.4.

4.1.3 *Vervoer gevaarlijke stoffen*

Voor het vervoer van gevaarlijke stoffen is kwalitatief gekeken naar de verschillen in het plaatsgebonden risico door het gebruik van Safeti-NL in plaats van RBM II en door het gebruik van het Rekenvoorschrift omgevingsveiligheid in plaats van de Handleiding risicoanalyse-transport (Hart) [27]. De verschillende berekeningen geven het volgende beeld:

Stofcategorie GF3 (propaan)

Wanneer de warme BLEVE wordt meegenomen in de berekening, is het plaatsgebonden risico van RBM II en Safeti-NL vergelijkbaar. Toepassing van het Rekenvoorschrift omgevingsveiligheid leidt tot een lager risico.

Stofcategorie GT3 (ammoniak)

Het plaatsgebonden risico, zoals berekend met Safeti-NL en het Rekenvoorschrift omgevingsveiligheid, is hoger dan berekend met RBM II en de Handleiding risicoanalyse transport. Dit wordt verklaard doordat de *rain-out*-fractie in RBM II een factor drie hoger is dan in Safeti-NL, zodat de bronterm van de giftige wolk ammoniak in Safeti-NL een factor 2 – 3 groter is. Als in de berekening met Safeti-NL ook de nieuwe probitfunctie van ammoniak⁴ wordt gebruikt, wordt het berekende risico

⁴ Zie <https://www.rivm.nl/probitrelaties/ammoniak>

lager, maar nog steeds hoger dan RBM II in combinatie met de Handleiding risicoanalyse transport (Hart).

Stofcategorie LF2 (brandbare vloeistof)

Het plaatsgebonden risico van RBM II en Safeti-NL is redelijk vergelijkbaar. Toepassing van het Rekenvoorschrift omgevingsveiligheid leidt op de eerste 20 meter tot een lager risico doordat de uitstroomfrequentie kleiner is dan de Handleiding risicoanalyse transport (Hart). Op grotere afstand leidt het Rekenvoorschrift omgevingsveiligheid tot een hoger risico doordat een vloeistof-BLEVE als scenario is meegenomen.

Stofcategorie LT1, LT3 (giftige vloeistof)

Het plaatsgebonden risico zoals berekend met Safeti-NL is vergelijkbaar met RBM II. Toepassing van het Rekenvoorschrift omgevingsveiligheid leidt tot lager risico's, doordat de uitstroomfrequentie en de vervolgsans op een grote plas kleiner zijn dan in de Handleiding risicoanalyse transport (Hart). Het gebruik van een nieuwe voorbeeldstof en nieuwe, inhoudelijk vastgestelde probitrelaties leidt (zelfstandig) tot vergelijkbare of lagere risico's.

4.2 PGS15 onverbrand product

Uit het consequentieonderzoek van AVIV blijkt dat de risicocontour (PR 10^{-6}) voor een PGS15-opslag met (onder andere) stoffen uit ADR 6.1 vg I onverwachts veel toeneemt in Safeti-NL 8.8 en 9.2 t.o.v. Safeti-NL 8.3. Uit nader onderzoek blijkt dat deze toename wordt veroorzaakt door de scenario's van het vrijkomen van onverbrand product van ADR 6.1 vg I-stoffen. Bij het vrijkomen van onverbrand product wordt in Safeti-NL 8.3 door een bug geen rekening gehouden met de gebouwinvloed bij de verspreiding van de stoffen in de omgeving.

Bij de berekening van de risicocontour met Safeti-NL 8.8 wordt de gebouwinvloed wel meegenomen. De bug is in Safeti-NL 9.2 volledig verholpen. De stoffen blijven daardoor meer aan de grond ten opzichte van het niet meenemen van de gebouwinvloed. Hierdoor worden de risicocontouren groter.

De gebouwinvloed wordt in Safeti-NL 8.8 echter niet altijd automatisch goed meegenomen. Dit is in Safeti-NL 9.2 wel het geval. De contouren kunnen voor PGS 15-opslagen, waar stoffen uit ADR klasse 6.1 worden opgeslagen, daarom toenemen.

Tegelijkertijd met Safeti-NL 9.2 is een nieuwe versie van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid uitgebracht. De voorschriften voor PGS 15-opslagen zijn opgenomen in Module II van dit rekenvoorschrift [28]. In Module II, versie oktober 2020 [8], is vermeld dat de scenario's moeten worden gemodelleerd als een uitstroom buiten het gebouw, waarbij de gebouwinvloed moet worden meegenomen. De overige (vrijkomen van verbrand product) PGS15-scenario's worden echter gemodelleerd als een *in building release*, waarbij de stoffen in het gebouw vrijkomen en vervolgens via de ventilatie naar buiten komen. Bij verspreiding in de omgeving wordt vervolgens (automatisch) de invloed van het gebouw meegenomen. Om de modellering van zowel

verbrand als onverbrand product op dezelfde wijze te laten verlopen, de stoffen komen namelijk tegelijkertijd vrij bij een brand, is Module II aangepast. In Module II, versie januari 2025, is opgenomen dat ook voor de modellering van onverbrand-product een *in building release* moet worden gebruikt in Safeti-NL.

Door deze aanpassing in het rekenvoorschrift zullen de uitkomsten wijzigen. De verwachting is dat de meeste contouren kleiner worden door deze wijziging. In sommige gevallen kunnen de contouren echter ook groter worden. De verschillen hangen af van de specifieke situatie.

Ten slotte wordt opgemerkt dat de rekenmethode voor PGS15-opslagen momenteel tegen het licht gehouden wordt en mogelijk herzien wordt [29]. Dit betekent dat in de toekomst de uitkomsten kunnen veranderen.

4.3 Hogedruk aardgasleidingen

In het consequentieonderzoek van AVIV zijn voor hogedruk aardgasleidingen alleen fictieve situaties doorgerekend. Om een beter beeld te krijgen van wat de overgang van CAROLA naar Safeti-NL zou betekenen, heeft het RIVM voor twee bestaande aardgasbuisleidingen de risicocontouren vergeleken uit het REV (Register Externe Veiligheidsrisico's) [30] en Safeti-NL 9.2. Het RIVM heeft hiervoor parameterbestanden (leidingbestanden) van de twee aardgasleidingen ontvangen van N.V. Nederlandse Gasunie. Het betreft één leiding met een diameter van 18 inch en één leiding met een diameter van 36 inch. Beide aardgasleidingen hebben voor gedeelten van de leiding een PR 10^{-6} -contour. De leidingbestanden zijn met behulp van de nieuwe functionaliteit ingelezen in Safeti-NL 9.2.

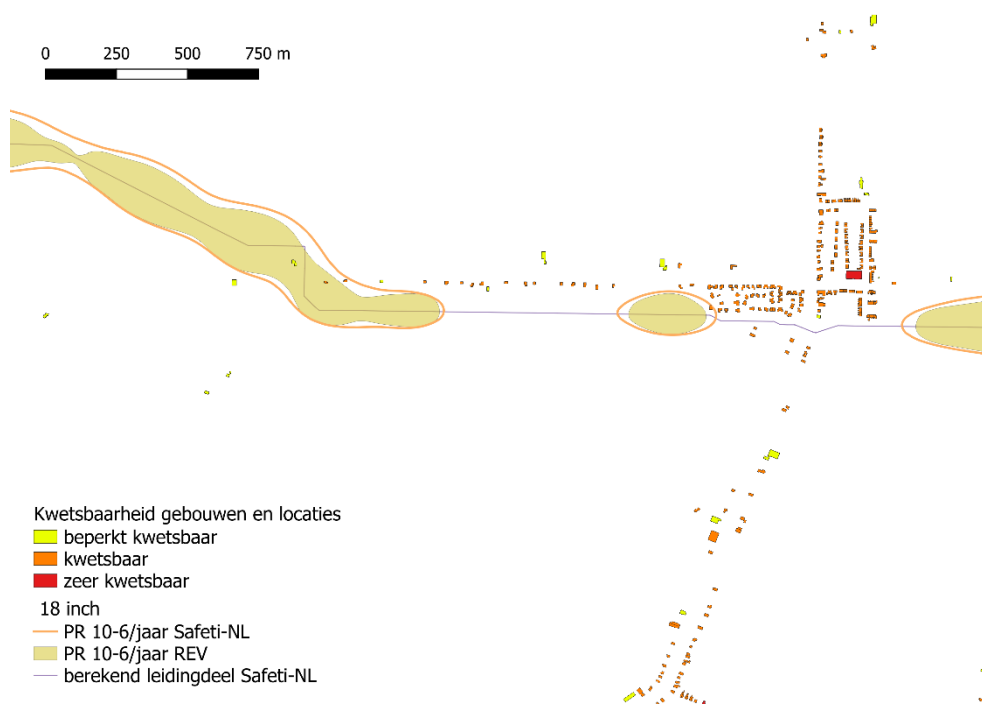
Voor de berekende gedeelten van de aardgasleidingen is bekeken of er meer of minder kwetsbare objecten (beperkt kwetsbaar, kwetsbaar en zeer kwetsbaar) binnen de met Safeti-NL 9.2 berekende contouren zouden komen te liggen ten opzichte van de contouren die zijn opgenomen in het REV. Voor deze bepaling zijn de kwetsbare objecten en locaties uit het REV gebruikt [30]. De resultaten voor de aardgasleidingen staan beschreven in onderstaande paragrafen.

4.3.1 18 inch leiding

De totale buisleiding is 21 km lang. Safeti-NL verdeelt deze leiding in verschillende run rows. Per run row is het weerstation gebruikt die het dichtste bij het middelpunt van het betreffende leidingdeel ligt.

De afstand van de PR 10^{-6} -contour tot de buisleiding varieert, bijvoorbeeld door verschillen in de diepteligging en getroffen maatregelen. De maximale afstand bedraagt ongeveer 120 meter voor zowel de contouren die opgenomen zijn in het REV als berekend met Safeti-NL 9.2. De contour van Safeti-NL 9.2 is meestal iets groter dan de contour in het REV.

Een voorbeeld van de ligging van de leiding, de contouren berekend met Safeti-NL, de contouren die zijn opgenomen in het REV en de bestaande kwetsbare objecten en locaties staan in Figuur 1.



