



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

## **Actualisatie faalfrequenties windturbines**

RIVM-rapport 2021-0234

S. Versluis | C.E. Pompe | H.J. Manuel





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

## **Actualisatie faalfrequenties windturbines**

RIVM-rapport 2021-0234

## Colofon

© RIVM 2022

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.

Het RIVM hecht veel waarde aan toegankelijkheid van zijn producten. Op dit moment is het echter nog niet mogelijk om dit document volledig toegankelijk aan te bieden. Als een onderdeel niet toegankelijk is, wordt dit vermeld. Zie ook [www.rivm.nl/toegankelijkheid](http://www.rivm.nl/toegankelijkheid).

DOI 10.21945/RIVM 2021-0234

S. Versluis (auteur), RIVM  
C.E. Pompe (auteur), RIVM  
H.J. Manuel (auteur), RIVM

Contact:

Sylvia Versluis

Milieu en Veiligheid, Centrum Veiligheid, Omgevingsveiligheid  
[sylvia.versluis@rivm.nl](mailto:sylvia.versluis@rivm.nl)

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat in het kader van M/260119/21 – Omgevingsveiligheid bedrijven.

Dit is een uitgave van:

**Rijksinstituut voor Volksgezondheid  
en Milieu**

Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven

Nederland

[www.rivm.nl](http://www.rivm.nl)

## Publiekssamenvatting

### **Actualisatie faalfrequenties windturbines**

Ongelukken met windturbines kunnen gevaarlijk zijn voor mensen in de omgeving. Bijvoorbeeld wanneer een windturbine omvalt of een blad afbreekt. Ook kan er ijs van het blad vallen.

Om slachtoffers te voorkomen, wordt een afstand berekend tussen windturbines en de omgeving. Binnen deze afstanden mogen bijvoorbeeld geen woningen staan. De kans op een ongeluk met een windturbine is voor het laatst onderzocht in 2012. Het RIVM heeft de cijfers nu geactualiseerd. Onderzocht is wat er kan gebeuren en hoe vaak dat gebeurt.

De reden voor de update is dat windturbines de laatste jaren technisch verder zijn ontwikkeld. Ze zijn bijvoorbeeld groter geworden. Ook zullen vanwege de overgang naar duurzame energie meer windturbines worden geplaatst.

Uit het onderzoek blijkt dat de kans op een ongeluk klein is: op de ongeveer 2000 windturbines in Nederland op land wordt ongeveer één ongeluk per jaar verwacht. Over het algemeen zijn de nieuw berekende kansen iets kleiner dan eerder is ingeschat.

Voor het onderzoek is informatie van het Caithness Windfarm Information Forum (CWIF) gebruikt, een van de weinige openbare databases die ongelukken bijhoudt. Het RIVM heeft gegevens gebruikt van landen die ongeveer hetzelfde klimaat hebben als Nederland en technisch ongeveer hetzelfde soort windturbines hebben, zoals Zweden en Duitsland. Het CWIF is in 2021 gestopt. Daarom beveelt het RIVM het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW) aan om ongelukken structureel bij te gaan houden. Dan kunnen de kansen in de toekomst worden geactualiseerd.

Het RIVM heeft het onderzoek in opdracht van IenW gedaan. Het gaat hierin niet om effecten op de gezondheid van mensen door het geluid of de schaduw van windturbines. Afstanden voor gezondheidseffecten zijn over het algemeen groter dan voor veiligheid.

Kernwoorden: windturbines, veiligheid, gebeurtenissen, scenario's, kansen, faalfrequenties, klimaatakkoord, energietransitie



## Synopsis

### **Update of failure frequencies of wind turbines**

Accidents with wind turbines can be dangerous for people in the surrounding area, for instance if a wind turbine falls, a blade breaks off or when ice is thrown from the blades.

To prevent casualties, a safe distance between wind turbines and the surrounding area is calculated. No houses may be located within a certain area, for example. The likelihood of a wind turbine accident was last examined in 2012. RIVM has now updated the figures, studying what could happen and how often this happens.

The reason for the update is that wind turbines have undergone further technical development in recent years. They have become larger, for example. What's more, additional wind turbines will be installed as part of the transition to sustainable energy.

The study shows that the likelihood of an accident is small: among the approximately 2,000 wind turbines on land in the Netherlands, around one accident is expected per year. In general, the newly calculated probabilities are slightly smaller than previously estimated.

The study used information from the Caithness Windfarm Information Forum (CWIF), one of the few public databases that keeps track of accidents. RIVM used data from countries that have roughly the same climate as the Netherlands and the same type of wind turbine technology, such as Sweden and Germany. Because the CWIF was discontinued in 2021, RIVM has recommended that the Ministry of Infrastructure and Water Management (I&W) starts keeping track of accidents. This would allow the probabilities to be updated in the future.

RIVM carried out the study on behalf of I&W. The study does not regard effects on people's health due to the noise or shade caused by wind turbines. Distances for health effects are generally larger than those for safety.

**Keywords:** wind turbines, safety, incidents, scenarios, probabilities, failure rates, climate agreement, energy transition





## Inhoudsopgave

### **Samenvatting — 9**

#### **1 Inleiding — 11**

- 1.1 Beoordeling huidige faalfrequenties windturbines — 11
- 1.2 Doelstelling — 12
- 1.3 Protocol aanpassing rekenmethodieken externe veiligheid — 12
- 1.4 Begeleidingscommissie en klankbordgroep — 12
- 1.5 Leeswijzer — 13

#### **2 Dataverzameling — 15**

- 2.1 Dataverzameling windturbinefabrikanten — 15
- 2.2 Dataverzameling buitenland — 15
- 2.3 Dataverzameling openbare database — 16
- 2.4 Noemerdata — 18
- 2.5 Onzekerheden — 18

#### **3 Selectiecriteria — 21**

- 3.1 Selectie tijdsperiode — 21
- 3.2 Selectie landen — 22
- 3.3 Selectie incidenten en noemerdata — 23

#### **4 Statistische analyse en resultaten — 27**

- 4.1 Scenario's — 27
- 4.2 Trendanalyse — 31
- 4.3 Faalfrequenties — 32

#### **5 Conclusie, discussie en aanbevelingen — 35**

- 5.1 Dataverzameling — 35
- 5.2 Scenario's en faalfrequenties — 35
- 5.3 Toepasbaarheid faalfrequenties — 37
- 5.4 Toekomstige ontwikkelingen rond faalfrequenties windturbines — 37

### **Literatuur — 39**

### **Bijlage 1 Beoordeling faalfrequenties uit 2012 — 41**

### **Bijlage 2 Contactinformatie deelnemers begeleidingscommissie — 46**



## Samenvatting

Windturbines kunnen risico's opleveren voor mensen in de omgeving. Aan de hand van het rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid Module IV zijn de risico's te berekenen. De scenario's die hierbij meegenomen worden zijn bladbreuk, mastbreuk en het gecombineerde scenario 'afvallen van gondel en rotor (of alleen een rotor)'. Windturbines hebben de laatste jaren grote technische ontwikkelingen doorgemaakt, waardoor deze scenario's en de bijbehorende faalfrequenties mogelijk niet meer aansluiten bij de werkelijke situatie.

Het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW) heeft het RIVM opdracht gegeven de scenario's voor het falen van windturbines en de bijbehorende faalfrequenties te actualiseren. Het doel van dit project is om met recentere incidentgegevens van windturbines de scenario's en faalfrequenties te actualiseren.

Om te komen tot geactualiseerde scenario's voor het falen van windturbines en bijbehorende faalfrequenties zijn gegevens nodig over incidenten met windturbines, het aantal windturbines en het aantal ervaringsjaren. Om informatie over windturbine-incidenten te verkrijgen, is aan windturbinefabrikanten gevraagd om data te delen en is informatie uit het buitenland verzameld. De ontvangen en gevonden gegevens zijn echter verouderd of te summier om geactualiseerde scenario's en faalfrequenties af te leiden. Uiteindelijk is het Caithness Windfarm Information Forum gebruikt als bron voor windturbine-incidenten. Deze database wordt bijgehouden door tegenstanders van windenergie en is één van de weinige openbare databases met windturbine-incidenten wereldwijd. Voor de aantallen windturbines en ervaringsjaren is specifieke informatie per land opgezocht.

De scenario's en bijbehorende faalfrequenties zijn afgeleid op basis van gegevens uit Denemarken, Duitsland, Nederland, het Verenigd Koninkrijk en Zweden. Deze landen hebben vergelijkbare klimatologische omstandigheden als Nederland. Ook zijn de windturbines die in deze landen staan technisch vergelijkbaar met de windturbines die in Nederland staan.

De analyse van de incidenten uit de Caithness database heeft geresulteerd in zes scenario's die relevant zijn voor omgevingsveiligheid. Het gaat hierbij om twee scenario's die al in het rekenvoorschrift zijn beschreven: bladafworp en mastbreuk en vier nieuwe scenario's: bladbreuk in delen, ijsafworp, gondelafworp en rotorafworp. In het rekenvoorschrift komt wel het gecombineerde scenario 'gondel- en rotorafworp' voor, maar nu wordt voorgesteld deze apart te gaan beschouwen. Voor ijsafworp worden de gegevens, na verdere analyse, niet betrouwbaar gevonden. Het scenario afvallen van kleine onderdelen is ook bekeken. Omdat dit slechts één keer als incident voorkwam in de database, terwijl dit naar verwachting vaker voorkomt maar weinig effect heeft, is hier geen faalfrequentie voor afgeleid.

In onderstaande tabel zijn de berekende faalfrequenties weergegeven. De nieuwe faalfrequenties voor de scenario's die al in het huidige rekenvoorschrift zijn beschreven, vallen lager uit dan de huidige faalfrequenties (uit 2012).

Tabel 1 Berekende faalfrequenties

Waarde*	Blad-afworp bij X	Blad-brek in delen	Mast-brek	Rotor-afworp	Gondel afworp
<b>Faalfrequenties</b> [turbine <sup>-1</sup> jaar <sup>-1</sup> ]					
Verwachtingswaarde '2021'	1,1E-04	1,5E-04	4,5E-05	1,4E-05	1,5E-06
95% betrouwbaarheidswaarde '2021'	1,4E-04	1,8E-04	6,1E-05	2,4E-05	7,1E-06

\* Verwachtingswaarde = aantal incidenten/aantal ervaringsjaren. Met de 95% betrouwbaarheidswaarde is vastgesteld of de 'werkelijke' faalfrequentie gelijk is aan of kleiner is dan de statistisch berekende waarde.

Uit het onderzoek volgen onderstaande aanbevelingen:

- Aanbevolen wordt de scenario's 'afvallen van kleine onderdelen' en 'ijsafworp' kwalitatief te blijven beschouwen. Voor beide scenario's geldt dat de incidenten vaak onopgemerkt blijven en dus naar verwachting vaker voorkomen dan in de database is weergegeven. Faalcijfers die op basis van de database worden afgeleid, zijn daardoor naar verwachting onbetrouwbaar.
- Aanbevolen wordt om in een vervolgtraject rekenregels vast te stellen voor het bepalen van de effecten van de nieuwe scenario's bladafworp in delen, gondelafworp en rotorafworp, zodat de invloed hiervan op het totale omgevingsveiligheidsrisico van een windturbine bepaald kan worden. Totdat de rekenregels voor de scenario's zijn opgesteld, kunnen de nieuwe cijfers voor de faalfrequentie nog niet gebruikt worden.
- Eerder heeft het RIVM in een advies aan het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat al geadviseerd om een eenduidige rekenmethode voor de huidige scenario's vast te stellen. Hierdoor kan ervoor gezorgd worden dat de risico's van windturbines op eenzelfde wijze worden berekend en er dus minder inhoudelijke discussie bestaat over de uitkomsten. Bij het vaststellen van een eenduidige rekenmethode kunnen de huidige rekenregels worden gevalideerd en zo nodig worden herzien.
- Aanbevolen wordt de gehele rekenmethode (geactualiseerde faalfrequenties en eenduidige rekenregels) op te nemen in het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid. Eventueel kan als vervolg deze methode op worden genomen in de softwarepakketten die gebruikt worden voor berekening van de omgevingsveiligheidsrisico's. Deze rekenmethode kan vervolgens worden aangewezen in de wet- en regelgeving.
- Aanbevolen wordt de scenario's en faalfrequenties regelmatig, circa eens in de tien jaar, te herzien om deze actueel te houden.
- Aanbevolen wordt incidenten met windturbines te gaan verzamelen om zo een bron aan gegevens te behouden om de faalfrequenties te kunnen blijven actualiseren. Dit omdat de Caithness database niet meer wordt bijgehouden.