Figuur 1 Voorbeeld van ligging van de buisleiding, de risicocontouren en kwetsbare objecten. De risicocontouren voor het risico 10⁻⁶/jaar voor Safeti-NL (rood) en het REV (register externe veiligheid, geel) zijn weergegeven als ook de beperkt kwetsbare (geel), kwetsbare (oranje), zeer kwetsbare objecten (rood).

In Tabel 3 is het aantal beperkt kwetsbare, kwetsbare en zeer kwetsbare objecten binnen de twee contouren weergegeven. Voor deze buisleiding komen 6 extra kwetsbare objecten binnen de 10⁻⁶-contour te liggen wanneer de berekening wordt uitgevoerd met Safeti-NL 9.2.

Tabel 3 Overzicht van het aantal gebouwen dat binnen de genoemde 10⁻⁶-contour ligt van de 18-inch-buisleiding, uitgesplitst naar kwetsbaarheidscategorie. De telling is gemaakt op 10/2/2025.

	beperkt kwetsbaar	kwetsbaar	zeer kwetsbaar
REV	7	8	0
Safeti-NL	7	14	0

4.3.2 36 inch leiding

De totale lengte van de 36 inch-leiding in het ontvangen leidingbestand bedraagt 132 kilometer. Deze is in zijn geheel doorgerekend in Safeti-NL 9.2. De keuze voor de gebruikte weerstations is op dezelfde manier gemaakt als bij de 18 inch-leiding. De in Safeti-NL 9.2 berekende risicocontouren zijn vergeleken met de contouren in het REV. De grootte van de contouren in Safeti-NL neemt iets toe ten opzichte van de contouren in het REV. De toename bij deze buisleiding met een diameter van 36 inch is over het algemeen groter dan voor de hierboven beschreven buisleiding met een diameter van 18 inch.

De afstand van de PR 10⁻⁶-contour tot de buisleiding varieert. De maximale afstand voor het REV bedraagt ongeveer 180 meter, voor Safeti-NL 9.2 is dat 225 meter.

In Tabel 4 is het aantal beperkt kwetsbare, kwetsbare en zeer kwetsbare objecten binnen de twee contouren weergegeven. Voor deze buisleiding komen 18 beperkt kwetsbare en 7 kwetsbare objecten extra binnen de 10^{-6} -contour te liggen wanneer de berekening wordt uitgevoerd met Safeti-NL 9.2.

Tabel 4 Overzicht van het aantal gebouwen dat binnen de genoemde 10^{-6} -contour ligt van de 36-inch-buisleiding, uitgesplitst naar kwetsbaarheidscategorie. De telling is gemaakt op 10/2/2025.

	beperkt kwetsbaar	kwetsbaar	zeer kwetsbaar
REV	22	8	0
Safeti-NL	40	15	0

4.4 Buisleidingen met koolstofdioxide

Bij de uitgave van Safeti-NL 8.8 zijn nieuwe modellen voor *dense phase*-koolstofdioxide geïmplementeerd, zie paragraaf 2.1.3. De nieuwe modellen zijn door het RIVM beoordeeld. RIVM onderschrijft de conclusie van DNV dat de modelbenadering in Safeti-NL versie 8.5 niet valide is voor de situaties die zijn getest in de COSHER-experimenten, en dat het nieuwe model betere overeenstemming geeft met de twee COSHER-experimenten. Wel is nog onduidelijk of het nieuwe model ook in andere situaties, zoals een buisleiding met lagere druk, valide resultaten geeft [31]. Het RIVM adviseert om de nieuwe modellen toe te passen voor situaties vergelijkbaar met de COSHER-experimenten [7].

Het gebruik van de nieuwe modellen resulteert in een sterke toename in het berekende risico voor buisleidingen met *dense phase*-koolstofdioxide [31]. Bij het uitvoeren van het consequentieonderzoek zijn deze leidingen echter niet meegenomen, aangezien deze leidingen op het moment van onderzoeken niet bestonden. Om toch inzicht te geven in het effect van de nieuwe modellen zijn enkele berekeningen uitgevoerd voor *dense phase*-koolstofdioxideleidingen in Safeti-NL 8.3 en Safeti-NL 9.2. De methode en resultaten van deze berekeningen staan in Bijlage 3.

Aanvullend aan de nieuwe modellen in Safeti-NL 9.2 werkt DNV momenteel aan een verbeterd uitstroombestand, Pipebreak-II. Dit model wordt naar verwachting in het voorjaar van 2025 beschikbaar gesteld in de internationale versie van Safeti en zou in de volgende versie van Safeti-NL ook opgenomen kunnen worden. Het gebruik van Pipebreak-II kan resulteren in (nog) grotere effectafstanden voor *dense phase*-koolstofdioxide. Voor andere vloeistoffen en tot vloeistof verdichte gassen wordt een kleiner verschil tussen Pipebreak-I en Pipebreak-II verwacht.

4.5 Samenvatting

Uit het consequentie-onderzoek van AVIV blijkt dat voor de onderzochte steekproef van 59 bedrijven in de meeste gevallen de berekende risico's niet toenemen. Voor 19 bedrijven worden de risicocontouren wel groter. Dit leidt in de uitgevoerde steekproef tot één mogelijk knelpunt, omdat een (zeer) kwetsbaar gebouw nieuw binnen de PR 10^{-6} -contour van een bedrijf is komen te liggen. Voor ondergrondse buisleidingen met gevaarlijke stoffen zijn representatieve, fictieve buisleidingen geselecteerd. Hierbij kwamen geen knelpunten naar voren. Voor het

vervoer van gevaarlijke stoffen is alleen een kwalitatieve inschatting van de verschillen gemaakt.

Een kanttekening bij het consequentieonderzoek van AVIV is dat het is uitgevoerd met versie 8.8, omdat versie 9.2 destijds nog niet beschikbaar was. De verschillen tussen de twee versies zijn heel beperkt (zie paragraaf 5.2). Daarom geeft het onderzoek van AVIV een goed beeld over de te verwachten consequenties.

Voor drie situaties deed het RIVM aanvullend onderzoek, namelijk PGS-15-opslagen, hogedruk aardgasleidingen en buisleidingen met koolstofdioxide.

Voor PGS-15-opslagen blijkt dat de PR 10^{-6} -contour kan toenemen, doordat een bug in versie 8.3 nu is opgelost. Dit betreft een bug in de modellering van de verspreiding van onverbrand giftig product.

Voor hogedruk aardgasleidingen zijn aanvullende berekeningen uitgevoerd voor twee bestaande leidingen met een PR 10^{-6} -contour, namelijk een 18 inch-leiding en een 36 inch-leiding. De in Safeti-NL 9.2 berekende risicocontouren zijn vergeleken met de contouren in het REV. De grootte van de contouren in Safeti-NL neemt iets toe ten opzichte van de contouren in het REV. Door deze toename in grootte liggen er enkele kwetsbare gebouwen binnen de Safeti-NL-contour die buiten de REV-contour liggen.

Voor buisleidingen met *dense phase*-koolstofdioxide zijn de risico's berekend met versie 9.2 aanzienlijk groter dan berekend met versie 8.3 door de nieuwe modellen voor de verspreiding van *dense phase*-koolstofdioxide. Dit leidt echter niet tot nieuwe knelpunten in de ruimtelijke ordening, omdat er voorafgaand aan de release van versie 9.2 nog geen leidingen met *dense phase*-koolstofdioxide vergund waren.

5 Acceptatietest Safeti-NL versie 9.2

Het RIVM heeft een acceptatietest uitgevoerd bij oplevering van Safeti-NL versie 9.2. Naast een controle of de nieuwe functionaliteit op de juiste wijze is geïmplementeerd (paragraaf 5.1), is in de acceptatietest gekeken naar de verschillen in uitkomst tussen Safeti-NL versie 8.8 en versie 9.2 (paragraaf 5.2).

5.1 Nieuwe functionaliteiten

Het RIVM heeft DNV gevraagd in Safeti-NL versie 9.2 nieuwe functionaliteiten toe te voegen, met name voor het berekenen van risico's van hogedruk aardgasleidingen en het vervoer van gevaarlijke stoffen over het basisnet (zie hoofdstuk 3). Ook zijn in versie 9.2 stoffen toegevoegd en verwijderd, en zijn er upgrade regels ontwikkeld voor het inlezen van bestaande studies in versie 9.2. Als onderdeel van de acceptatietest van versie 9.2 is daarom met een eerste *release candidate* gecontroleerd of Safeti-NL, en in het bijzonder ook de nieuwe functionaliteit, correct werkt. Tijdens die testen kwamen enkele tekortkomingen naar voren. DNV heeft deze tekortkomingen vervolgens hersteld. Daarna heeft RIVM voor de uiteindelijke *release candidate* gecontroleerd of de tekortkomingen inderdaad verholpen waren. Dat bleek het geval.

5.2 Verschil in uitkomsten tussen Safeti-NL versie 8.8 en versie 9.2

Safeti-NL versie 9.2 was nog niet beschikbaar tijdens het uitvoeren van het consequentieonderzoek door AVIV. AVIV heeft daarom het consequentieonderzoek uitgevoerd met de op dat moment actuele versie van Safeti-NL, namelijk versie 8.8. Hoewel versie 8.8 en versie 9.2 gebruikmaken van dezelfde modellen, kunnen er kleine verschillen in uitkomsten optreden tussen Safeti-NL versie 8.8 en versie 9.2. Dit kan bijvoorbeeld komen door wijzigingen in het rekengrid, en door aangepaste *compilers* en *solvers* voor het oplossen van vergelijkingen. Daarnaast zijn enkele *bugs* in versie 8.8 gerepareerd in versie 9.2.

Met DNV is afgesproken dat de verschillen tussen versie 8.8 en versie 9.2 voor de teststudies kleiner zijn dan 10 procent in oppervlak van risicocontouren dan wel kleiner zijn dan 5 procent in afstanden. Grotere verschillen worden alleen geaccepteerd als deze verklaard kunnen worden door een *bug fix*. DNV heeft getest of aan deze voorwaarden is voldaan, en RIVM heeft ook een eigen test uitgevoerd met een *benchmark*-studie. Een samenvatting van de resultaten van de *benchmark*-studie staat hieronder.