## 1 Inleiding

Vanuit het klimaatakkoord is er een opgave om in 2030 35 TWh duurzame energie (wind en zon) op land beschikbaar te hebben [1]. Een deel hiervan zal opgewekt moeten worden door windturbines.

Windturbines kunnen risico's opleveren voor mensen in de omgeving. De scenario's bladbreuk, mastbreuk en het gecombineerde scenario 'afvallen van gondel en rotor (of alleen een rotor)' zijn opgenomen in het rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid Module IV [2] als relevante omgevingsveiligheidsrisico's van windturbines. Met het rekenvoorschrift is te bepalen of er voldaan wordt aan de vastgelegde risiconorm. De risiconorm is het plaatsgebonden risico (PR, kans op overlijden op een bepaalde plek). Aan de hand van een aantal invoergegevens over de windturbine, zoals de ashoogte, rotordiameter en de kans op falen, kan worden berekend wat de risico's voor de omgeving zijn. Dit rapport gaat verder niet in op aspecten die voornamelijk voor de gezondheid van omwonenden van belang zijn, zoals geluid, (slag)schaduw en horizonvervuiling.

Sinds de laatste actualisatie van de faalfrequenties voor windturbines (2012) hebben windturbines technische ontwikkelingen doorgemaakt, met als belangrijke factor dat er steeds grotere windturbines worden gerealiseerd. Daarnaast komen er vanuit de markt geluiden dat nieuwe windturbines meer veiligheidsmaatregelen hebben en daardoor veiliger zouden zijn dan de huidige faalfrequenties reflecteren. De scenario's en faalfrequenties uit de huidige rekenmethodiek sluiten hierdoor mogelijk niet meer aan bij de werkelijke situatie, met een mogelijke over- of onderschatting van de risico's tot gevolg.

### 1.1 Beoordeling huidige faalfrequenties windturbines

In 2020 heeft het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM) onderzocht of het nodig en mogelijk is nieuwe faalfrequenties af te leiden voor windturbines [3]. Daarvoor zijn de huidige faalfrequenties en achterliggende bronnen beoordeeld. Deze beoordeling is opgenomen in Bijlage 1.

Uit de beoordeling is gebleken dat de huidige faalfrequenties voor windturbines zijn gebaseerd op meerdere bronnen (openbare bronnen en gegevens van fabrikanten) die los van elkaar zijn beschouwd. Om te bepalen of er aanleiding is om de huidige faalfrequenties te actualiseren, zijn allereerst de gegevens uit één van de openbare bronnen voor de jaren 2018 en 2019 geanalyseerd. Hierbij zijn de data generiek benaderd (zonder differentiatie naar bouwjaar of vermogen). Deze eerste globale analyse leverde faalfrequenties (95% betrouwbaarheidswaarden) op die vrijwel gelijk zijn aan de huidige frequenties in het rekenvoorschrift (faalfrequenties uit 2012). Deze data gaven dus niet direct aanleiding om de huidige faalfrequenties te actualiseren.

Bij het bekijken van de openbare bron kwam een aantal aandachtspunten naar voren. Zo worden in de database alleen incidenten weergegeven die in de media komen, waardoor mogelijk een onderschatting van het aantal incidenten wordt gegeven. Daarnaast zijn sommige incidenten meerdere keren opgenomen in de database. Ook volgt de indeling van incidenten in de database niet de indeling van de rekenmethode. Hierdoor worden sommige incidenten als een ander scenario geclassificeerd. De incidenten kunnen hierdoor niet simpelweg per scenario worden opgeteld, maar alle incidenten moeten afzonderlijk bekeken en ingedeeld worden. Zie hiervoor ook de beoordeling van de bronnen in Bijlage 1.

Daarnaast is uit de analyse en gesprekken met windturbine-experts gebleken dat er mogelijk nieuwe scenario's relevant zijn die nu nog niet zijn meegenomen in het rekenvoorschrift. De mogelijke nieuwe scenario's (wanneer relevant voor het omgevingsveiligheidsrisico) en aandachtspunten in de gebruikte bronnen gaven wel aanleiding om de faalfrequenties te herzien.

Het RIVM heeft op basis van de beoordeling het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW) aanbevolen de faalfrequenties te actualiseren, door zoveel als mogelijk gebruik te maken van zowel fabrikantdata als openbare databronnen over windturbine-incidenten. IenW heeft deze aanbeveling overgenomen en heeft het RIVM opdracht gegeven de scenario's voor het falen van windturbines en de bijbehorende faalfrequenties te actualiseren. De resultaten van deze actualisatie worden in voorliggende rapportage gegeven.

## **1.2 Doelstelling**

Het doel van dit project is om met recentere incidentgegevens van windturbines de scenario's voor het falen van windturbines en de bijbehorende faalfrequenties te actualiseren. Zo wordt tegemoetgekomen aan de wensen uit de markt om de scenario's en faalfrequenties beter te laten aansluiten bij de huidige stand der techniek van de windturbines.

## **1.3 Protocol aanpassing rekenmethodieken externe veiligheid**

Voor het actualiseren van de scenario's en faalfrequenties is gebruikgemaakt van het Protocol aanpassing rekenmethodieken externe veiligheid [4]. Dit protocol bevat structurele procedures om aanpassingen aan te brengen in rekenmethodieken en nieuwe inhoudelijke inzichten te verwerken. Nieuwe inzichten kunnen betrekking hebben op de ontwikkeling van een ongeval (ongevalscenario), hoe groot de kans op een dergelijk ongeval is (faalfrequentie) en welke effecten kunnen optreden. In het protocol zijn tevens de eisen en randvoorwaarden beschreven die gesteld worden aan de rapportage en onderbouwing van een voorstel om een rekenmethodiek aan te passen.

## **1.4 Begeleidingscommissie en klankbordgroep**

Het proces om te komen tot geactualiseerde scenario's en faalfrequenties is ondersteund door een begeleidingscommissie. Hiervoor zijn leden van de klankbordgroep risicozonering windturbines

en vertegenwoordigers van windturbinefabrikanten uitgenodigd. Vanwege andere prioriteitstellingen van de fabrikanten, hebben deze niet deelgenomen aan de begeleidingscommissie. De commissie bestond uiteindelijk uit vijf windturbine-experts van Antea Group, Arcadis, DCMR Milieudienst Rijnmond, NRG Arnhem en Pondera Consult (zie Bijlage 2).

Het doel achter het betrekken van de begeleidingscommissie was om de kennis van stakeholders en experts te kunnen gebruiken bij het onderzoek naar actualisatie van de faalfrequenties van windturbines, en onderdelen van het onderzoek te kunnen laten reviewen. De begeleidingscommissie is drie keer bij elkaar gekomen en het conceptrapport is ter review aan de begeleidingscommissie voorgelegd. In voorliggend rapport is vermeld waarvoor de expertise van de begeleidingscommissie is ingeroepen en wat met de aanbevelingen is gedaan.

Naast de begeleidingscommissie is de Klankbordgroep risicozonering windturbines op de hoogte gehouden van het onderzoek. Dit is gedaan door tijdens de vergaderingen van de klankbordgroep een update te geven van het lopende onderzoek en de (voorlopige) resultaten en de mogelijkheid te geven tot reactie.

## **1.5 Leeswijzer**

Dit rapport is als volgt opgebouwd. Na de inleiding (hoofdstuk 1) waarin de aanleiding en doelstelling van het onderzoek wordt behandeld, volgt in hoofdstuk 2 de opzet van het onderzoek. Hierbij wordt ingegaan op de dataverzameling van windturbine-incidenten en aantallen windturbines. In hoofdstuk 3 volgen de selectiecriteria. Hier wordt besproken welke selectiecriteria worden gehanteerd om te bepalen welke windturbine-incidenten worden meegenomen in de analyse. In hoofdstuk 4 wordt de statistische analyse en trendanalyse weergegeven om te komen tot geactualiseerde scenario's voor het falen van windturbines met bijbehorende faalfrequenties. De resultaten hiervan worden ook in dat hoofdstuk weergegeven. Als afsluiting van het rapport geeft hoofdstuk 5 de conclusie, discussie en aanbevelingen.





## 2 Dataverzameling

Om te komen tot geactualiseerde scenario's voor het falen van windturbines en bijbehorende faalfrequenties zijn gegevens nodig over incidenten met windturbines (tellerdata) en over het aantal ervaringsjaren (noemerdata). In dit hoofdstuk wordt besproken welke acties zijn ondernomen om deze data te verzamelen.

### 2.1 Dataverzameling windturbinefabrikanten

Incidenten met windturbines worden niet centraal geregistreerd in een officiële (openbare) database. Om informatie over windturbine-incidenten te verkrijgen is daarom contact opgenomen met windturbinefabrikanten en -leveranciers.

In september 2019 is namens het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, het ministerie van Economische zaken en Klimaat, Rijkswaterstaat en het RIVM via de Nederlandse WindEnergie Associatie, (NWEA) een brief verstuurd aan alle bij de associatie aangesloten windturbinefabrikanten en -leveranciers. In deze brief is de fabrikanten en leveranciers gevraagd om data over incidenten met windturbines te delen, zodat deze data gebruikt kunnen worden voor het afleiden van scenario's en faalfrequenties. Het gaat hierbij om data over het aantal en soort incidenten en over het aantal ervaringsjaren. Op deze brief is geen reactie gekomen. Bij wijze van herinnering is in april 2020 dezelfde brief door NWEA opnieuw bij de fabrikanten en leveranciers onder de aandacht gebracht en later ook bij exploitanten van windenergie. Tevens zijn de verschillende partijen nagebeld door NWEA. In oktober 2021 zijn daarnaast ook fabrikanten van kleine windturbines benaderd.

Uiteindelijk hebben twee windturbinefabrikanten data gedeeld, waarvan één fabrikant gedetailleerde gegevens over incidenten heeft aangeleverd. Het gaat hierbij om incidenten binnen Nederland sinds 2015. Deze fabrikant heeft echter geen specifieke data over het aantal aanwezige windturbines, aangezien niet bijgehouden wordt wanneer een windturbine wordt afgebroken. De noemerdata ontbreken dus.

Omdat in de ontvangen gegevens specifieke informatie over de teller en/of noemerdata ontbreekt, zijn de data te summier om geactualiseerde scenario's en bijbehorende faalfrequenties van af te leiden.

### 2.2 Dataverzameling buitenland

Er is tevens ingezet op het verzamelen van informatie over windturbines en windturbine-incidenten uit het buitenland door contact op te nemen met zusterinstituten en overige contacten van het RIVM in het buitenland. Hierbij ging het om France Energie Eolienne (FEE) en Ineris uit Frankrijk, CER Technologies Ltd en Health and Safety Executive (HSE) uit het Verenigd Koninkrijk, het Team Externe Veiligheid van de Vlaamse overheid (Directie Gebiedsontwikkeling) uit België, SAFERA Europees project industriële veiligheid en Wind Europe, de Europese zusterorganisatie van Global Wind Organisation. Daarnaast heeft het

ministerie van IenW contact opgenomen met ambassades van Duitsland, Spanje, Italië, Zweden, Denemarken, Portugal, de Verenigde Staten en Canada. Specifiek is informatie opgevraagd over windturbine-incidenten en aantallen windturbines die in de genoemde landen aanwezig zijn. Op de informatie over aantallen windturbines die is ontvangen wordt ingegaan in paragraaf 2.4.

In de ontvangen informatie van de genoemde instellingen en landen is bevestigd dat er geen officiële databases met windturbine-incidenten worden bijgehouden [5-7]. In een aantal studies zijn faalfrequenties voor windturbines bepaald [5, 8] of benaderd [9]. De data waarop deze faalfrequenties zijn gebaseerd, zijn echter ouder of net zo oud als de huidige faalfrequenties waar in Nederland mee gerekend wordt en leveren dus geen actuelere cijfers op. Wel is signaleerd dat het aantal incidenten met windturbines niet evenredig toeneemt met het aantal geïnstalleerde windturbines. Bijvoorbeeld in Frankrijk heeft windenergie zich sinds 2005 sterk ontwikkeld, maar het aantal incidenten per jaar lijkt relatief constant te zijn [5]. Dit zou kunnen komen doordat windturbines veiliger zijn geworden, maar het kan ook zijn dat de incidenten vooral bij oudere windturbines plaatsvinden en dus mogelijk in de toekomst nog komen.

Uit de ontvangen informatie is gebleken dat bij windturbines bladfalen wordt gezien als belangrijkste risico [5, 6]. Het gaat hierbij zowel om afwerp en afvallen van een volledig blad als van bladdelen. Falen van de mast en gondel komen minder vaak voor [6, 7]. Daarnaast is ijsafwerp genoemd als relevant scenario bij windturbines [5, 8-10]. Uit de studies bleek verder duidelijk dat de kans op falen van een windturbine toeneemt tijdens storm [5-7].

Naast de informatie die is ontvangen van de genoemde instellingen en landen, is via de begeleidingscommissie informatie uit Duitsland ontvangen. In een Duitse werkgroep, die zich bezighoudt met ontwerpeisen voor windturbines, is data gedeeld over 'grottere incidenten' bij windturbines in Duitsland. Bundesverband WindEnergie (BWE) heeft de data verzameld, maar verdere details over de verzameling van incidenten zijn niet bekend en gevraagd is om de incidentdata vertrouwelijk te behandelen. Met behulp van aantallen windturbines zoals opgegeven door BWE zijn door de werkgroep enkele faalfrequenties (verwachtingswaarden) afgeleid voor bladafwerp, mastbreuk en rotorafwerp. Deze waarden worden in dit rapport gebruikt voor een indicatieve vergelijking met de nieuw afgeleide waarden, met de opmerking dat dit geen exacte één-op-één vergelijking oplevert vanwege de verschillende achtergronden waar de data vandaan komen en de methoden die zijn gebruikt om relevante incidenten voor de omgevingsveiligheid te verzamelen.

### **2.3 Dataverzameling openbare database**

Voor zover bekend is één van de weinige openbare databases met incidenten van windturbines het Caithness Windfarm Information Forum (hierna: Caithness database) [11]. Dit is een uitgebreide database met incidenten van windturbines wereldwijd die wordt bijgehouden door tegenstanders van windenergie. Omdat de verkregen informatie over

incidenten van windturbines van de windturbinefabrikanten en uit het buitenland te beperkt is om faalfrequenties af te leiden, is deze openbare database de belangrijkste bron geweest voor het bepalen van actuele scenario's voor het falen van windturbines en de bijbehorende faalfrequenties.

In de Caithness database zijn incidenten opgenomen voor de periode 1980 tot en met 30 juni 2021. De website geeft aan dat de database na deze datum niet meer wordt bijgewerkt. In de database zijn windturbine-incidenten opgenomen waar in de media over bericht wordt. Voor het verzamelen van de incidenten is in de recente geschiedenis gebruikgemaakt van een Google alert. Voorheen werd deze gevoed door een achterban die op zoek ging naar nieuwsartikelen.

De database is afhankelijk van de incidenten en informatie die in de media komen. Kleine incidenten zoals het afvallen van kleine onderdelen of incidenten die buiten bewoond gebied plaatsvinden, komen mogelijk niet in de media en dus niet in de database. Hierdoor kan het zijn dat de database een onderschatting geeft van het aantal incidenten met windturbines. Er is niet systematisch uitgezocht hoeveel incidenten er naar verwachting ontbreken. In de toelichting van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid is beschreven dat DNV eerder een inschatting heeft gemaakt dat circa 10-20% van de incidenten ontbreekt [2, 12]. Daarnaast worden sommige individuele incidenten in meerdere incidentbeschrijvingen genoemd en zijn de incidenten in de database niet altijd juist geclassificeerd. De database heeft hiermee een aantal aandachtspunten.

Een andere openbare bron aan windturbine-incidenten zijn de Windkraft Journals [18]. Windkraft Journals is een Duits tijdschrift dat verschillende thema's rondom windturbines behandelt, waaronder incidenten. De Windkraft Journals geven geen compleet overzicht van de incidenten met bladbreuk, mastbreuk en gondelafwerp. Dit zorgt voor een mogelijke onderschatting van de faalfrequenties. Daarnaast staan alleen incidentcijfers over de periode 2009-2019 online. Omdat de tijdsperiode waarvoor incidenten zijn opgenomen in de Caithness database langer is, zie ook de beoordeling in Bijlage 1, is er voor gekozen om deze database te gebruiken als bron voor incidenten.

Om rekening te houden met de genoemde aandachtspunten in de Caithness database (verkeerde classificering en dubbel voorkomen van incidenten) en er voor te zorgen dat de database gebruikt kon worden voor het actualiseren van de faalfrequenties, zijn de opgenomen incidenten geanalyseerd. Deze analyse is uitgevoerd door Antea Group in opdracht van het RIVM. Bij de analyse zijn incidenten die niet relevant zijn voor omgevingsveiligheid uit de database gefilterd. Daarnaast zijn incidenten die meerdere malen zijn opgenomen in de database samengevoegd en zijn de incidenten onderverdeeld in scenario's. Hierbij zijn de scenario's uit het rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid Module IV gehanteerd, te weten bladbreuk, mastbreuk en gondel- en of rotorafwerp, aangevuld met eventuele nieuwe scenario's als afwerp van bladdelen of andere kleine onderdelen en ijsafwerp. Deze analyse heeft de uiteindelijke database opgeleverd die gebruikt is voor het afleiden van faalfrequenties. Deze database is op aanvraag beschikbaar bij het RIVM.

## 2.4 Noemerdata

Tabel 2 geeft de bronnen voor de data over windturbine aantallen voor de geselecteerde landen (zie paragraaf 3.2).

*Tabel 2 Bronnen voor windturbine aantallen per einde van het jaar uit de geselecteerde landen. Aantallen turbines 2001-2010 zijn overgenomen uit de toelichting op het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid, behalve Zweden*

Land	Windturbine aantallen	
	2001 t/m 2010	2011 t/m 2020
Denemarken	Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid toelichting	Winddenmark <sup>1</sup> <a href="https://en.winddenmark.dk/wind-in-denmark/statistics/wind-amount">https://en.winddenmark.dk/wind-in-denmark/statistics/wind-amount</a>
Duitsland	Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid toelichting	Deutsche Windguard <a href="https://www.windguard.de/windenergiestatistik.html">https://www.windguard.de/windenergiestatistik.html</a>
Nederland	Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid toelichting	CBS <a href="https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/70960ned/table?fromstatweb">https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/70960ned/table?fromstatweb</a>
Verenigd Koninkrijk	Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid toelichting	UKRenewable <i>data verkregen via e-mail</i>
Zweden	Svenskvindenergi <sup>2</sup> <a href="http://www.svenskvindenergi.org/wp-content/blogs.dir/11/files/2010/12/Statistik_vin_dkraft2009.pdf">http://www.svenskvindenergi.org/wp-content/blogs.dir/11/files/2010/12/Statistik_vin_dkraft2009.pdf</a>	Svenskvindenergi <a href="https://svenskvindenergi.org/wp-content/uploads/2021/05/Q1-2021-Statistics-and-forecast-Svensk-Vindenergi-210511-1.pdf">https://svenskvindenergi.org/wp-content/uploads/2021/05/Q1-2021-Statistics-and-forecast-Svensk-Vindenergi-210511-1.pdf</a>

<sup>1</sup> De gemelde website vermeldt inmiddels geen aantallen meer en data uit 2019 en 2020 ontbraken nog. Er is aanvullende data opgevraagd per e-mail, waarop geen reactie is gekregen. Incidenten en windturbine aantallen uit 2019 en 2020 zijn daarom niet meegenomen in de uiteindelijke faalfrequentieberekeningen.

<sup>2</sup> Er zijn geen cijfers gevonden voor het exacte aantal windturbines. Deze zijn afgeleid uit een grafiek die het verloop van het aantal turbines aangaf vanaf het jaar 2000.

Voor een faalfrequentieafleiding moeten de teller- en de noemerdata zo goed mogelijk bij elkaar aansluiten. De Nederlandse CBS-data bevat alle windturbines met een vermogen groter dan 50 kW. In de data van UKRenewable komen alleen windturbines met een vermogen groter dan 100 kW voor. Svenskvindenergi gaf per e-mail aan dat in principe alle windturbines in hun data worden meegenomen, maar dat dat in de recente jaren alleen nog maar 'large scale' windturbines zijn van de fabrikanten in Zweden (Nordex, Vestas, Siemens Gamesa, Enercon en GE). Aan de genoemde organisaties in Denemarken en Duitsland is per e-mail gevraagd of kleinere types of vermogens in de data voorkomen. Vanwege het uitblijven van een antwoord is ervan uitgegaan dat het alle typen windturbines betreft.

## 2.5 Onzekerheden

Zoals hiervoor al enkele malen aangegeven zijn er verschillende onzekerheden met betrekking tot het afleiden van faalfrequenties, die te maken hebben met de dataverzameling, zie hiervoor Tabel 3. De onzekerheden zijn moeilijk of niet te kwantificeren en kunnen tot zowel

een onderschatting als een overschatting van de faalfrequentie leiden. Mede gezien deze onzekerheden is voorgesteld te blijven rekenen met de 95% betrouwbaarheidswaarde. Het verschil tussen de 95% betrouwbaarheidswaarde en de verwachtingswaarde is wel kleiner dan bij de faalfrequenties uit 2012 uit het rekenvoorschrift (zie paragraaf 4.2), omdat er nu uitgegaan kon worden van meer ervaringsjaren (meer landen en langere periode) en van meer incidenten (langere periode).

*Tabel 3 Onzekerheden in de dataverzameling die tot een onder- of overschatting van faalfrequenties kunnen leiden*

<b>Factor</b>	<b>Onder-/overschatting van faalfrequentie</b>	<b>Waarom</b>
Aantal incidenten	Onderschatting	Alleen grotere incidenten halen de media. Incidenten ver van bebouwing zullen bijvoorbeeld minder snel in de media worden opgepikt. In dit rapport is uitgegaan van de Caithness database: er zijn incidenten te vinden, bijvoorbeeld op windaction.org, die niet voorkomen in de Caithness database. Dit is een gevonden voorbeeld, dat niet systematisch is uitgezocht. Eerder gaf DNV een inschatting van circa 10-20% ontbrekende incidenten.
Aantal windturbines	Onderschatting	Van enkele landen is onbekend welke typen windturbines opgeteld worden. In het aantal zitten nu alle windturbines, dus ook die met een lager vermogen. Voor het bepalen van de faalfrequentie is dan gedeeld door een te groot aantal windturbines, wat tot een onderschatting kan leiden.
Meenemen van incidenten met onbekende gegevens, zoals vermogen of on/offshore locatie	Overschatting	Een deel van de incidenten met onbekende gegevens, die meegenomen worden in de analyse, zal in de categorieën vallen die niet aan de selectiecriteria voldoen (bijvoorbeeld offshore turbines, of met een kleiner vermogen dan vermeld in de noemerdata, zie hoofdstuk 3).



## 3 Selectiecriteria

Van het totaal aantal windturbine-incidenten dat is opgenomen in de Caithness database is een selectie gemaakt om nieuwe faalfrequenties van af te leiden. Om te komen tot een selectie van voor Nederland relevante incidenten, zijn eerst selectiecriteria vastgesteld. De gehanteerde selectiecriteria worden in voorliggende hoofdstuk besproken. Deze selectiecriteria zijn afgestemd met de begeleidingscommissie.

### 3.1 Selectie tijdsperiode

In het 'Protocol aanpassing rekenmethodieken Externe Veiligheid' [4] is aangegeven dat voor het afleiden van faalfrequenties een tijdsperiode gekozen moet worden die representatief is voor de huidige situatie van het beschouwde systeem. Het uitgangspunt daarbij is een periode van dertig jaar, maar er kunnen redenen zijn om een kortere periode te hanteren. Argumenten kunnen zijn de ontwikkeling in de stand der techniek, ontwikkelingen in (onderdelen van) het systeem of specifiek genomen extra maatregelen.

Voor het actualiseren van de faalfrequenties is een analyse gemaakt van de incidentdata uit de Caithness database die hebben plaatsgevonden in de jaren 2001 tot en met 2020. De huidige faalfrequenties zijn gebaseerd op incidenten in de tijdsperiode 2001 tot en met 2010. Door een grotere tijdsperiode te hanteren waarover data is verzameld, is de betrouwbaarheid van de faalfrequenties vergroot. De Caithness database is de enige bekende database waar incidenten over zo'n lange periode is bijgehouden (zie ook Bijlage 1).