5.2.1 Benchmark studie

Het RIVM heeft een *benchmark*-studie opgesteld voor de acceptatietest van Safeti-NL. Deze studie biedt een doorsnede van de verschillende scenario's die in de risicoberekeningen gebruikt worden en betreffen zowel giftige als ontvlambare stoffen. Verder bevat de studie verschillende installatie-onderdelen zoals drukvaten, atmosferische opslagen, korte leidingen, transportleidingen en PGS15-loodsen. Een

overzicht van de installatie-onderdelen en scenario's die in de *benchmark*-studie zijn opgenomen, staat in Tabel 5.

Tabel 5 Scenario's in de benchmark-studie van Safeti-NL

#	Stof	Installatie	Scenario's
1F	Propaan	Drukvat, 1000 m ³ , bovengronds	Instantaan, 10 minuten uitstroming, 10 mm gat
1G	Ammoniak	Drukvat, 1000 m ³ , bovengronds	Instantaan, 10 minuten uitstroming, 10 mm gat
2F	Propaan	Drukvat, 1000 m ³ , ondergronds	Instantaan, 10 minuten uitstroming, 10 mm gat
3F	Aceton	Atmosferische opslag, 1000 m ³	Instantaan, 10 minuten uitstroming, 10 mm gat
3FG	Acrylonitril	Atmosferische opslag, 1000 m ³	Instantaan, 10 minuten uitstroming, 10 mm gat
4F	Propaan	Leiding, 50 mm diameter	Breuk, lek
4G	Ammoniak	Leiding, 100 mm diameter	Breuk, lek
4FG	Acroleïne	Leiding, 200 mm diameter	Breuk, lek
5F	n-Pentaaan	Ketelwagen, atmosferisch	Instantaan, 75 mm gat
5G	Broom	Ketelwagen, atmosferisch	Instantaan, 75 mm gat
6F	Butaan	Ketelwagen, druk	Instantaan, 75 mm gat
6G	Zwavel dioxide	Ketelwagen, druk	Instantaan, 75 mm gat
7	-	PGS15 opslag, 50 ton	1.1a Automatische sprinkler
8F	Propaan	Buisleiding, 30 bar, 200 mm, ondergronds	Breuk
8G	Ammoniak	Buisleiding, 30 bar, 200 mm, ondergronds	Breuk

5.2.2 Resultaten van de vergelijking

De vergelijking tussen versie 8.8 en versie 9.2 is uitgevoerd op de volgende effectafstanden voor alle weerklassen:

- afstand tot 1%-letaliteit;
- afstand tot 3, 10 en 35 kW/m²;
- afstand tot 0,1 bar.

Daarnaast zijn de plaatsgebonden risicogrids (*outdoor* en *indoor*) vergeleken. Ten slotte zijn ook de effectgrids ($2,54 \times LBW$ en *IndoorLBW Dose*) vergeleken.

Uit de vergelijking blijkt dat de effectafstanden voor alle scenario's en weerklassen binnen 2 procent overeenkomen, en in vrijwel alle situaties is het verschil minder dan 1 procent. De risicogrids komen voor de scenario's goed overeen. Voor de *outdoor* risicogrids is de gevonden afwijking voor de PR 10⁻⁶- en 10⁻⁷-contouren minder dan 4 procent en betreft bij de grootste afwijkingen een afname. Alleen voor het bovengrondse opslagvat met 1.000 m³ propaan is een toename (19%) in de *indoor* PR 10⁻⁷-contour zichtbaar (1F). De *indoor* risico's worden niet gebruikt voor de toetsing aan de grenswaarde voor het plaatsgebonden risico. Deze toename heeft daarom geen ruimtelijke consequenties.

De vergelijking leidt tot de conclusie dat de effectafstanden en de (*outdoor*) plaatsgebonden risicocontouren voldoen aan de eis dat de verschillen kleiner zijn dan 5 procent in afstand.

6 Conclusies en aanbevelingen

Het RIVM heeft een nieuwe versie van Safeti-NL uitgebracht, versie 9.2. Deze versie vervangt de tot 1 januari 2025 voorgeschreven versie van Safeti-NL. Safeti-NL versie 9.2 gebruikt een nieuwe stoffendatabase, DIPPR 2018, verbeterde effectmodellen zoals een nieuw fakkelbrandmodel voor waterstof, een nieuw model voor *dense phase*-koolstofdioxide buisleidingen en een verbeterd verspreidingsmodel voor met name zware gassen. Daarnaast zijn er stoffen toegevoegd en zijn er functionaliteiten toegevoegd. Met name om risicoberekeningen voor het vervoer van gevaarlijke stoffen en hogedruk aardgasleidingen te kunnen uitvoeren. Met Safeti-NL versie 9.2 zijn nu ook de risico's van hogedruk aardgasleidingen (als alternatief voor CAROLA) en de risico's van het vervoer van gevaarlijke stoffen (als alternatief voor RBM II) te berekenen. Hiermee kunnen de berekeningen van de risico's van activiteiten met gevaarlijke stoffen op een uniforme wijze worden uitgevoerd.

Voor Safeti-NL versie 9.2 is een consequentieonderzoek uitgevoerd om te bepalen of de invoering van deze versie kan leiden tot knelpunten in de ruimtelijke ordening. Dit onderzoek is in drie delen uitgevoerd, namelijk een consequentieonderzoek van AVIV met versie 8.8. Een aanvullend onderzoek van RIVM, zoals beschreven in dit rapport. En een controle met een *benchmark*-studie of versie 8.8 en versie 9.2 dezelfde resultaten geven binnen een bandbreedte van 5 procent.

Uit het consequentieonderzoek van AVIV bleek dat voor één situatie de PR 10^{-6} -contour onverwachts veel toeneemt. Bij nadere analyse blijkt voor deze situatie het bepalende scenario het vrijkomen van onverbrand product bij een PGS15-opslag te zijn. De oorzaak van het verschil is een bug in versie 8.3 bij het meenemen van de invloed van het gebouw. Deze bug is opgelost in versie 9.2.

Uit het aanvullend onderzoek van het RIVM blijkt dat Safeti-NL versie 9.2 voor hogedruk aardgasleidingen met een diameter van 18 of 36 inch tot iets grotere contouren leidt ten opzichte van de contouren die berekend zijn met CAROLA. Ook voor *dense phase*-koolstofdioxide geeft het nieuwe verspreidingsmodel grotere risicocontouren.

Uit de controle met de *benchmark*-studie van RIVM voor acceptatietesten blijkt dat versie 8.8 en versie 9.2 dezelfde resultaten geven binnen een bandbreedte van 2 procent voor de effectafstanden. De plaatsgebonden risicocontouren (*outdoor*) verschillen maximaal 4 procent tussen de twee versies. De benchmarkstudie bevat (nog) geen scenario's voor hogedruk aardgasleidingen, omdat deze functionaliteit niet in Safeti-NL 8.8 aanwezig was. Er is wel een vergelijking met uitkomsten van CAROLA uitgevoerd, zoals hierboven beschreven. De benchmarkstudie bevat ook (nog) geen scenario's voor *dense phase*-koolstofdioxide buisleidingen, omdat zulke leidingen nog niet vergund zijn (er zijn nog geen risicocontouren of effectafstanden opgenomen in ruimtelijke plannen).

Op basis van het consequentieonderzoek van AVIV en de aanvullende onderzoeken, verwacht RIVM geen groot aantal knelpunten in de ruimtelijke ordening.

Naast de voorgaande bevindingen, komen er ook enkele aanbevelingen voort uit het onderzoek. Deze zijn:

- Met het nieuwe verspreidingsmodel voor de uitstroming en verspreiding uit ondergrondse buisleidingen met *dense phase*-koolstofdioxide zijn de effect- en risicoberekeningen verbeterd. Er zijn echter nog meer verbeteringen mogelijk, zoals het meenemen van de eerste fase bij breuk van een leiding, de *Rapid depressurization*. Dit is meegenomen in Pipebreak-II, het nieuwe model in Safeti. Aanbevolen wordt dit model te implementeren in de volgende versie van Safeti-NL.
- Safeti-NL is geschikt gemaakt voor het berekenen van de risico's van hogedruk aardgasleidingen. Hierbij wordt gebruikgemaakt van de CAROLA.dll voor het uitlezen van de faalfrequentie van een leiding als functie van de leidingkarakteristieken. De waarden in de CAROLA.dll zijn nog onvoldoende transparant. Aanbevolen wordt om de waarden in de CAROLA.dll beter te onderbouwen, dan wel de faalfrequenties opnieuw af te leiden uit openbare data.
- De vergelijking van de risico's van hogedruk aardgasleidingen laat zien dat Safeti-NL grotere effectafstanden berekent dan CAROLA. Beide modellen zijn gevalideerd, waarbij alleen de modellen van CAROLA gevalideerd zijn aan full-scale-experimenten van hogedruk aardgasbuisleidingbreuken. Deze experimenten zijn echter niet openbaar. Safeti-NL is gevalideerd met kleinere experimenten waarvan de uitkomsten wel openbaar zijn. Aanbevolen wordt te onderzoeken of de modellen in Safeti-NL gevalideerd kunnen worden aan full-scale-experimenten.