Er is niet gekeken naar data van voor 2000 omdat het aantal windturbines voor die tijd relatief klein was. In 2000 stond in Nederland bijvoorbeeld ongeveer de helft van het aantal windturbines van nu en in Zweden was dat circa 1/8. Door de toename van het aantal windturbines en hiermee het aantal incidenten, is de aandacht voor ongevallen ook toegenomen. Daarnaast werd het door de ontwikkelingen rond internet makkelijker voor bijvoorbeeld de Caithness database om informatie over incidenten te achterhalen.

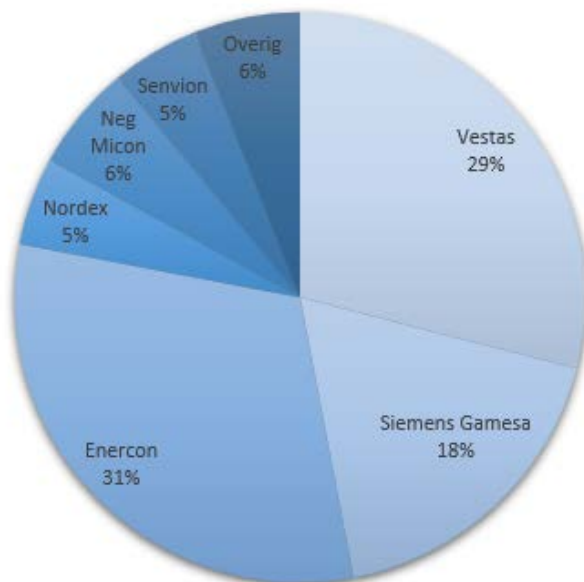
Daarnaast zijn er in de afgelopen jaren verschillende technische ontwikkelingen geweest. Windturbines zijn de laatste jaren steeds groter geworden, hebben een groter vermogen en meerdere detectiesystemen om incidenten te voorkomen, gekregen. Voor 2000 werden bijvoorbeeld voornamelijk windturbines gerealiseerd met een vermogen tussen de 50 en 300 kW. Momenteel worden juist vooral windturbines met een vermogen van 3 MW geplaatst. Met een trendanalyse (zie paragraaf 4.2) is bekeken of in de incidentdata een significante trend bestaat. Indien er een significante trend bestaat, kan deze in de faalfrequentie worden verdisconteerd door een meer representatieve periode (kortere periode) te nemen en daar de incidenten en waarnemingen op te baseren. Volgens het protocol is de minimaal mee te nemen periode de laatste vijf jaar.

### 3.2 Selectie landen

Er is een analyse gemaakt van de incidentdata uit de Caithness database die hebben plaatsgevonden in de landen Denemarken, het Verenigd Koninkrijk, Duitsland, Zweden en Nederland. Deze landen hebben vergelijkbare klimatologische omstandigheden als Nederland. Ook zijn de windturbines die in deze landen staan technisch vergelijkbaar met de windturbines die in Nederland staan.

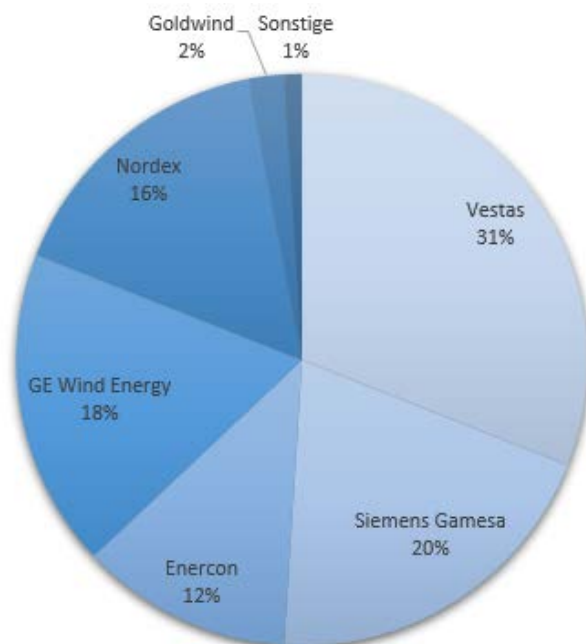
De faalfrequenties uit 2012 zijn gebaseerd op incidentdata uit Denemarken, het Verenigd Koninkrijk en Duitsland. Deze landen zijn van oudsher al bezig met windenergie en in die landen waren toen dus meer gegevens bekend over faalstatistiek van windturbines en was het aantal ervaringsjaren het grootst.

Bij voorliggende analyse is aangesloten bij de landen uit de eerdere analyse (aangevuld met Zweden en Nederland) omdat de windturbines die in die landen geplaatst worden technisch vergelijkbaar zijn met de windturbines in Nederland. Dit is af te leiden uit het marktaandeel windturbines per fabrikant. In Nederland staan windturbines die grotendeels van dezelfde fabrikanten komen als in geheel Europa (zie Figuur 1 en Figuur 2). Ook de begeleidingscommissie heeft bevestigd dat de windturbines in deze landen technisch vergelijkbaar zijn met die in Nederland. Er gelden internationale normen voor windturbines, dus deze hebben dezelfde eigenschappen. Via de website WindStats is ook het vermogen per fabrikant in Nederland te bekijken [13].



*Figuur 1 Marktaandeel per fabrikant in Nederland in 2020 [14]*





Figuur 2 Marktaandeel per fabrikant in Europa in 2020 [15]

Er is bekeken of de incidentdata uitgebreid konden worden met data uit andere landen. Nederland zelf heeft ondertussen ook een langere historie in het gebruik van windenergie dan bij de vorige actualisatie. Daarom is er voor gekozen dit keer ook data uit Nederland zelf mee te nemen.

Ook data uit Zweden zijn bij deze actualisatie meegenomen. Van Zweden kon relatief gemakkelijk data over het aantal ervaringsjaren worden verkregen. Wel is met de begeleidingscommissie besproken of Zweden klimatologisch gezien voldoende relevant is voor Nederland om deze incidentdata mee te nemen. Hieruit bleek dat in Zweden robuuste regelgeving is voor windturbines en met de locatie rekening wordt gehouden met de klimatologische condities. De meeste windturbines zijn bijvoorbeeld geplaatst in het zuiden van Zweden en niet in het noorden dat gevoelig is voor sneeuw en ijs. Daarnaast komen er in de incidentdata niet veel ijsincidenten in Zweden voor, dat onderbouwt dat sneeuw en ijs daar niet een groter probleem oplevert dan in Nederland.

Verder was de insteek om ook incidentdata uit Frankrijk en België mee te nemen in de analyse omdat deze landen en de windturbines die hier geplaatst worden ook representatief zijn voor de situatie in Nederland. Van deze landen kon echter niet voldoende informatie over ervaringsjaren worden verkregen. Ditzelfde geldt voor bijvoorbeeld de Verenigde Staten en landen uit het zuiden van Europa, zoals Spanje en Portugal, die ook klimatologisch gezien en qua locaties in bergachtig gebied minder representatief zijn voor Nederland.

### 3.3 Selectie incidenten en noemerdata

De Caithness database bevat een groot aantal incidenten. Niet al deze incidenten leveren een risico op voor mensen in de omgeving en zijn dus relevant voor omgevingsveiligheid. Daarom is een selectie gemaakt van

de incidenten die zijn opgenomen in de Caithness database die meetellen voor het berekenen van de faalfrequenties. Uitgangspunt hierbij was dat er bij onzekerheid of een turbine onder de rekenmethode valt, deze **wel** wordt meegenomen. Als het incident een offshore locatie betrof of een windturbine met een te laag vermogen ten opzichte van de noemerdata, werd deze uit de data gefilterd. De incidenten zijn geselecteerd op de volgende punten:

- **Omgevingsveiligheid**

Ten eerste is gekeken naar scenario's die relevant zijn voor omgevingsveiligheid. Dit zijn scenario's waarbij delen van de windturbine of de gehele windturbine op de grond terechtkomen. Hierdoor kunnen personen getroffen worden of kunnen als gevolg van domino-effecten personen aan gevaarlijke stoffen worden blootgesteld. Incidenten die onder arbeidsveiligheid vallen, zijn niet meegenomen. Tevens zijn incidenten tijdens het transport van (onderdelen van) windturbines niet meegenomen.

Incidenten waarbij sprake was van brand zijn alleen meegenomen wanneer is gerapporteerd dat onderdelen van de windturbine op de grond terecht zijn gekomen. Deze incidenten zijn dan bij de betreffende categorie (zoals bladafworp of bladafworp in delen) ingedeeld. Een brand in een windturbine kan in theorie ook brandgevaar opleveren in de omgeving door het afvallen van brandende onderdelen of vlieg vuur. De mogelijkheid en het gevaar van dit scenario zijn niet onderzocht.

- **Vermogen**

Bij de afleiding van faalfrequenties in 2012 is een grens van 1 MW gehanteerd om faalfrequenties voor voornamelijk grotere windturbines af te leiden. De grens is op zich arbitrair en het is niet direct te verwachten dat de faalmechanismen van (iets) kleinere windturbines afwijken ten opzichte van windturbines met een vermogen van meer dan 1 MW. Van alle incidenten in de Caithness database waarvan het vermogen van de windturbine bekend is, heeft 53% van de windturbines een vermogen van meer dan 1 MW.

Van een aantal landen is bekend welke vermogens de turbines hebben in de noemerdata. De incidenten die bij deze noemerdata aansluiten zijn meegenomen zoals aangegeven in Tabel 4. Voor Denemarken en Duitsland is de grens van 1 MW gehanteerd om de vergelijkbaarheid met de 2012 data zo groot mogelijk te houden.

*Tabel 4 Incidenten die zijn meegenomen voor de trendanalyse en bepaling van de faalfrequentie, per land en vermogen*

	<b>Vermogen windturbines in noemerdata</b>	<b>Incident meegenomen als vermogen groter was dan</b>
Denemarken	Onbekend	1 MW (of onbekend)
Duitsland	Onbekend	1 MW (of onbekend)
Nederland	> 50 kW	50 kW (of onbekend)
Verenigd Koninkrijk	> 100 kW	100 kW (of onbekend)
Zweden	Alle	Alle (ook onbekend)

- **Type mast**

Incidenten met windturbines met alle typen masten worden meegenomen voor het bepalen van de faalfrequenties. Het grootste deel van nieuwere, grotere windturbines in Nederland heeft een stalen mast. Windturbines met andere masttypen, zoals beton, kunnen andere faalmechanismen hebben. Van alle incidenten in de Caithness database waarvan het masttype bekend is, heeft 74% een stalen masttype. De andere typen zijn staal/beton, staal/hybride, raster en staal/raster. In de noemerdata zijn zeer waarschijnlijk windturbines met alle verschillende masttypen opgenomen. Door het meenemen van incidenten van alle masttypen komt de typering van de teller- en de noemerdata met elkaar overeen.

- **Aantal bladen**

Incidenten met windturbines met zowel twee als drie bladen worden meegenomen voor het afleiden van de faalfrequenties. Tweebladige windturbines worden onder dezelfde normering gebouwd en zijn volgens de begeleidingscommissie constructief niet heel anders dan driebladige windturbines. In de noemerdata zijn zeer waarschijnlijk zowel windturbines met twee bladen als met drie bladen opgenomen. Door het meenemen van beide typen wordt in de teller- en de noemerdata naar dezelfde typen windturbines gekeken.

Wanneer bij een incident onbekend is of het twee of drie bladen betrof, is het incident ook meegeteld voor het bepalen van de faalfrequenties.

- **Locatie windturbines**

Alleen incidenten met windturbines die op land zijn geplaatst (onshore), zijn meegenomen voor het bepalen van de faalfrequenties. Incidenten die offshore hebben plaatsgevonden zijn niet meegenomen.

Offshore windturbines worden anders ontworpen dan onshore windturbines. Er moet voor offshore windturbines bijvoorbeeld rekening worden gehouden met golfslag en trillingen. Daarnaast zijn offshore windturbines niet opgenomen in de noemerdata.

Wanneer het onbekend is of de windturbine op land of offshore is geplaatst, is het incident meegeteld voor het bepalen van de faalfrequenties.

- **Moedwillige incidenten**

Faalfrequenties worden afgeleid voor scenario's die ontstaan uit niet-moedwillige situaties. Incidenten veroorzaakt door moedwillig ingrijpen worden daar niet in meegenomen. Om te bekijken of moedwillig veroorzaakte scenario's een rol kunnen spelen in de faalcijfers is in de Caithness database gekeken met trefwoorden of deze voorkwamen (zie Tabel 5). Geen van de trefwoorden kon gelinkt worden aan moedwillige scenario's.

Tabel 5 Trefwoorden die op moedwillige oorzaken kunnen wijzen in de Caithness database

<b>Trefwoord</b>	<b>Caithness nr.</b>	<b>Tekst-strofe</b>	<b>Scenario</b>
wanton(ly)	2758	'wanton destruction' of a birds nest	Niet relevant
willful(ly)	Niet aangetroffen	-	-
sabotage	Niet aangetroffen	-	-
terrorism	Niet aangetroffen	-	-
deliberate(ly)	1685	'wind turbines ... killed more birds of prey ... than deliberate poisoning or shooting'	Niet relevant
	1770	'lawsuit ... accusing ... of destroying their home deliberately'	Niet relevant
	2356	'developer had deliberately lied ... by covering up the presence of the Bald Eagles.'	Niet relevant
intentional(ly)	1955	'...It is an offence to intentionally take, injure or kill an osprey...'	Niet relevant
premeditate(d)	Niet aangetroffen	-	-

## 4 Statistische analyse en resultaten

Aan de hand van de analyse van de Caithness database is bekeken welke scenario's in de beschouwing meegenomen moesten worden voor een faalfrequentie-analyse. Daarop is met een trendanalyse bekeken of er bij het bepalen van de faalfrequenties uitgegaan kon worden van kortere tijdsperioden. De resulterende faalfrequenties zijn daarna vergeleken met de huidige frequenties en aangeleverde data.

### 4.1 Scenario's

Antea Group heeft in opdracht van het RIVM de Caithness database geanalyseerd. Zij heeft de incidenten in de Caithness database doorzocht op relevante scenario's voor omgevingsveiligheid. Zij deed dit voor de landen Denemarken, Duitsland, Frankrijk, Nederland (als 'Holland' en 'Netherlands'), het Verenigd Koninkrijk en Zweden voor de tijdsperiode 2000 t/m (juni) 2021. Bij sommige incidenten komen meerdere scenario's tegelijk voor, bijvoorbeeld bladafworp en mastbreuk. Hierdoor zijn achttien verschillende combinaties scenario's aangetroffen. Per combinatie is later bekeken of ze verdeeld moesten worden over de verschillende onderliggende scenario's. De achttien combinaties zijn gegeven in Tabel 6.

Tabel 6 Geïdentificeerde omgevingsveiligheid-relevante faalscenario's van windturbines in de Caithness database

<b>Geïdentificeerde (combinaties van) scenario's</b>	<b>Aan-tal</b>	<b>In analyse</b>	<b>Reden voor niet meenemen in analyse</b>	<b>Aantal in analyse<sup>1</sup></b>
<b>1. Incidenten buiten de selectiecriteria</b>				
Bladafworp bij overtoeren, mastbreuk	1	Nee	Jaar 2000	0
Bladafworp bij X <sup>2</sup> , mastbreuk	2	Nee	Mini ('private') windturbine + incident in Frankrijk	0
Bladbreek in delen, gondelafworp	1	Nee	Offshore installatie	0
Bladbreek in delen, mastbreuk	3	Nee	Vermogens (3×) van 600 kW (1×F, 1×D, 1×DK)	0
Gondelafworp, bladafworp bij X	1	Nee	Offshore installatie	0
Gondelafworp, bladbreek in delen	1	Nee	Vermogen van 850 kW in D	0
<b>2. Incidenten binnen de selectiecriteria</b>				
Afgeworpen onderdelen	1	Nee	Onbetrouwbaar aantal incidenten	0
Bladafworp bij nominaal toerental	2	Nee	Geen aparte trendanalyse, incidenten meegenomen bij 'Bladafworp bij X'	2
Bladafworp bij overtoeren	2	Nee	Geen aparte trendanalyse, incidenten meegenomen bij 'Bladafworp bij X'	2
Bladafworp bij X	67	Ja		67
Bladafworp bij X, bladbreek in delen	5	Nee	Geen aparte trendanalyse, incidenten verdeeld over 'Bladafworp bij X' en 'Bladbreek in delen' (zie hieronder voor uitleg)	7
Bladafworp bij X, gondelafworp	1	Nee	Geen aparte trendanalyse. Na herlezing artikel geclassificeerd als (alleen) 'Rotorafworp' en daar meegenomen	1

Geïdentificeerde (combinaties van) scenario's	Aantal	In analyse	Reden voor niet meenemen in analyse	Aantal in analyse <sup>1</sup>
<b>2. Incidenten binnen de selectiecriteria</b>				
Bladafworp bij X, ijsafworp	1	Nee	Geen aparte trendanalyse, incidenten meegenomen bij 'Bladafworp bij X' en 'Ijsafworp'	2
Bladbreek in delen	97	Ja		97
Gondelafworp	3	Ja	1 incident in D (1,5 MW) meegeteld als gondelafworp. Andere incidenten niet meegenomen (F en D (500 kW))	1
Ijsafworp	17	Ja		17
Mastbreek	30	Ja		30
Rotorafworp	8	Ja		8

<sup>1</sup> Aantal incidenten dat uiteindelijk meetelt voor de bepaling van de faalfrequenties, zie tekst hieronder voor uitleg. In totaal 234 incidenten meegenomen.

<sup>2</sup> Bladafworp bij X = bladafworp bij onbekend toerental.

Conform het protocol zijn voor de scenario's faalfrequenties afgeleid. Dit is niet voor alle achttien scenario's gedaan:

- In de eerste groep vallen zes scenario's af omdat ze buiten de selectiecriteria vallen. De scenario's vallen ofwel buiten de geselecteerde jaren en landen, ofwel buiten de criteria voor vermogen en onshore/offshore.
- In de tweede groep is een aantal scenario's niet meegenomen in de analyse:
  - Het scenario 'Afgeworpen onderdelen' komt slechts één keer voor. Waarschijnlijk komt dit doordat de schade die veroorzaakt wordt door enkele losse onderdelen die naar beneden vallen beperkt is, waardoor dergelijke incidenten minder snel in de media komen. De verwachting is dan ook dat dit scenario vaker voorkomt dan in de Caithness database is weergegeven. Faalcijfers die op basis van de database worden afgeleid, zijn daardoor voor dit scenario naar verwachting minder betrouwbaar. Met de begeleidingscommissie is afgestemd dat het te verwachten is dat kleine onderdelen die afvallen, vaak direct rond de mast terechtkomen en daardoor een beperkt effect op de omgeving hebben. Volgens de begeleidingscommissie is het daardoor nog steeds een goede werkwijze om het risico op afvallen van kleine onderdelen kwalitatief te beschrijven, zoals dat nu ook gebeurt, en hierin eventuele maatregelen mee te nemen.
  - Aan Antea Group is gevraagd om te achterhalen of scenario's bij nominaal toerental of overtoeren plaatsvinden. Uiteindelijk kon dit slechts voor vier incidenten worden achterhaald: twee voor nominaal toerental en twee voor overtoeren. Voor een trendanalyse is dit te weinig. Daarom zijn deze incidenten toegevoegd aan het scenario 'Bladafworp bij X' (bij een onbekend toerental).

Met de begeleidingscommissie is afgestemd dat er te weinig informatie beschikbaar is om te kunnen onderbouwen of en hoe vaak overtoerenscenario's een rol spelen.

- Het gecombineerde scenario 'Bladafworp bij X, bladbreuk in delen' kwam vijf keer voor. Bij nadere beschouwing van de onderliggende artikelen (sommigen via <https://web.archive.org> achterhaald) bleken deze soms alleen bij bladafworp of bladbreuk te horen en slechts in twee gevallen echt gecombineerd voor te komen. De scenario's zijn daarom verdeeld over de scenario's 'Bladafworp bij X' (incidenten uit 2006, 2008 en 2018) en 'Bladbreuk in delen' (incidenten uit 2002, 2008, 2018 en 2019). De incidenten uit 2008 en 2018 tellen dus mee voor beide scenario's, de andere drie alleen voor één scenario.
- Het gecombineerde scenario 'Bladafworp bij X, IJsafworp' is toegevoegd aan 'Bladafworp bij X' en 'ijsafworp' (telt dus bij beide scenario's één keer mee).

Uiteindelijk resteren zes scenario's die relevant zijn voor omgevingsveiligheid en waarvoor faalfrequenties afgeleid worden:

- Twee scenario's die al in het rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid Module IV zijn beschreven: bladafworp en mastbreuk.
- Het scenario 'bladbreuk in delen'. Dit is ontstaan door bij scenario's betreffende rotorbladen te bekijken of het afworp van een (groot deel) van het blad betrof of dat het blad in delen faalde. Bij de faalfrequenties uit 2012 werd (conservatief) aangenomen dat elk scenario met bladen een bladafworp van het gehele blad betrof. In de begeleidingscommissie is besproken dat bij oudere windturbines de kans groter was dat een volledig blad werd afgeworpen dan bij de huidige windturbines. Nu komt het vaker voor dat bladen scheuren of stukken (tip) afbreken. Bladdelen kunnen verder weg geworpen worden.
- NB: soms worden meerdere bladen in delen afgeworpen. Omdat informatie hierover niet of nauwelijks is te vinden, zijn alle incidenten eenmalig (als één incident) meegerekend. In één incident werden zowel een heel blad als een blad in delen afgeworpen ('Bladafworp bij X, bladbreuk in delen'). Dit incident is één keer meegeteld bij 'Bladafworp bij X' en één keer bij 'bladbreuk in delen'.
- Het scenario rotorafworp. Ten opzichte van het rekenvoorschrift betreft dit nu alleen de afworp van de rotor met bladen, waarbij de gondel blijft hangen.
- Het scenario gondelafworp. Uiteindelijk is er slechts één incident van gondelafworp dat binnen de selectiecriteria valt, waardoor hier geen trendanalyse voor uitgevoerd kan worden. Dit incident is wel meegenomen in de afleiding van de faalfrequenties. In het huidige rekenvoorschrift wordt uitgegaan van het afvallen van gondel en rotor (of alleen een rotor) en wordt hier één faalfrequentie voor gegeven. De data uit dit rapport zijn te gebruiken om een verdere verdeling in de faalfrequenties tussen rotorafworp en gondelafworp aan te geven.



- Het scenario ijsafworp. Dit is een nieuw scenario ten opzichte van het rekenvoorschrift. Dit scenario wordt in het rekenvoorschrift alleen kwalitatief beschouwd.

## 4.2 Trendanalyse

Zoals hierboven aangegeven wordt voor het scenario gondelafworp geen trendanalyse uitgevoerd. Voor de overige vijf scenario's die relevant zijn voor omgevingsveiligheid wordt de trendanalyse wel uitgevoerd. In Tabel 7 staan de scenario's en de aantallen incidenten per jaar die voor de trendanalyse zijn gebruikt.

Tabel 7 Aantallen windturbines en voorgekomen incidenten van zes scenario's in de dataselectie

Jaar	Aantal wind-turb.	Bladaf-worp bij X	Blad-breuk in delen	IJs-afworp	Mast-breuk	Rotor-afworp	Gondel afworp
2001	14.363	3	1	0	0	0	0
2002	17.993	3	9	2	1	0	0
2003	20.775	1	5	0	0	0	0
2004	22.595	2	7	4	0	1	0
2005	24.392	4	6	2	2	2	0
2006	26.647	3	6	2	2	0	0
2007	28.142	7	4	0	3	1	0
2008	30.208	6	1	2	3	0	0
2009	32.418	7	2	2	0	0	0
2010	34.602	1	1	0	0	0	0
2011	33.336 <sup>1</sup>	2	3	0	2	0	0
2012	35.367	4	2	0	1	0	0
2013	37.242	7	6	1	3	1	0
2014	39.734	4	5	0	3	0	0
2015	41.643	4	6	0	4	0	0
2016	43.654	4	7	2	1	1	1
2017	46.294	1	4	0	3	0	0
2018	47.474	6	9	0	0	1	0
2019	44.196 <sup>2</sup>	3	10	1	1	0	0
2020	44.778 <sup>2</sup>	3	7	0	1	2	0
Tot.	665.853	75	101	18	30	9	1
Max <sup>3</sup>		92	110	19	42	11	1

1 Het aantal windturbines in 2011 is lager dan in 2010 door de overgang van data uit de toelichting bij het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid naar de data van websites uit de geselecteerde landen (zie ook Tabel 2).