Referenties

1. *Besluit kwaliteit leefomgeving*. Beschikbaar via <https://wetten.overheid.nl/BWBR0041313/2024-07-01>. (Geraadpleegd 08-01-2025).
2. *Regeling basisnet*. Beschikbaar via <https://wetten.overheid.nl/BWBR0035000/2024-11-15>. (Geraadpleegd 08-01-2025).
3. *Omgevingsregeling*. Beschikbaar via <https://wetten.overheid.nl/BWBR0045528/2024-01-01/0/>. (Geraadpleegd 05-08-2024).
4. *Handleiding Risicoanalyse Transport (en bijlage)*, RIVM, 2017.
5. *Module V van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid*, RIVM, oktober 2020.
6. CAROLA. Associated Technology Pipeline Ltd en Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu.
7. RIVM, *Module I van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid*. oktober 2020.
8. RIVM, *Module II van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid*. oktober 2020.
9. Ministerie van Volkshuisvesting en Ruimtelijke Ordening. *Staatscourant van het Koninkrijk der Nederlanden*. Beschikbaar via <https://zoek.officielebekendmakingen.nl/stcrt-2024-41637.html>. (Geraadpleegd 08-01-2025).
10. A.J.H. Schulenberg, A.M. op den Dries, en L.M.A. Mentink, *Consequentieonderzoek NERI*, AVIV, 2024.
11. DNV, *Safeti-NL 8.5 Release Notes*, July 2022.
12. DNV, *Safeti-NL 8.8 Release Notes*, October 2023.
13. DNV, *Safeti-NL 9.2 Release Notes*, October 2024.
14. DIPPR. 2018, Design Institute for Physical Properties
15. M. Ahmad, et al., *COSHER joint industry project: Large scale pipeline rupture tests to study CO2 release and dispersion*. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2015. **37**: p. 340-353.
16. S. Fox, et al., *Overview of the Jack Rabbit II (JR II) field experiments and summary of the methods used in the dispersion model comparisons*. Atmospheric Environment, 2022. **269**: p. 118783.
17. F. Hart en M. Harper, *Validation of Recent Improvements in Phast Dispersion Modelling*. Hazards 32, Symposium Series No. 169, 2022.
18. RIVM, *Toelichting van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid*, maart 2022.
19. H. Bos en R. Mante, *Onderzoek RBM II in het kader van de inventarisatie van de toepassingsmogelijkheden bij de vaststelling van het Basisnet*, AVIV rapport 061069, 2008.
20. M. Gielisse, M.T. Dröge, en G.R. Kuik, *Risicoanalyse aardgastransportleidingen* N.V. Nederlandse Gasunie, DEI 2008.R.0939, NV Nederlandse Gasunie, 2008.
21. A.M.C. Boxman, et al., *Advies aandachtsgebieden - Beschouwing van voorstel alternatieve benadering voor de berekening van aandachtsgebieden*, 2022-0012, RIVM, 2022.

22. R.P. Cleaver, P.S. Cumber, en P. Genillon, *A Model to Predict the Characteristics of Fires Following the Rupture of Natural Gas Transmission Pipelines*. Process Safety and Environmental Protection, 2001. **79**(1): p. 3-12.
23. *Technical documentation Safeti-NL 8.8* DNV, 2023.
24. P. Bos, *Interventiewaarden ed 2023-1*, RIVM, 2023.
25. RIVM. *CLP - Risico's van stoffen*. Beschikbaar via <https://rvs.rivm.nl/onderwerpen/gevaarsindeling/CLP>. (Geraadpleegd 05-02-2025).
26. G.M.H. Laheij, A.A.C. van Vliet, en E.S. Kooi, *Achtergronden bij de vervanging van zoneringafstanden hogedruk aardgastransportleidingen van de N.V. Nederlandse Gasunie*, RIVM-rapport 620121001/2008, RIVM, 2008.
27. RIVM, *Handleiding Risicoanalyse Transport versie 1.2. juli 2017*, 2017.
28. RIVM, *Module II van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid*. januari 2025.
29. E. Kooi en G. Laheij, *Review of the Dutch calculation method to assess off-site risks for chemical warehouse fires*, 2021-0120, RIVM, 2021.
30. *Register Externe Veiligheid (WFS)*. Beschikbaar via <https://www.registerexterneveiligheid.nl/kaartbeelden>, <https://rev-portaal.nl/geoserver/wfs?request=GetCapabilities>. (Geraadpleegd december 2024).
31. P.A.M. Uijt de Haag, *Aanbiedingsbrief Safeti-NL versie 8.8*, RIVM, 2023.
32. L. Gooijer, G.M.H. Laheij, en A.G. Wolting, *Protocol aanpassing rekenmethodieken Externe veiligheid*, RIVM-Rapport 620550009/2012, RIVM, 2012.
33. *NEN 3650-1:2020 (NL)Eisen voor buisleidingsystemen - Deel 1: Algemene eisen*, NEN, 2020.
34. R. Bolt, et al., *Risicoanalyse aardgastransportleidingen*, RT 2003.R.0355, versie 9.4., NV Nederlandse Gasunie, 2003.
35. E. Holleman, H. Woesthuis, en S. van Paassen, *Aramis concept NRD BH8744I&BRP001F01*, Royal HaskoningDHV, 2022.

7 Bijlage 1 Overzicht aanwezige stoffen in Safeti-NL 9.2

Stofnaam (NL)	CAS-nummer	Stofnaam Safeti-NL 9.2	Indeling giftig en/of ontvlambaar	Toegevoegd/aangepast in
1,2-dichloorethaan	107-06-2	1,2-DICHLOROETHANE	FLAMMABLE	9.2
1,2-dichloorethaan	107-06-2	1,2-DICHLOROETHANE (TG)	BOTH	9.2
1,3-butadien	106-99-0	1,3-BUTADIENE	FLAMMABLE	
1-buteen	106-98-9	1-BUTENE	FLAMMABLE	
1-penteen	109-67-1	1-PENTENE	FLAMMABLE	9.2
aceton	67-64-1	ACETONE	FLAMMABLE	
acetoncyanhydride	75-86-5	ACETONE CYANOHYDRIN (TG)	TOXIC	9.2
acetonitril	75-05-8	ACETONITRILE	FLAMMABLE	9.2
acetonitril	75-05-8	ACETONITRILE (TG)	BOTH	8.5
acetyleen	74-86-2	ACETYLENE	FLAMMABLE	
acroleïne	107-02-8	ACROLEIN	BOTH	
acroleïne	107-02-8	ACROLEIN (TG)	BOTH	8.5
acrylonitril	107-13-1	ACRYLONITRILE	BOTH	
acrylonitril	107-13-1	ACRYLONITRILE (TG)	BOTH	8.5
ADR klasse 6.1 vg I		ADR KLASSE 6.1 VG I	TOXIC	
ADR klasse 6.1 vg II		ADR KLASSE 6.1 VG II	TOXIC	
allylalcohol	107-18-6	ALLYL ALCOHOL	BOTH	
allylalcohol	107-18-6	ALLYL ALCOHOL (TG)	BOTH	8.5
allylamine	107-11-9	ALLYLAMINE (TG)	BOTH	9.2
allylchloride	107-05-1	3-CHLORO-1-PROPENE	FLAMMABLE	
allylchloride	107-05-1	3-CHLORO-1-PROPENE (TG)	BOTH	8.5
ammoniak	7664-41-7	AMMONIA	TOXIC	
ammoniak	7664-41-7	AMMONIA (TG)	TOXIC	8.5
arsine	7784-42-1	ARSINE (TG)	BOTH	9.2
benzeen	71-43-2	BENZENE	FLAMMABLE	
benzylchloride	100-44-7	BENZYL CHLORIDE (TG)	TOXIC	8.5
boortrichloride	10294-34-5	BORON TRICHLORIDE (TG)	TOXIC	9.2
boortrifluoride	7637-07-2	BORON TRIFLUORIDE (TG)	TOXIC	9.2
broom	7726-95-6	BROMINE	TOXIC	
broom	7726-95-6	BROMINE (TG)	TOXIC	8.5
chloor	7782-50-5	CHLORINE	TOXIC	
chloor	7782-50-5	CHLORINE (TG)	TOXIC	8.5
chlooracetaldehyde	107-20-0	CHLOROACETALDEHYDE (TG)	TOXIC	9.2
chlooracetylchloride	79-04-9	CHLOROACETYL CHLORIDE (TG)	TOXIC	9.2
dichloorsilaan	4109-96-0	DICHLOROSILANE (TG)	BOTH	9.2
dimethylamine	124-40-3	DIMETHYLAMINE	FLAMMABLE	

Stofnaam (NL)	CAS-nummer	Stofnaam Safeti-NL 9.2	Indeling giftig en/of ontvlambaar	Toegevoegd/aangepast in
dimethylamine	124-40-3	DIMETHYLAMINE (TG)	BOTH	8.5
dimethylsulfaat	77-78-1	DIMETHYL SULFATE (TG)	TOXIC	9.2
epichloorhydrine/1-chloro-2,3-epoxypropane	106-89-8	1-CHLORO-2,3-EPOXYPROPANE (TG)	BOTH	9.2
ethaan	74-84-0	ETHANE	FLAMMABLE	
ethanol	64-17-5	ETHANOL	FLAMMABLE	
ethylchloorformiaat	541-41-3	ETHYL CHLOROFORMATE (TG)	BOTH	9.2
ethyleen	74-85-1	ETHYLENE	FLAMMABLE	
ethyleenimine	151-56-4	ETHYLENEIMINE	BOTH	
ethyleenimine	151-56-4	ETHYLENEIMINE (TG)	BOTH	8.5
ethyleenoxide	75-21-8	ETHYLENE OXIDE	BOTH	
ethyleenoxide	75-21-8	ETHYLENE OXIDE (TG)	BOTH	8.5
fluor	7782-41-4	FLUORINE (TG)	TOXIC	8.5
formaldehyde	50-00-0	FORMALDEHYDE (TG)	TOXIC	8.5
fosfine	7803-51-2	PHOSPHINE (TG)	BOTH	8.5
fosfortrichloride	7719-12-2	PHOSPHORUS TRICHLORIDE (TG)	TOXIC	9.2
fosgeen	75-44-5	PHOSGENE	TOXIC	
fosgeen	75-44-5	PHOSGENE (TG)	TOXIC	8.5
hydrazine	302-01-2	HYDRAZINE (TG)	BOTH	8.5
isobutanol	78-83-1	ISOBUTANOL	FLAMMABLE	
isopropanol	67-63-0	ISOPROPANOL	FLAMMABLE	
koolstofdioxide	124-38-9	CARBON DIOXIDE (HSE_RR749 PROBITS)	TOXIC	8.5
koolstofmonoxide	630-08-0	CARBON MONOXIDE	TOXIC	
koolstofmonoxide	630-08-0	CARBON MONOXIDE (TG)	TOXIC	8.5
koolstofdisulfide	75-15-0	CARBON DISULFIDE	FLAMMABLE	
lucht	132259-10-0	AIR	INERT	
methaan	74-82-8	METHANE	FLAMMABLE	
methacrylonitril	126-98-7	METHACRYLONITRILE (TG)	BOTH	9.2
methanol	67-56-1	METHANOL (TG)	BOTH	8.8
methylamine	74-89-5	METHYLAMINE	FLAMMABLE	
methylamine	74-89-5	METHYLAMINE (TG)	BOTH	8.5
methylbromide	74-83-9	METHYL BROMIDE	TOXIC	
methylbromide	74-83-9	METHYL BROMIDE (TG)	TOXIC	8.5
methylchloorformiaat	79-22-1	METHYL CHLOROFORMATE (TG)	BOTH	9.2
methylisocyanaat	624-83-9	METHYL ISOCYANATE	BOTH	
methylisocyanaat	624-83-9	METHYL ISOCYANATE (TG)	BOTH	8.5
methylmercaptaan	74-93-1	METHYLMERCAPTAN	BOTH	
methylmercaptaan	74-93-1	METHYLMERCAPTAN (TG)	BOTH	8.5