2 Het aantal windturbines over de geselecteerde landen is lager in 2019 en 2020 vanwege het ontbreken van data uit Denemarken. In de Caithness database kwamen geen incidenten voor in Denemarken in 2019 en 2020.

3 Het maximaal aantal incidenten dat geteld wordt als het criterium voor vermogen zou vervallen.

De analyse op deze data is uitgevoerd met behulp van een R script. De programmeertaal R wordt veel gebruikt voor het uitvoeren van statistische berekeningen en in dit geval is het gebruikt om te bepalen of er een statistisch significante dalende of stijgende trend in de data te onderscheiden is. De data zijn hiertoe in twee stappen bewerkt:

- Het aantal incidenten per jaar is per scenario gedeeld door het aantal windturbines voor dat jaar om een reeks faalfrequenties per jaar te bepalen. Van die reeks faalfrequenties is per faalscenario de p-waarde berekend met een Generalised Linear Model (GLM) in R. De nulhypothese voor deze berekening is dat de faalfrequentie constant is over twintig jaar en dat de verschillen van jaar tot jaar het gevolg zijn van random fluctuaties. Met de berekende p-waarde kan bepaald worden hoe (on)waarschijnlijk die hypothese is. Er wordt uitgegaan van de waarde van 5% voor het significantieniveau, zoals genoemd in het protocol. Als de p-waarde kleiner is dan 0,05 dan wordt de nulhypothese verworpen, oftewel wordt geconstateerd dat er een trend aanwezig is.
- Op de berekende p-waarde is eerst nog een 'multiple-test-correctie' uitgevoerd. Het is een bekend probleem dat de kans groter wordt dat er een onterecht significant resultaat bij zit als je meer toetsen uit gaat voeren. Met de Benjamini-Hochberg-procedure [16] wordt dit gecorrigeerd. Als de gecorrigeerde p-waarde kleiner is dan het significantieniveau van 5% wordt de nulhypothese verworpen en kan gesproken worden van een dalende of stijgende trend.

De resultaten van de berekening zijn gegeven in Tabel 8. Uit de tabel is te concluderen dat alleen voor ijsafworp een (dalende) trend af te leiden is. Het is niet duidelijk in hoeverre technische ontwikkelingen of veranderende klimatologische omstandigheden hier een rol in spelen. Hierdoor kan voor dit scenario uitgegaan worden van een kortere periode om een faalfrequentie af te leiden. Conform het protocol en zoals besproken met de begeleidingscommissie is hierbij uitgegaan van de laatste tien jaar.

*Tabel 8 Berekende gecorrigeerde p-waarden voor de vijf omgevingsveiligheid-relevante faalscenario's*

Scenario	p_gecorrigeerd	Trend?
Bladafworp bij X	0,084	Nee
Bladbreuk in delen	0,349	Nee
Ijsafworp	0,007	Ja
Mastbreuk	0,779	Nee
Rotorafworp	0,932	Nee

### 4.3 Faalfrequenties

Voor de scenario's die relevant zijn voor omgevingsveiligheid zijn de verwachtingswaarden en de 95% betrouwbaarheidswaarde berekend en gegeven in Tabel 9. Het scenario gondelafworp is hierin meegenomen. Voor de berekening is hierbij voor ijsafworp uitgegaan van de incidenten van de laatste tien jaar en voor de overige scenario's van de hele reeks incidenten van twintig jaar.

Tabel 9 Berekende verwachtingswaarde en 95% betrouwbaarheidswaarde van de faalfrequentie voor de zes omgevingsveiligheid-relevante faalscenario's

<b>Scenario</b>	<b>Periode</b> [jaren]	<b>Verwachtings- waarde</b> [turbine <sup>-1</sup> jaar <sup>-1</sup> ]	<b>95% betrouw- baarheidswaarde</b> [turbine <sup>-1</sup> jaar <sup>-1</sup> ]
Bladafworp bij X	20	1,13E-04	1,36E-04
Bladbreek in delen	20	1,52E-04	1,79E-04
IJsafworp	10	9,67E-06	2,21E-05
Mastbreek	20	4,51E-05	6,11E-05
Rotorafworp	20	1,35E-05	2,36E-05
Gondelafworp	20	1,50E-06	7,12E-06

De afgeleide faalfrequentie voor het scenario ijsafworp is besproken met de begeleidingscommissie. De faalfrequentie die voor dit scenario is afgeleid lijkt niet betrouwbaar omdat afgeworpen ijs vaak niet gezien en gerapporteerd wordt. Bijvoorbeeld doordat afgeworpen ijs niet opvalt in besneeuwde/ijzige gebieden of omdat ijs kan smelten na afworp. Waarschijnlijk komt ijsafworp dus vaker voor dan in de Caithness database is weergegeven. Door deze mogelijke onbetrouwbaarheid kan er voor gekozen worden de bepaalde faalfrequentie voor ijsafworp te laten vervallen.

De hier gekozen aanpak voor het bepalen van de 95% betrouwbaarheidswaarde is conservatief. Er is gekozen om de faalfrequenties voor de individuele scenario's te bepalen. Dit zorgt er voor dat de optelsom van de 95% betrouwbaarheidswaarden van de afzonderlijke scenario's hoger is dan de 95% betrouwbaarheidswaarde op basis van het totaal aantal van 234 incidenten. Dit verschil kan worden verdisconteerd in de individuele scenario's door de scenario's af te lopen in volgorde van ernst. Voor het grootste effect-scenario wordt de 95% betrouwbaarheidswaarde eerst bepaald op het daarbij horende aantal incidenten. Bij elk volgend grootste effect-scenario wordt de 95% betrouwbaarheidswaarde bepaald door op basis van het totaal aantal van dit scenario en het totaal aantal incidenten van de bovenliggende grotere effect-scenario's en hiervan reeds afgeleide faalfrequenties vanaf te trekken. Dat is lastig uit te voeren voor windturbines, omdat de scenario's zeer verschillende effecten hebben en daardoor de volgorde van incidentgrootte moeilijk te bepalen is. Dit is wel een extra argument om de faalfrequentie voor ijsafworp te laten vervallen. De impact van het scenario ijsafworp is waarschijnlijk klein, doordat afgevalen ijs vaak dichtbij de turbine terecht komt. Wanneer ijsafworp niet wordt meegenomen, bedraagt het verschil tussen de optelsommen nog circa 10%, dat redelijk is gezien andere onzekerheden.

De nu berekende waarden voor de faalfrequenties per scenario kunnen worden vergeleken met de waarden uit het rekenvoorschrift omgevingsveiligheid en de aangeleverde waarden van BWE. Deze vergelijking is gegeven in Tabel 10.

Tabel 10 Berekende faalfrequenties vergeleken met de waarden, zoals aangeleverd en vermeld in het rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid Module IV.

Alle waarden in turbine<sup>-1</sup>jaar<sup>-1</sup>

Waarde	Bladafworp bij X	Bladbreuk delen	IJsafworp	Mastbreuk	Rotorafworp	Gondelafworp
Verwachtingswaarde '2021'	1,1E-04	1,5E-04	9,7E-06	4,5E-05	1,4E-05	1,5E-06
Verwachtingswaarde BWE <sup>1</sup>	1,0E-04	-	-	2,3E-05	1,9E-05	-
Verwachtingswaarde rekenvoorschrift <sup>2</sup>	6,3E-04	-	-	5,8E-05	1,8E-05	-
95% betrouwbaarheidswaarde '2021'	1,4E-04	1,8E-04	2,2E-05	6,1E-05	2,4E-05	7,1E-06
95% betrouwbaarheidswaarde rekenvoors. <sup>2</sup>	8,4E-04	-	-	1,3E-04	4,0E-05	-

1 Waarden als aangeleverd door BWE, zie paragraaf 2.2: Duitse incidenten uit de periode 2011-2020, indicatief.

2 Vergeleken met de waarden uit het rekenvoorschrift voor bladafworp (geen opsplitsing naar bladafworp en bladbreuk), mastbreuk en het scenario 'afvallen van gondel en rotor (of alleen een rotor)'.

In Tabel 10 is te zien dat de faalfrequenties van alle scenario's, die al in het rekenvoorschrift zijn beschreven, lager uitvallen. Ook als bladafworp en bladbreuk opgeteld worden om te kunnen vergelijken met bladafworp uit het rekenvoorschrift is de faalfrequentie lager. De verwachtingswaarden vallen lager uit omdat er in de laatste tien jaar minder incidenten per turbine per jaar zijn gemeld in de Caithness database. Dit, ondanks het feit dat er geen statistisch onderbouwde trend te bemerken is.

De nieuw berekende faalfrequenties zijn ook vergeleken met de ontvangen BWE-data (zie paragraaf 2.2). Aandachtspunt hierbij is dat een vergelijking met de BWE-data moeilijk één-op-één te maken is vanwege de verschillende gehanteerde methoden (onder andere welke landen zijn beschouwd) en omdat onbekend is hoe de verzameling van relevante incidenten door BWE heeft plaatsgevonden. Uit de vergelijking blijkt wel dat de berekende frequenties redelijk vergelijkbaar zijn met de faalfrequenties uit de BWE-rapportage. Dit geeft enige houvast omdat Duitsland in deze berekeningen circa 65% van de windturbineaantallen levert.

Doordat de dataset nu groter is dan de dataset die gebruikt is voor het rekenvoorschrift, valt met name de 95% betrouwbaarheidswaarde lager uit.

## 5 Conclusie, discussie en aanbevelingen

In dit rapport heeft het RIVM met recentere incidentgegevens van windturbines de scenario's voor het falen van windturbines en de bijbehorende faalfrequenties geactualiseerd. In dit hoofdstuk volgen de conclusies uit het onderzoek, de discussie en de aanbevelingen.

### 5.1 Dataverzameling

De scenario's voor het falen van windturbines en de bijbehorende faalfrequenties zijn afgeleid op basis van voor omgevingsveiligheid relevante windturbine-incidenten die zijn bijgehouden in de Caithness database [11]. Voorafgaand aan dit onderzoek is onderzocht of de scenario's en faalfrequenties op basis van incidentgegevens van windturbinefabrikanten konden worden afgeleid. Door fabrikanten is echter te weinig data aangeleverd om scenario's en faalfrequenties van af te leiden. Van de beschikbare openbare bronnen was de Caithness database de meest geschikte optie. Onder andere omdat in deze database voor een lange periode incidentgegevens beschikbaar zijn. Van het totaal aantal windturbine-incidenten dat is opgenomen in de Caithness database is een selectie gemaakt op basis van verschillende selectiecriteria.

Om de scenario's en bijbehorende faalfrequenties te kunnen bepalen, zijn naast incidentgegevens ook gegevens nodig over ervaringsjaren van windturbines. Hiervoor is gebruikgemaakt van specifieke bronnen uit de beschouwde landen.

De scenario's en bijbehorende faalfrequenties zijn afgeleid op basis van gegevens uit Denemarken, Duitsland, Nederland, het Verenigd Koninkrijk en Zweden. Deze landen hebben vergelijkbare klimatologische omstandigheden als Nederland. Ook zijn de windturbines die in deze landen staan technisch vergelijkbaar met de windturbines die in Nederland staan.

### 5.2 Scenario's en faalfrequenties

Op basis van de Caithness database zijn faalfrequenties voor zes verschillende scenario's afgeleid: **bladafworp, bladafworp in delen, ijsafworp, mastbreuk, rotorafworp en gondelafworp.**

De berekende faalfrequenties zijn weergegeven in Tabel 11. De faalfrequentie voor ijsafworp wordt niet aanbevolen voor gebruik (zie tekst hieronder) en is niet opgenomen in deze tabel.

Tabel 11 Berekende faalfrequenties

Waarde	Bladafworp bij X	Bladbreek in delen	Mastbreek	Rotorafworp	Gondelafworp
Faalfrequentie [turbine <sup>-1</sup> jaar <sup>-1</sup> ]					
Verwachtingswaarde '2021'	1,1E-04	1,5E-04	4,5E-05	1,4E-05	1,5E-06
95% betrouwbaarheidswaarde '2021'	1,4E-04	1,8E-04	6,1E-05	2,4E-05	7,1E-06

Voor het scenario **afvallen van kleine onderdelen** is geen faalfrequentie afgeleid. In de analyse van de database is hier slechts één incident over gevonden. Verwacht wordt echter dat dit scenario vaker optreedt, maar onopgemerkt blijft of te weinig nieuwswaarde heeft, waardoor dit niet in de Caithness database komt. Kleine onderdelen zullen vaak binnen de rotordiameter van de windturbine terechtkomen, waardoor de bijdrage van dit scenario aan het risico op grotere afstand waarschijnlijk klein is. In de huidige rekenmethode moet dit scenario kwalitatief worden beschouwd. Aanbevolen wordt om in een nieuwe rekenmethode dit scenario ook kwalitatief te beschouwen.

De afgeleide faalfrequentie voor het scenario **ijsafworp** is besproken met de begeleidingscommissie. De faalfrequentie die voor dit scenario is afgeleid, lijkt niet betrouwbaar omdat afgeworpen ijs vaak niet gezien en gerapporteerd wordt. Bijvoorbeeld doordat afgeworpen ijs niet opvalt in besneeuwde/ijzige gebieden of omdat ijs kan smelten na afworp. Waarschijnlijk komt ijsafworp dus vaker voor dan in de Caithness database is weergegeven. Omdat de verwachting is dat de afgeleide faalfrequentie voor ijsafworp niet betrouwbaar is, wordt aanbevolen om ijsafworp kwalitatief te blijven beoordelen in een risicoanalyse, net als in de huidige rekenmethode gebeurt.

De scenario's **bladafworp in delen**, **rotorafworp** en **gondelafworp** waar faalfrequenties voor zijn afgeleid, zijn nieuwe scenario's. Deze scenario's komen in de huidige rekenmethode nog niet voor, alleen het gecombineerde scenario 'afvallen van gondel en rotor (of alleen een rotor)', waar één faalfrequentie voor wordt gegeven. Voor de nieuwe scenario's is nog geen methode beschikbaar om het effect van deze scenario's te bepalen. Om de invloed van de nieuwe scenario's te kunnen bepalen op het totale risico van een windturbine moeten voor deze scenario's rekenregels opgesteld worden aan de hand waarvan de effecten bepaald kunnen worden. Aanbevolen wordt dan ook om in een vervolgtraject de rekenregels voor het bepalen van de effecten voor deze scenario's op te stellen.

De scenario's **bladafworp** en **mastbreek** waarvoor nieuwe faalfrequenties zijn afgeleid, komen wel in de huidige rekenmethode voor. Eerder heeft het RIVM in een advies aan het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat al geadviseerd om een eenduidige rekenmethode vast te stellen voor de huidige scenario's. Op basis van het huidige rekenvoorschrift kunnen namelijk meerdere methoden worden gebruikt. Hierdoor zijn de uitkomsten niet uniform. Bij het vaststellen van de eenduidige rekenmethode kunnen de huidige rekenregels worden gevalideerd en zo nodig worden herzien. Het

vaststellen van een eenduidige rekenmethode voor de effectmodellering kan ervoor zorgen dat de risico's van windturbines op eenzelfde wijze worden berekend en er dus minder discussie bestaat over de uitkomsten.

Voor het scenario bladafworp wordt in de huidige rekenmethode uitgegaan van twee situaties om het effect te berekenen, te weten bladafworp bij nominaal toerental en bij overtoeren. De faalfrequentie voor bladafworp wordt in de huidige rekenmethode verdeeld over deze twee situaties. Bij de afleiding van de faalfrequentie die in deze rapportage is beschreven, kan op basis van de incidenten geen verdeling worden gemaakt van de faalfrequentie over de verschillende omwentelingssnelheden. Daarom wordt geadviseerd om bij het uniformeren van de effectmodellering te bepalen hoe deze faalfrequentie moet worden verdeeld over de verschillende omwentelingssnelheden.

Wanneer de effectmodellering is bepaald voor alle scenario's wordt aanbevolen de gehele rekenmethode (faalfrequenties en eenduidige rekenregels) op te nemen in het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid. Eventueel kan als vervolg deze methode worden opgenomen in de softwarepakketten die gebruikt worden voor berekening van de omgevingsveiligheidsrisico's. Deze rekenmethode kan vervolgens worden aangewezen in de wet- en regelgeving.

### **5.3 Toepasbaarheid faalfrequenties**

De scenario's voor het falen van windturbines en de bijbehorende faalfrequenties die in dit rapport zijn afgeleid, zijn in ieder geval toepasbaar voor windturbines met een vermogen gelijk aan of hoger dan 1 MW. Meer dan de helft van de incidenten die opgenomen zijn in de Caithness database, waarbij het vermogen van de windturbine bekend is, gebeurde bij windturbines met een vermogen hoger dan 1MW.

Voor windturbines met een lager vermogen zijn deze faalfrequenties ook bruikbaar wanneer de windturbine is gebouwd volgens dezelfde normen. Bij dergelijke windturbines is namelijk geen ander faalgedrag te verwachten.

Kleinere windturbines, bijvoorbeeld de windturbines die voornamelijk geplaatst worden bij agrarische bedrijven, worden vaak volgens andere eisen gebouwd dan de grotere windturbines. De afgeleide faalfrequenties zijn daarom niet één-op-één toepasbaar op dit soort windturbines.

Totdat de rekenregels voor de scenario's zijn opgesteld, kunnen de nieuwe cijfers voor de faalfrequentie nog niet worden gebruikt.

### **5.4 Toekomstige ontwikkelingen rond faalfrequenties windturbines**

Er vinden veel ontwikkelingen plaats om steeds meer energie op te gaan wekken met windturbines. Ook de technologische ontwikkeling van de windturbines blijft doorgaan. Bijvoorbeeld de afmetingen van de windturbines nemen nog steeds toe. Deze ontwikkelingen kunnen van invloed zijn op het faalgedrag van windturbines en daarmee op de

relevante scenario's en bijbehorende faalfrequenties. Het risico dat daarbij bestaat, is dat de nu afgeleide faalfrequenties relatief snel niet meer aansluiten bij de beschrijving van de meerderheid van de windturbinepopulatie. Daarom wordt aanbevolen de faalfrequenties regelmatig, circa eens in de tien jaar, te actualiseren.

Een aandachtspunt bij het herzien van de faalfrequenties is dat er op dit moment geen officieel vastgestelde database is met windturbine-incidenten. Terugvallen op de Caithness database zal in de toekomst niet meer gaan, omdat deze per 30 juni 2021 is gestopt met het registreren van incidenten. Daarom wordt aanbevolen om incidenten met windturbines gestructureerder te gaan verzamelen. Een optie die meer en betrouwbaarder inzicht geeft in de daadwerkelijke omgevingsveiligheidsrisico's van windturbines zou een verplichting zijn voor het melden van incidenten en eventueel bijna-ongevallen. Het heeft daarbij de voorkeur om een dergelijke verplichting Europees op te zetten. Het registreren van alleen Nederlandse incidenten zal niet genoeg gegevens opleveren om faalfrequenties van af te leiden.



## Literatuur

1. *Klimaatakkoord*, 28 juni 2019.
2. *Module IV van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid*, RIVM, oktober 2020.
3. *Memo beoordeling huidige faalfrequenties windturbines en beschikbaarheid data voor actualiseren*, kenmerk 2020-0040/VLH/MSO/HdW/sv, RIVM, 2020.
4. Gooijer L., Laheij G.M.H. en W. A.G., *Protocol aanpassing rekenmethodieken Externe veiligheid*, RIVM-Rapport 620550009/2012, RIVM, 2012.
5. FEE & Ineris, *Guide technique, Elaboration de l'étude de dangers dans le cadre des parcs éoliens*, 2012.
6. S.R. Brouwer et al., *Towards analysing risks to public safety from wind turbines*. Reliability Engineering & System Safety, 2018. **180**: p. 77-87.
7. C.M.E. Robinson et al., *Study and development of a methodology for the estimation of the risk and harm to persons from wind turbines*, HSE, 2013.
8. A. Junge en S. Daschevski, *Windenergieanlagen in Nähe von schutzobjekten bestimmung von mindestabständen*, Veenker, 2014.
9. S. Gupta et al., *Den Brook Wind Farm risk assessment. Prepared for RES UK & Ireland Ltd*, MMI, 2012.
10. MMI, *Advances and cases studies in wind turbine risk assessments. Icing – how big a hazard?*, 2013.
11. *Caithness windfarms information forum, Wind turbine accident and incident compilation*. Beschikbaar via <http://www.caithnesswindfarms.co.uk/fullaccidents.pdf>. (Geraadpleegd 21 december 2021).
12. *Toelichting van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid*, RIVM, oktober 2020.
13. Bosch & van Rijn. Beschikbaar via <https://windstats.nl/statistieken/>. (Geraadpleegd 2 maart 2022).
14. Bosch & van Rijn. Beschikbaar via [https://windstats.nl/dashboard/#per\\_fabrikant](https://windstats.nl/dashboard/#per_fabrikant). (Geraadpleegd (Alleen toegankelijk via inlog)).
15. Beschikbaar via <https://www.enercon.de/en/company/market-share/>. (Geraadpleegd 2 maart 2022).
16. Y. Benjamini en Y. Hochberg, *Controlling the False Discovery Rate: A Practical and Powerful Approach to Multiple Testing*. Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological), 1995. **57**(1): p. 289-300.
17. C.J. Faasen, P.A.L. Franck en A.M.H.W. Taris, Rijksdienst voor Ondernemend Nederland. *Handboek Risicozonering Windturbines* 2014.
18. *Windkraft Journals*. Beschikbaar via <https://www.windkraftjournal.de/>. (Geraadpleegd 12 juni 2020).



## Bijlage 1 Beoordeling faalfrequenties uit 2012

Onderstaande is de tekst uit de memo uit 2020 [3], waarin het RIVM heeft onderzocht of het nodig en mogelijk is nieuwe faalfrequenties af te leiden voor windturbines. Daarvoor zijn de huidige faalfrequenties en achterliggende bronnen beoordeeld.

Bij voorliggende actualisatie is het Caithness Windfarm Information Forum als bron gebruikt. Deze bron is in de memo uit 2020 ook beoordeeld en geeft daardoor inzicht in de kwaliteit en aandachtspunten van deze bron.

*NB: De terminologie in onderstaande tekst wijkt soms af van de terminologie in dit rapport. De genoemde referenties verwijzen naar de referenties uit de memo, niet naar de literatuurlijst van dit rapport.*

Om faalfrequenties te kunnen bepalen zijn gegevens nodig over incidenten van windturbines (incidentendatabases) en het aantal turbinejaren waarbij die incidenten optraden (databases met turbineaantallen per jaar). De faalfrequenties uit 2012 die gehanteerd worden voor windturbines zijn afgeleid over de periode 2001-2010 en gebaseerd op incidenten uit Denemarken, Duitsland en het Verenigd Koninkrijk, omdat de bronnen uit deze landen voldoende turbinejaren en incidenten bevatten. Deze werden voor Nederland toepasbaar geacht. De gebruikte bronnen voor incidenten en aantallen turbinejaren staan beschreven in het Handboek Risicozonering Windturbines [17] en zijn vervolgens overgenomen in de toelichting op het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid [2].

Hieronder geven we een beoordeling van de bronnen die zijn gebruikt voor het afleiden van de faalfrequenties uit 2012:

- in A geven we de gebruikte criteria en definities op basis van het protocol aanpassing rekenmethodieken Externe Veiligheid [4];
- in B t/m E geven we een beschrijving van de drie bronnen voor incidenten en de bronnen voor windturbinejaren;
- in F vergelijken we de bronnen en geven we een beoordeling.

### **A. Beoordeling bronnen faalfrequenties uit 2012**

De bronnen voor incidentdata zijn beoordeeld aan de hand van een aantal criteria en uitgangspunten. Hoe beter de bron scoort op de criteria, hoe beter deze beoordeeld wordt. Aan de uitgangspunten moet de bron in ieder geval voldoen.