Stofnaam (NL)	CAS-nummer	Stofnaam Safeti-NL 9.2	Indeling giftig en/of ontvlambaar	Toegevoegd/aangepast in
mierenzuur	64-18-6	FORMIC ACID (TG)	BOTH	8.5
m-xyleen	108-38-3	M-XYLENE	FLAMMABLE	
n-butaan	106-97-8	N-BUTANE	FLAMMABLE	
n-butanol	71-36-3	N-BUTANOL	FLAMMABLE	
n-butylacrylaat	141-32-2	N-BUTYL ACRYLATE	FLAMMABLE	
n-heptaan	142-82-5	N-HEPTANE	FLAMMABLE	
n-hexaan	110-54-3	N-HEXANE	FLAMMABLE	
n-nonaan	111-84-2	N-NONANE	FLAMMABLE	
n-octaan	111-65-9	N-OCTANE	FLAMMABLE	
n-pentaan	109-66-0	N-PENTANE	FLAMMABLE	
oxalonitril	460-19-5	CYANOGEN (TG)	BOTH	9.2
propaan	74-98-6	PROPANE	FLAMMABLE	
propylamine	107-10-8	n-PROPYLAMINE (TG)	BOTH	9.2
propyleen	115-07-1	PROPYLENE	FLAMMABLE	
propyleenimine	75-55-8	PROPYLENEIMINE (TG)	BOTH	9.2
propyleenoxide	75-56-9	1,2-PROPYLENE OXIDE (TG)	BOTH	8.8
stikstof	7727-37-9	NITROGEN	INERT	
stikstof (asphyxiating)		NITROGEN (ASPHYXIATING)	TOXIC	
stikstofdioxide	10102-44-0	NITROGEN DIOXIDE	TOXIC	
stikstofdioxide	10102-44-0	NITROGEN DIOXIDE (TG)	TOXIC	8.5
styreen	100-42-5	STYRENE	FLAMMABLE	
tetracarbonylnikkel	13463-39-3	NICKEL CARBONYL (TG)	BOTH	9.2
tetrachloorsilaan	10026-04-7	TETRACHLOROSILANE (TG)	TOXIC	9.2
tetraethyllood	78-00-2	TETRAETHYL LEAD	TOXIC	
tetraethyllood	78-00-2	TETRAETHYL LEAD (TG)	TOXIC	8.5
tolueen	108-88-3	TOLUENE	FLAMMABLE	
tolueendiisocyaanaat (2,4)	584-84-9	2,4-TOLUENE DIISOCYANATE (TG)	TOXIC	9.2
tolueendiisocyaanaat (2,6)	91-08-7	2,6-TOLUENE DIISOCYANATE (TG)	TOXIC	9.2
trichloorsilaan	10025-78-2	TRICHLOROSILANE	FLAMMABLE	9.2
trichloorsilaan	10025-78-2	TRICHLOROSILANE (TG)	BOTH	9.2
triethylamine	121-44-8	TRIETHYLAMINE	FLAMMABLE	
trimethylamine	75-50-3	TRIMETHYLAMINE	FLAMMABLE	
trimethylamine	75-50-3	TRIMETHYLAMINE (TG)	BOTH	8.5
vinylacetaat	108-05-4	VINYL ACETATE	FLAMMABLE	
vinylchloride	75-01-4	VINYL CHLORIDE	FLAMMABLE	
water	7732-18-5	WATER	INERT	
waterstof	1333-74-0	HYDROGEN	FLAMMABLE	
waterstofchloride	7647-01-0	HYDROGEN CHLORIDE	TOXIC	

Stofnaam (NL)	CAS-nummer	Stofnaam Safeti-NL 9.2	Indeling giftig en/of ontvlambaar	Toegevoegd/aangepast in
waterstofchloride	7647-01-0	HYDROGEN CHLORIDE (TG)	TOXIC	8.5
waterstofcyanide	74-90-8	HYDROGEN CYANIDE	BOTH	
waterstofcyanide	74-90-8	HYDROGEN CYANIDE (TG)	BOTH	8.5
waterstoffluoride	7664-39-3	HYDROGEN FLUORIDE	TOXIC	
waterstoffluoride	7664-39-3	HYDROGEN FLUORIDE (TG)	TOXIC	8.5
waterstofsulfide	7783-06-4	HYDROGEN SULFIDE	BOTH	
waterstofsulfide	7783-06-4	HYDROGEN SULFIDE (TG)	BOTH	8.5
zuurstof	7782-44-7	OXYGEN	INERT	
zwaveldioxide	7446-09-5	SULFUR DIOXIDE	TOXIC	
zwaveldioxide	7446-09-5	SULFUR DIOXIDE (TG)	TOXIC	8.5
zwaveltrioxide	7446-11-9	SULFUR TRIOXIDE (TG)	TOXIC	8.5
zwavelzuur	7664-93-9	SULFURIC ACID (TG)	TOXIC	9.2

In Safeti-NL 9.2 is ook een aantal stoffen verwijderd ten opzichte van 8.8. Het betreft stoffen met de indeling *giftig of giftig en ontvlambaar*, waarvoor geen probitwaarden waren opgenomen. Het gaat hierbij om:

- Benzylchloride (CAS-nummer: 100-44-7)
- Fluor (CAS-nummer: 7782-41-4)
- Formaldehyde (CAS-nummer: 50-00-0)
- Hydrazine (CAS-nummer: 302-01-2)
- Stikstofoxide (CAS-nummer: 10102-43-9)

Voor deze stoffen is wel de variant met de aanduiding 'TG' (Toetsgroep probitrelaties) aanwezig, met uitzondering van stikstofoxide. De stoffen methanol en propyleenoxide waren eerder al verwijderd, namelijk in Safeti-NL 8.8. Ook voor deze stoffen is de stof met aanduiding 'TG' aanwezig in Safeti-NL 9.2.

8 Bijlage 2 Wijziging uitgangspunten hogedruk aardgasleidingen

8.1 Uitstroomtijd bij vertraagde ontsteking van aardgas

In de rekenmethode voor het berekenen van een fakkelbrand uit een hogedruk aardgasleiding met CAROLA worden twee scenario's gemodelleerd. Er wordt uitgegaan van ofwel direct ontsteken (fakkelbrand 0s – 20s), ofwel vertraagd ontsteken (120s – 140s). Hiervoor wordt voor de fakkelbrand het gemiddelde uitstroomdebiet gebruikt voor de twee tijdsintervallen. Deze ontstekingstijden zijn gebaseerd op casuïstiek van 36 incidenten wereldwijd, waarbij 75 procent van de gevallen in de eerste twintig seconden ontsteekt. 25 procent ontsteekt vertraagd, gemiddeld na 120s-140s [26].

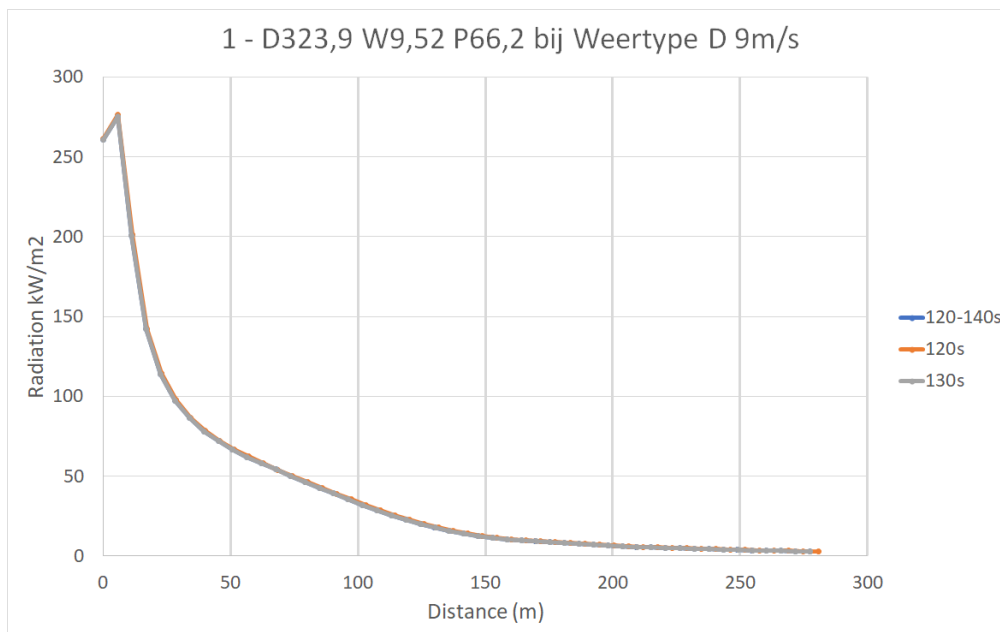
De huidige versie van Safeti-NL kan vertraagde fakkelbranden meenemen op basis van het debiet op één tijdstip, zonder dat hiervoor een extra scenario aangemaakt hoeft te worden. Dit vereenvoudigt de invoer en versnelt de berekeningen. Deze paragraaf vergelijkt de uitkomsten van vertraagde fakkelbranden (120s-140s) met fakkelbranden op één tijdstip (120s dan wel 130s). Ten slotte wordt het resulterende risico vergeleken voor de verschillende methodes.