Het protocol aanpassing rekenmethodieken Externe Veiligheid [4] hanteert de criteria robuustheid, validiteit, transparantie en verifieerbaarheid voor de beoordeling van aanpassingen aan een rekenmethodiek. De definities zoals opgenomen in het protocol zijn hieronder gegeven.

- **Robuustheid**  
In het protocol gaat robuustheid vooral over reproduceerbaarheid, het omgaan met onzekerheden. Robuust wil in dit geval zeggen dat een realistisch veilige benadering (ook wel conservatief genoemd) wordt gebruikt in geval van onzekerheid. Anderzijds kan onder 'robuust' worden verstaan dat het resultaat niet (extreem) gevoelig is voor kleine wijzigingen in uitgangspunten of specifieke omstandigheden.
- **Validiteit**  
Voor de beoordeling van voorstellen tot aanpassing in de rekenmethodiek wordt bij de validiteit gekeken naar aspecten die een rol spelen om de juistheid te toetsen, zoals de actualiteit, de volledigheid en de mate van (wetenschappelijke) onderbouwing van een voorstel. Verder speelt de toepasbaarheid (representatie) een rol. Ook is een beoordeling op 'relevantie' van belang. Hierbij wordt beoordeeld of een voorstel betrekking heeft op uitkomsten die uit oogpunt van externe risico's relevant zijn, respectievelijk leidt tot uitkomsten die, gezien de bestaande onzekerheden in de risicoschatting, tot duidelijk nieuwe inzichten in het externe risico leiden.
- **Transparantie**  
Voor toepassing in het kader van (voorstellen tot) aanpassingen in de methodiek wordt dit als volgt vertaald: transparantie in de afwegingen kan worden verkregen door het eenduidig en expliciet documenteren van de gevolgde procedure en geraadpleegde data.
- **Verifieerbaarheid**  
Waar zijn waarden voor in te voeren parameters en te hanteren faalfrequenties te vinden, dan wel waar is te vinden hoe deze zijn afgeleid van bepaalde bronwaarden? Dit criterium betreft de invoergegevens van de risicoberekening.

Daarnaast wordt in het protocol een aantal uitgangspunten gehanteerd waaraan de faaldata moeten voldoen. Deze uitgangspunten hebben wij overgenomen uit het protocol en waar nodig vertaald naar dit project. Het gaat hierbij om representativiteit, tijdvak, volledigheid, openbaarheid en registratie.

- **Representativiteit**  
De data in de bron dienen representatief te zijn voor de situatie in Nederland.
- **Tijdvak/actualiteit**  
Het uitgangspunt hierbij is een periode van dertig jaar, maar er kunnen redenen zijn om een kortere periode te hanteren. Bij de inventarisatie dient voor de volledigheid een overzicht van de totale beschikbare dataset gegeven te worden. Dit uitgangspunt beschrijft of deze tijdsperiode voor de desbetreffende bron beschikbaar is.
- **Volledigheid**  
Bevat de bron een zo volledig mogelijk beeld van de plaatsgevonden incidenten?
- **Openbaarheid**  
Het uitgangspunt in het protocol is dat de data openbaar zijn, of wanneer het gaat om bedrijfsgevoelige data of als de data

vanwege een andere reden niet openbaar gemaakt kunnen worden, moeten de data minimaal toegankelijk zijn voor de beheergroep en voor peer review door een onafhankelijke expert die de beheergroep aandraagt.

- **Registratie**

De registratie van de statistiek dient op een geordende wijze te hebben plaatsgevonden en de data (aantal gebeurtenissen en de beschrijving ervan) moet worden bewaard.

In de volgende paragrafen geven we een beschrijving van de drie bronnen voor incidenten en de bronnen voor windturbinejaren die zijn gebruikt voor de faalfrequenties uit 2012.

## **B. Caithness Windfarm Information Forum [11]**

Het Caithness Windfarm Information Forum (hierna: Caithness database) is een uitgebreide database met incidenten van windturbines wereldwijd die wordt bijgehouden door tegenstanders van windenergie. Voor zover bekend is dit één van de weinige openbare databases als bron voor incidenten van windturbines. De database is dan ook gebruikt als basis voor de faalfrequenties uit 2012. In de Caithness database zijn incidenten opgenomen voor de periode 1980 tot en met 2020. Voor het afleiden van de faalfrequenties uit 2012 is een tijdsperiode van tien jaar aan data gebruikt, namelijk 2001-2010. Deze periode is kort vergeleken met de aanbeveling uit het protocol aanpassing rekenmethodieken Externe Veiligheid [4] waarbij uitgegaan wordt van dertig jaar. Er kan echter van deze periode van dertig jaar worden afgeweken wanneer dit goed wordt onderbouwd. Gezien de snelle technische ontwikkelingen aan windturbines is het rechtvaardig van een kortere periode aan data uit te gaan wanneer uit de trendanalyse blijkt dat de faalfrequentie afneemt in de tijd.

De Caithness database is gebaseerd op incidenten die in de media verschijnen. Hiermee is de database afhankelijk van wat wel en niet in de media komt. Het is hierbij mogelijk dat kleine incidenten, bijvoorbeeld het afvallen van kleine onderdelen, of incidenten die buiten bewoond gebied plaatsvinden niet in de media komen. Hierdoor kan het zijn dat de database een onderschatting geeft van het aantal incidenten met windturbines. Ook staan sommige individuele incidenten als meerdere incidenten genoemd in de database en zijn de incidenten in de database niet altijd juist geclassificeerd. De database heeft hiermee een aantal aandachtspunten.

## **C. Fabrikanten van windturbines**

Bij de bepaling van de faalfrequenties uit 2012 is data over incidenten opgevraagd bij fabrikanten. Uiteindelijk is van twee fabrikanten Nederlandse incidentdata ontvangen.

Het voordeel van het gebruik van incidentdata van fabrikanten, is dat ervan uit kan worden gegaan dat alle incidenten worden geregistreerd. Wanneer een van de drie scenario's (mastbreuk, afvallen gondel of afbreken van een blad) plaatsvindt, is de windturbine immers niet meer bruikbaar en zal de turbine gerepareerd of vervangen moeten worden. Een nadeel van het gebruik van data van fabrikanten en/of exploitanten

is dat deze data veelal vertrouwelijk moeten worden behandeld en niet openbaar kunnen worden gemaakt.

Een ander aandachtspunt bij het gebruiken van data van slechts enkele fabrikanten is dat de data mogelijk niet representatief zijn voor alle windturbines die in Nederland aanwezig zijn. Daarmee zorgen deze data mogelijk voor een over- of onderschatting van de faalfrequenties.

#### **D. Windkraft Journals**

De derde bron die is gebruikt voor het bepalen van de faalfrequenties uit 2012 zijn de Windkraft Journals [17]. Aannemelijk is dat de website <https://www.wind-kraft-journal.de/> [18] is gebruikt, maar een exacte referentie in het handboek ontbreekt. De volgende website is namelijk ook beschikbaar: <https://www.windkraft-journal.de/>. De laatstgenoemde website bevat echter weinig tot geen informatie over incidenten. Windkraft Journals is een Duits tijdschrift dat verschillende thema's rondom windturbines behandelt, waaronder incidenten. Op het moment van het onderzoek stonden op de website de incidentdata van windturbines over een periode van 2009-2019. De cijfers die zijn gebruikt voor de faalfrequenties uit 2012 (van 2001-2010) stonden niet meer online en ook data van 2020 stonden nog niet online.

Uit de Windkraft Journals is data uit de periode 2001-2010 gebruikt om de faalfrequenties uit 2012 af te leiden. Deze periode is, net als voor de Caithness database, kort vergeleken met de aanbeveling uit het protocol aanpassing rekenmethodieken Externe Veiligheid [4], maar zoals eerder aangegeven rechtvaardigen de snelle technische ontwikkelingen aan windturbines het gebruik van data over een kortere periode wanneer uit de trendanalyse blijkt dat de faalfrequentie afneemt in de tijd.

In het Handboek Risicozonering Windturbines is aangegeven dat de Windkraft Journals geen compleet overzicht geven van de incidenten met bladbreuk, mastbreuk en gondelafworp. Dit zorgt ook voor een mogelijke onderschatting van de faalfrequenties. De faalfrequenties zijn voor de Caithness database en de Windkraft Journals individueel bepaald. Voor alle scenario's komt de faalfrequentie op basis van de Windkraft Journals lager uit dan op basis van de Caithness database.

#### **E. Bronnen voor windturbinejaren**

Voor de turbine aantallen per land per jaar zijn in het handboek [17] diverse bronnen gebruikt. Deze bronnen waren allemaal te achterhalen en zijn een betrouwbare bron voor turbine-aantallen.

#### **F. Beoordeling bronnen faalfrequenties uit 2012**

Tabel 12 geeft een overzicht van de beoordeling van de verschillende bronnen per criterium en uitgangspunt.

Tabel 12 Beoordeling bronnen faalfrequenties uit 2012

	<b>Caithness database</b>	<b>Fabrikanten</b>	<b>Windkraft Journals</b>
<i>Robuust- heid</i>	+/- Niet volledig	+ Volledig	+/- Niet volledig
<i>Validiteit</i>	+/- Actueel, niet volledig	+ Actueel, volledig	+/- Actueel, niet volledig
<i>Transpa- rantie</i>	+/- Bron soms afwezig	+/- Bron: fabrikanten	+/- Bron niet altijd bekend
<i>Verifieer- baarheid</i>	+/- Bron soms afwezig	- Precieze fabrikanten niet meer bekend	+/- Bron niet altijd bekend
<i>Represen- tativiteit</i>	+ Wereldwijd	+ Nederland	+ Wereldwijd
<i>Tijdvak</i>	+ Tot 30 jaar	? Niet meer bekend	+/- 10 jaar
<i>Volledig- heid</i>	+/- Bron: Media	+ Bron: Fabrikanten	+/- Bron: Divers
<i>Openbaar- heid</i>	+ Openbaar	- Vertrouwelijk	+ Openbaar
<i>Registratie</i>	+/- Dubbelingen & ver-keerde classificatie	+ Alle incidenten	+ Niet volledig

Op de criteria scoren alle bronnen ten minste +/- (voldoende), behalve op verifieerbaarheid bij de data van fabrikanten. De data van de fabrikanten zijn vertrouwelijk gedeeld en daarom niet openbaar beschikbaar. Er is daarom niet terug te halen van welke fabrikanten data zijn ontvangen en over welke tijdsperiode.

Ook op de uitgangspunten waaraan de data moeten voldoen scoren alle bronnen ten minste +/- (voldoende), behalve op openbaarheid bij de data van fabrikanten omdat de data vertrouwelijk gedeeld zijn.

## Bijlage 2 Contactinformatie deelnemers begeleidingscommissie

Het proces om te komen tot geactualiseerde scenario's en faalfrequenties is ondersteund door een begeleidingscommissie. Deze bestond uit vijf windturbine-experts van Antea Group, Arcadis, DCMR Milieudienst Rijnmond, NRG Arnhem en Pondera Consult. Onderstaand zijn de contactgegevens van de deelnemers weergegeven.



Dhr. W. Gruijters  
[Wiro.gruijters@AnteaGroup.nl](mailto:Wiro.gruijters@AnteaGroup.nl)  
Antea Group  
Zutphenseweg 31D  
7418 AH Deventer  
<https://anteagroup.nl/>



Dhr. C. Smit  
[Cees.Smit@Arcadis.com](mailto:Cees.Smit@Arcadis.com)  
Arcadis Nederland B.V.  
Piet Mondriaanlaan 26  
3812 GV Amersfoort  
<https://www.arcadis.com/nl-nl>



Dhr. J. Leroy  
[Julien.Leroy@DCMR.nl](mailto:Julien.Leroy@DCMR.nl)  
DCMR Milieudienst Rijnmond  
Parallelweg 1  
3112NA Schiedam  
<https://www.dcmr.nl/>



Dhr. L.P.M. Duisings  
[Duisings@nrg.eu](mailto:Duisings@nrg.eu)  
NRG Arnhem  
Utrechtseweg 310 B50-West,  
6812 AR Arnhem  
<https://www.nrg.eu/>



Dhr. B. Vogelaar  
[B.Vogelaar@PonderaConsult.com](mailto:B.Vogelaar@PonderaConsult.com)  
Pondera Consult  
Amsterdamseweg 13  
6814 CM Arnhem  
<https://ponderaconsult.com>





**RIVM**

*De zorg voor morgen begint vandaag*