Als eerste is de invloed van de keuze voor het uitstroomdebiet (tussen 120s en 140s, op 120s of op 130s) op effectafstanden bepaald. Dit is gedaan voor de effectafstand van de fakkelbrand bij vertraagde ontsteking in geval van breuk van de leiding bij weertype D9. Deze vergelijking is uitgevoerd voor acht leidingen met verschillende diameters (D), wanddikte (W) en druk (P), zie Tabel 6. Er is gerekend met een H-gas mengsel (C1-C5, N₂ en CO₂ waarvan 91,4% methaan).

Tabel 6 Parameters van de buisleiding gebruikt per scenario; diameter D, wanddikte W en druk P.

Scenario	1	2	3	4	5	6	7	8
D (mm)	323,9	457	610	610	914	914	1067	1219
W (mm)	9,52	8,3	7,455	7,455	12,856	11,182	13,69	14,12
P (bar)	66,2	66,2	66,2	40	66,2	66,2	66,2	66,2

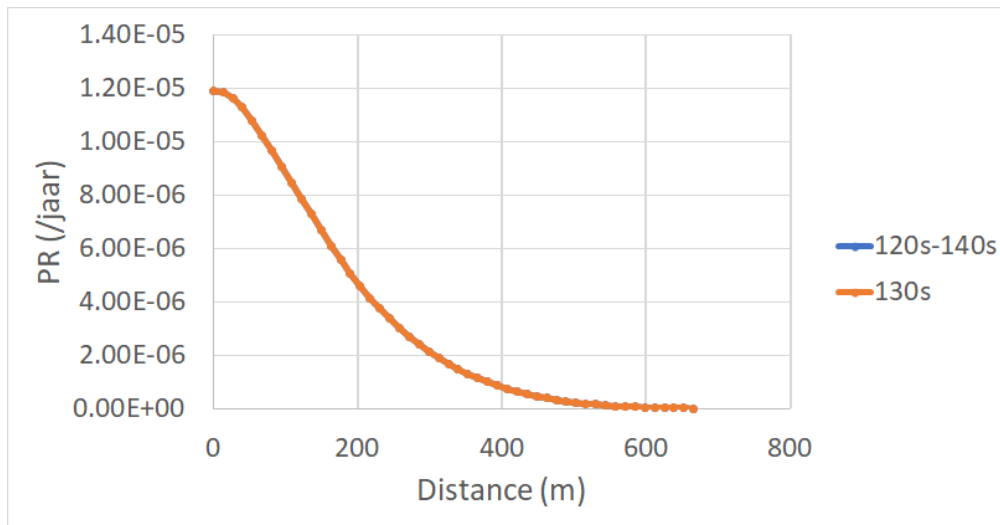
In Figuur 2 is de warmtestraling weergegeven voor buisleiding 1 (Tabel 1) en de drie keuzes voor uitstroommodellering. De verschillen in berekende warmtestraling zijn heel beperkt. Dit geldt ook voor de andere buisleidingen van Tabel 6.



Figuur 2 Warmtestraling (kW/m²) als functie van de afstand (m) voor de fakkelbrand bij vertraagde ontsteking van de uitstroom bij een breuk van een aardgasleiding. De verschillende lijnen overlappen.

De uitkomsten van de verschillende scenario's van de huidige methode (gemiddeld debiet 120s-140s) zijn vergeleken met de uitstroom op één tijdstip (debiet op 120s). De maximale afwijking onder alle datapunten (warmtestraling op een bepaalde afstand) is 12,4 procent. De gemiddelde afwijking voor de datapunten van één scenario is maximaal 0,57 procent $\pm$ 1,74 procent. Ook zijn de uitkomsten van de huidige methode vergeleken met ontsteking op 130s. Hieruit volgt een maximale afwijking tussen datapunten van 0,48 procent. Gemiddeld wijken de datapunten maximaal 0,023 procent van elkaar af. Hieruit blijkt dat voor de warmtegrafieken de uitkomsten niet-significant verschillen wanneer 130s als één tijdstip wordt gemodelleerd in plaats van het gemiddelde over 120-140s. De afwijking van 130s als het tijdstip is kleiner dan wanneer 120s als tijdstip wordt gekozen.

Vervolgens is het plaatsgebonden risico vergeleken voor alle scenario's samen, waarbij ook de directe ontsteking (gemiddeld debiet van 0-20s) is meegenomen. De vergelijking is te zien in Figuur 3. De verschillen tussen de twee keuzes zijn minimaal. De tweede optie (130s) heeft een veel kortere rekentijd.



Figuur 3 Plaatsgebonden risico (/jaar) afgezet tegen de afstand (m) voor de huidige methodiek van 120s-140s en de berekening op één tijdstip (130s). De blauwe lijn is niet goed te zien doordat de lijnen bijna exact overlappen.

In het RIVM-rapport Advies aandachtsgebieden [21] staan toetsingscriteria waarmee bepaald kan worden hoe eventuele aanpassingen van rekenmethoden scoren op het gebied van ontvankelijkheid, validiteit, betrouwbaarheid en toepasbaarheid. De criteria en de scores van de drie opties zijn naast elkaar gezet in Tabel 7. De vaste uitstroomtijd 130s krijgt de beste score, omdat de uitkomst voldoende representatief is voor de periode 120-140s en omdat de rekentijd aanzienlijk kleiner is dan bij middeling over 120 tot 140s (Tabel 8).

Tabel 7 Overzicht toetsing van de beschreven methodes aan de in het protocol rekenmethodieken beschreven criteria.

	120-140s	120s	130s
Ontvankelijkheid	+	+	+
Validiteit	+	0	+
Betrouwbaarheid	+	0	+
Reproduceerbaar	+	+	+
Conservatief	+	-	+
Toepasbaarheid	0	+	+

Tabel 8 In detail beschreven toetsing van de methode '130s' aan de in het protocol rekenmethodieken beschreven criteria.

	Criterium	Toetsing
Ontvankelijkheid	Is duidelijk van welke partij het voorstel afkomstig is en wie contactpersoon is voor vragen of verduidelijkingen?	Het voorstel komt vanuit het RIVM na overleg met DNV. Eén vertraagd tijdstip (130s) is makkelijker in te voeren dan een tijdspanne (120-140s).
Ontvankelijkheid	In hoeverre is de voorgestelde aanpassing eenduidig en volledig beschreven, zodat deze toetsbaar is?	Het is een duidelijk voorstel om de vertraagde ontsteking uit te rekenen op één tijdstip in plaats van een tijdspanne.
Validiteit	In hoeverre bieden de beschikbare gegevens een actuele, representatieve wetenschappelijke onderbouwing van de voorgestelde aanpassing?	De vertraging in ontsteking verandert niet. Er is geen wetenschappelijke onderbouwing om de berekening te doen in een tijdspanne of op één tijdstip. De incident casuïstiek geeft enkel aan dat er vertraagde ontsteking plaatsvindt die middelt tot deze vertraging.
Validiteit	In hoeverre is de voorgestelde aanpassing relevant gezien de wetenschappelijke onzekerheid?	Binnen de onzekerheid verandert er niets. De uitkomsten veranderen niet significant.
Betrouwbaarheid	In hoeverre is de voorgestelde aanpassing FAIR (Findable, Accessible, Interoperable en Reusable)?	Goed, namelijk hierboven beschreven.
Betrouwbaarheid	In hoeverre zijn de resultaten reproduceerbaar en (on)gevoelig voor kleine veranderingen in uitgangspunten en parameters?	Goed. Hierboven getoetst op verschillende tijdstippen, wanddiktes, leidingdrukken en leidingdiameters.

	Criterium	Toetsing
Betrouwbaarheid	In hoeverre is een veilige benadering (ook wel conservatief genoemd) gekozen in geval van onzekerheid en bij een generieke aanpak?	Goed, verandert niet ten opzichte van de bestaande methode.
Betrouwbaarheid	Worden vergelijkbare situaties op een vergelijkbare wijze benaderd?	Ja, allemaal berekend met Safeti-NL. Uitkomsten wijken niet-significant af van de eerdere methode.
Toepasbaarheid	In hoeverre is de voorgestelde aanpassing passend bij de wettelijk beoogde functie van de uitkomsten van het modelinstrumentarium?	Er is geen verandering in de uitkomsten, en dus blijft het kloppen. De invoer van het modelinstrumentarium wordt vergemakkelijkt.
Toepasbaarheid	In hoeverre is de voorgestelde aanpassing relevant gezien de wettelijke doorwerking?	De invoer en berekening wordt makkelijker door deze inpassing.
Toepasbaarheid	In hoeverre is de voorgestelde aanpassing toekomstbestendig?	Dit is toekomstbestendig. De functie van één vertraagd tijdstip van ontsteken bestaat al in het modelinstrumentarium.
Toepasbaarheid	Wat zijn de kosten en de tijd nodig voor het beschikbaar stellen van een rekeninstrument waarin de aanpassingen zijn verwerkt?	Geen, juist de aanpassing bespaart kosten en tijd. Voor een tijdspanne (120-140s) zou namelijk wel een functie geprogrammeerd moeten worden.
Toepasbaarheid	Is het voorstel uitvoerbaar en uitlegbaar?	Ja, namelijk hierboven beschreven.

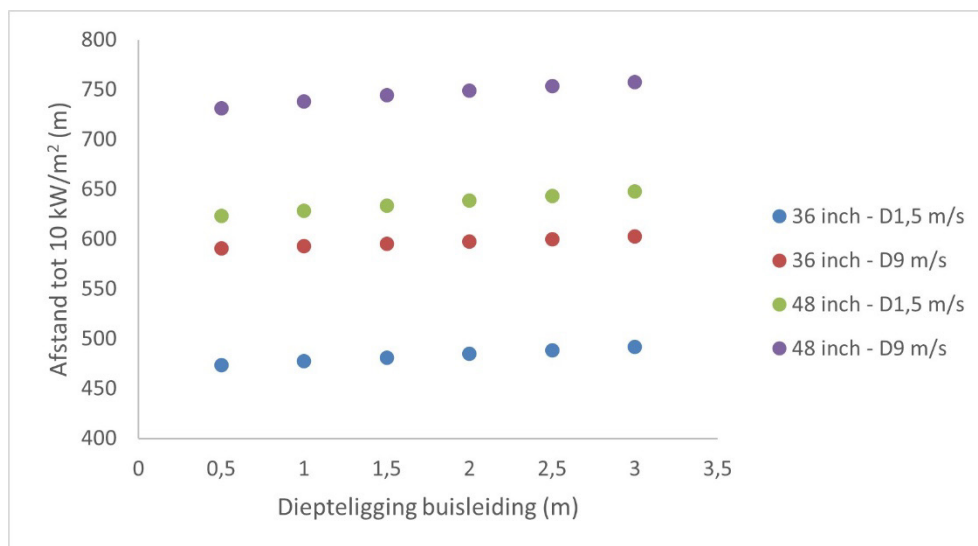
8.2 Diepteligging bij de effectmodellering

De diepteligging van hogedruk aardgasleidingen heeft een effect op de warmtestraling, veelal nemen de effectafstanden voor de warmtestraling toe met toenemende diepteligging. De diepteligging van aardgasleidingen is in detail in kaart gebracht. In CAROLA wordt echter voor de berekening uitgegaan van een vaste waarde van de diepteligging, ongeacht de daadwerkelijke diepteligging van de leiding. Voor buisleidingen met een diameter kleiner dan of gelijk aan 407 mm wordt een diepteligging van 1,2 m veronderstelt. Voor buisleidingen met

een diameter groter dan 407 mm, wordt een diepteligging van 1,75 m veronderstelt. Het kiezen voor een vaste diepteligging voor de effectmodellering zorgt voor verlies in nauwkeurigheid. Daartegenover staat een verkorting van de rekentijd ten opzichte van het gebruik van de daadwerkelijke diepteligging van alle leidingsegmenten.

De berekeningen voor de afmetingen van de krater in CAROLA en Safeti-NL komen niet overeen. Daarom is het uitgangspunt van een vaste diepteligging opnieuw beoordeeld.

In deze paragraaf wordt het effect van de diepteligging op de afstand tot 10 kW/m² onderzocht. Dit is onderzocht voor een buisleiding van zowel 36 inch als 48 inch. De diepteligging is gevarieerd van 0,5 tot en met 3,0 meter in stappen van 0,5 meter. Voor het weer is gekeken naar D 1,5 m/s en D 9 m/s. In Figuur 4 en Tabel 9 staan de resultaten. Te zien is dat de trend voor de verschillende weertypen en diameters vergelijkbaar is: bij een toenemende diepteligging neemt de afstand tot 10 kW/m² toe. De verschillen in afstand zijn echter beperkt en daarmee is de diepteligging nauwelijks relevant. Er is gekozen voor een vaste diepteligging voor alle leidingdiameters.



Figuur 4 Afstand tot 10 kW/m² voor aardgasbuisleidingen met een diameter van 36 en 48 inch voor weertypen D 1,5 m/s en D 9 m/s als functie van de diepteligging. De druk in de buisleidingen is 66 bar(g).

Tabel 9 Afstand tot 10 kW/m² voor aardgasbuisleidingen met een diameter van 36 en 48 inch voor weertypen D1,5 m/s en D9 m/s voor verschillende waarden voor de diepteligging. De druk in de buisleidingen is 66 bar(g).

Scenario	Afstand tot 10 kW/m ² [m]		Verskil in afstand t.o.v. 1,5m [%]	
	D1,5	D9	D1,5	D9
36 inch - 66 bar - 0,5 m diepte	473	590	-1,6	-0,8
36 inch - 66 bar - 1,0 m diepte	477	593	-0,8	-0,4
36 inch - 66 bar - 1,5 m diepte	481	595	0,0	0,0
36 inch - 66 bar - 2,0 m diepte	485	598	0,8	0,4
36 inch - 66 bar - 2,5 m diepte	488	600	1,5	0,8
36 inch - 66 bar - 3,0 m diepte	492	603	2,2	1,2
48 inch - 66 bar - 0,5 m diepte	623	732	-1,6	-1,7
48 inch - 66 bar - 1,0 m diepte	629	738	-0,8	-0,8
48 inch - 66 bar - 1,5 m diepte	634	744	0,0	0,0
48 inch - 66 bar - 2,0 m diepte	638	749	0,8	0,7
48 inch - 66 bar - 2,5 m diepte	643	754	1,5	1,2
48 inch - 66 bar - 3,0 m diepte	648	758	2,2	1,8

Voor de diepteligging voor de kraterberekening zijn vier opties. Al deze opties zijn getoetst aan het protocol rekenmethodieken.

Optie 1: Gebruik van de daadwerkelijke diepteligging voor elk segment van de buisleiding. Deze optie kost veel rekentijd en scoort daarom laag op toepasbaarheid.

Optie 2: Vaste diepteligging van 1 m voor elk segment. 1 m is de minimale diepteligging voor nieuwe hogedruk aardgasleidingen [33]. Deze optie is niet conservatief, omdat veel leidingen dieper liggen. De effectafstanden zijn namelijk groter naarmate de leiding dieper ligt. De optie scoort goed op toepasbaarheid doordat de rekentijd afneemt ten opzichte van optie 1.

Optie 3: Vaste diepteligging van 1,31 m voor elk segment. 1,31 m is de referentiediepteligging. Dit is een gewogen gemiddelde voor de diepteligging van hogedruk aardgasleidingen in Nederland [34]. Deze optie is niet conservatief, omdat een deel van de leidingen dieper ligt dan de referentiediepte. De optie scoort goed op toepasbaarheid doordat de rekentijd afneemt ten opzichte van optie 1.

Optie 4: Vaste diepteligging van 1,5 m voor elk segment⁵. Deze optie is conservatiever dan optie 2 en 3, omdat de effectafstanden toenemen met de diepteligging. De optie scoort goed op toepasbaarheid doordat de rekentijd afneemt ten opzichte van optie 1 [34].

⁵ Tijdens de keuze voor de waarde 1,5 m was niet bekend dat een diepteligging van 1,75 m wordt gebruikt voor buisleidingen met een diameter groter dan 407 mm. De verschillen in effectafstand tussen 1,5 m diepteligging en 1,75 m diepteligging zijn echter klein zoals blijkt uit Tabel 5. De waarde van 1,5 m is daarom gehandhaafd.

In Tabel 10 zijn deze scores samengevat en in Tabel 11 is de onderbouwing verder uitgewerkt. Optie 4, een vaste diepteligging van 1,5 m, scoort het beste op de criteria.

Tabel 10 Overzicht toetsing van de beschreven methodes aan de in het protocol rekenmethodieken beschreven criteria.

Variabel		1 m	1,31 m	1,5 m
Ontvankelijkheid	+	+	+	+
Validiteit	+	+	+	+
Betrouwbaarheid	0	-	0	0/+
<i>Reproduceerbaar</i>	+	+	+	+
<i>Conservatief</i>	0	-	0	0/+
Toepasbaarheid	0	+	+	+

Tabel 11 In detail beschreven toetsing aan de in het protocol rekenmethodieken beschreven criteria van optie 4: een vaste diepteligging van 1,5 m.

	Criterium	Toetsing
Ontvankelijkheid	Is duidelijk van welke partij het voorstel afkomstig is en wie contactpersoon is voor vragen of verduidelijkingen?	Het voorstel is afkomstig van RIVM in overleg met DNV. Een vaste diepteligging versimpelt de modellering en verkort de rekentijd.
Ontvankelijkheid	In hoeverre is de voorgestelde aanpassing eenduidig en volledig beschreven zodat deze toetsbaar is?	Het is een duidelijk voorstel om een vaste diepteligging te gebruiken.
Validiteit	In hoeverre bieden de beschikbare gegevens een actuele, representatieve wetenschappelijke onderbouwing van de voorgestelde aanpassing?	1,5 m is een representatieve diepteligging van hogedruk aardgasleidingen. Zie hiervoor [Gasunie 2003]
Validiteit	In hoeverre is de voorgestelde aanpassing relevant gezien de wetenschappelijke onzekerheid?	Binnen de onzekerheid verandert er niets. De uitkomsten veranderen niet-significant ten opzichte van het gebruik van een variabele diepteligging.
Betrouwbaarheid	In hoeverre is de voorgestelde aanpassing FAIR (Findable, Accessible, Interoperable en Reusable)?	Goed, namelijk hierboven beschreven.
Betrouwbaarheid	In hoeverre zijn de resultaten reproduceerbaar en (on)gevoelig voor kleine veranderingen in uitgangspunten en parameters?	De uitkomsten van de effect- en risicoafstanden zijn nauwelijks gevoelig voor de diepteligging. Het kiezen van een vaste diepteligging vermindert daarom de betrouwbaarheid van de resultaten niet.

	Criterium	Toetsing
Betrouwbaarheid	In hoeverre is een veilige benadering (ook wel conservatief genoemd) gekozen in geval van onzekerheid en bij een generieke aanpak?	De keuze voor 1,5 m diepteligging is conservatief voor leidingen die minder diep liggen. Voor leidingen die dieper liggen dan 1,5 m is de afwijking in effectafstand zeer gering.
Betrouwbaarheid	Worden vergelijkbare situaties op een vergelijkbare wijze benaderd?	Ja, de berekening van het risico in CAROLA gebeurt ook met een vaste diepteligging voor de kratermodellering.
Toepasbaarheid	In hoeverre is de voorgestelde aanpassing passend bij de wettelijk beoogde functie van de uitkomsten van het modelinstrumentarium?	Er is nauwelijks verandering in de uitkomsten, en dus blijft het kloppen. De rekentijd verbetert ten opzichte van een variabele diepteligging.
Toepasbaarheid	In hoeverre is de voorgestelde aanpassing relevant gezien de wettelijke doorwerking?	De rekentijd verbetert ten opzichte van een variabele diepteligging.
Toepasbaarheid	In hoeverre is de voorgestelde aanpassing toekomstbestendig?	De aanpassing kan gebruikt blijven worden in de toekomst.
Toepasbaarheid	Wat zijn de kosten en de tijd nodig voor het beschikbaar stellen van een rekeninstrument waarin de aanpassingen zijn verwerkt?	De aanpassing is beschikbaar in Safeti-NL 9.2. Er zijn geen verdere ontwikkelkosten.
Toepasbaarheid	Is het voorstel uitvoerbaar en uitlegbaar?	Ja, namelijk hierboven beschreven.

9 Bijlage 3 Verdieping consequentieonderzoek buisleidingen met koolstofdioxide

Bij de uitgave van Safeti-NL 8.8 zijn nieuwe modellen voor *dense phase*-koolstofdioxide geïmplementeerd, zie paragraaf 2.1.3. Het RIVM heeft de nieuwe modellen beoordeeld. RIVM onderschrijft de conclusie van DNV dat de modelbenadering in Safeti-NL versie 8.5 niet valide is voor de situaties die zijn getest in de COSHER-experimenten, en dat het nieuwe model betere overeenstemming geeft met de twee COSHER-experimenten. Wel is nog onduidelijk of het nieuwe model ook in andere situaties, zoals een buisleiding met lagere druk, valide resultaten geeft [31]. Het RIVM adviseert om de nieuwe modellen toe te passen voor situaties vergelijkbaar met de COSHER-experimenten [7].

Het gebruik van de nieuwe modellen resulteert in een sterke toename in risico voor buisleidingen met *dense phase*-koolstofdioxide [31]. Bij het uitvoeren van het consequentieonderzoek zijn deze leidingen echter niet meegenomen, aangezien deze leidingen op het moment van onderzoeken niet bestonden. Om toch inzicht te geven in het effect van de nieuwe modellen zijn enkele berekeningen uitgevoerd voor *dense phase*-koolstofdioxide leidingen in Safeti-NL 8.3 en Safeti-NL 9.2. De methode en resultaten van deze berekeningen zijn hieronder weergegeven.

9.1.1 Methode

Voor het onderzoek is uitgegaan van een buisleiding met *dense phase*-koolstofdioxide. Er is gekozen voor twee diameters, namelijk 193,7 mm, vergelijkbaar met de COSHER-experimenten[15] waarmee het model is gevalideerd en 646 mm, vergelijkbaar met leidingen die in ontwikkeling zijn voor onderzeese opslag van koolstofdioxide, zoals Aramis en Porthos [35]. Beide leidingen zijn gemodelleerd met een druk gelijk aan 150 bar, diepteligging 1,5 m en 1 km lengte, verbonden met 50 km *upstream* leiding en 50 km *downstream* leiding. De buisleidinggegevens zijn weergegeven in Tabel 12.

Tabel 12 Buisleidinggegevens van gemodelleerde koolstofdioxide buisleidingen.

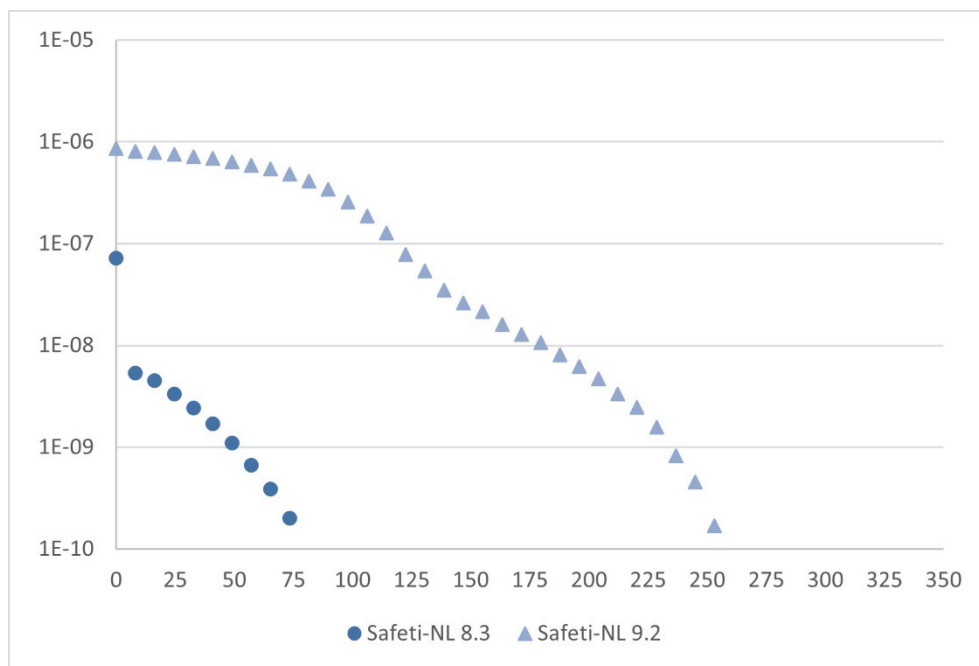
Diameter (mm)	Druk (barg)	Diepteligging (m)	Faalfreq. (/jaar/km)	Lengte (km)	Herkomst
193,7	150	1,5	1×10^{-5}	1+100	COSHER
646	150	1,5	1×10^{-5}	1+100	Aramis/ Porthos

Voor zowel Safeti-NL 8.3 als 9.2 is gekozen voor de optie '*buried*' waarmee het krater model wordt toegepast. Voor Safeti-NL 9.2 zijn daarnaast ook het '*defined area model*' en '*gas blanket modelling*' toegepast.

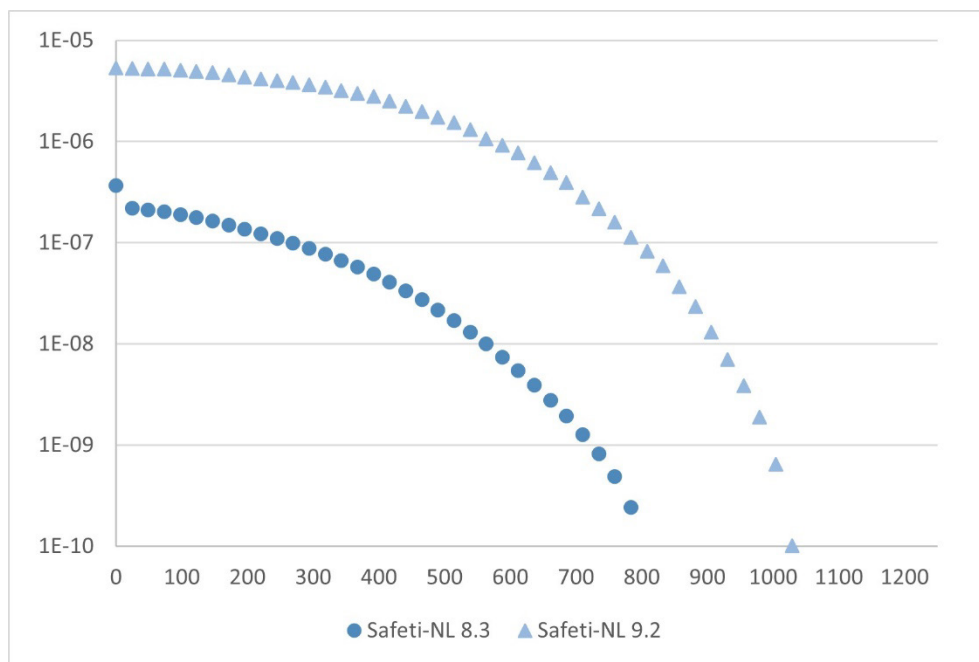
9.1.2 Resultaten

In Figuur 5 en Figuur 6 zijn de 'risk transects' van Safeti-NL 8.3 en 9.2 per buisleiding vergeleken. De weergegeven resultaten zijn slechts indicatief aangezien er is gebruikgemaakt van een fictieve buisleiding

met een fictieve faalfrequentie. Te zien is een sterke toename in het risico voor beide leidingdiameters bij gebruik van het nieuwe model voor koolstofdioxide. De sterke toename in risico benadrukt het belang van het gebruik van de juiste modellen bij de risicoanalyse van toekomstige *dense phase*-koolstofdioxide leidingen.



Figuur 5 Vergelijking risk transect van Safeti-NL 8.3 en Safeti-NL 9.2 voor een 193,7 mm koolstofdioxide buisleiding



Figuur 6 Vergelijking risk transect van Safeti-NL 8.3 en Safeti-NL 9.2 voor een 646 mm koolstofdioxide buisleiding

9.1.3 Toekomstige ontwikkelingen

Een leidingbreuk van een buisleiding met tot vloeistof verdicht gas wordt vaak beschreven met vier regimes, namelijk:

1. *Rapid depressurization*
2. *Flash-front propagation*
3. *Continuing two-phase flow*
4. *Unpressurised flow*

De vier regimes volgen elkaar op in de tijd en hebben verschillende tijdsduren. Regime 2 en 3 leveren veelal de grootste bijdrage aan het effect en risico, zeker voor horizontale buisleidingen in Nederland. Een bekende beperking van de modellering in Safeti-NL is het niet meenemen van regime 1. In Safeti-NL 9.2 wordt (nog) aangenomen dat bij breuk de druk in de leiding instantaan afneemt tot de verzadigde dampdruk. In het geval van een 150 bar buisleiding met kooldioxide daalt de druk instantaan van 150 bar naar zo'n 60 bar. Er wordt in Safeti-NL geen rekening gehouden met het verschil in massa in de leiding tussen de initiële druk in de leiding en de verzadigde dampdruk. Voor veel vloeistoffen heeft deze aanname een geringe invloed op de resultaten, aangezien dit regime van korte duur is en de druk van geringe invloed is op de massa in de leiding. *Dense phase*-koolstofdioxide is echter beter samendrukbaar. Hierdoor heeft de druk een grotere invloed op de massa in de leiding. De aanname om de druk instantaan te verlagen, zorgt voor koolstofdioxide voor een onderschatting van de totale massa in de leiding van zo'n 10 tot 20 procent.

DNV werkt momenteel aan een verbeterd uitstroombelastingmodel, Pipebreak-II, waarin wel rekening wordt gehouden met dit massaverschil. Dit model komt naar verwachting in het voorjaar van 2025 beschikbaar in de internationale versie van Safeti en zou in de volgende versie van Safeti-NL ook opgenomen kunnen worden. Het gebruik van Pipebreak-II kan resulteren in (nog) grotere effectafstanden voor *dense phase*-koolstofdioxide. Voor andere vloeistoffen en tot vloeistof verdichte gassen wordt een kleiner verschil tussen Pipebreak-I en Pipebreak-II verwacht.

Dit is een uitgave van:

**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**

Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven

Nederland

www.rivm.nl

mei 2025

De zorg voor morgen
begint vandaag