

TNO INTERN

**Buildings, Infrastructure &
Maritime**Leeghwaterstraat 44
2628 CA Delft
Postbus 6012
2600 JA Delftwww.tno.nlT +31 88 866 22 00
F +31 88 866 06 30**TNO-rapport****TNO 2021 R11773****Schade aan hellende daken rondom
Maastricht Aachen Airport als gevolg van
vliegtuigwervels**

Datum 17 november 2021

Auteur(s)

Aantal pagina's	24 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	-
Opdrachtgever	Maastricht Aachen Airport
Projectnaam	Vortexbelasting
Projectnummer	060.49879/01.01

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2021 TNO

TNO INTERN

Inhoudsopgave

1	Inleiding	3
2	Belasting op daken	4
2.1	Drukken ten gevolge van vortexbelasting	4
2.2	Windbelasting op dakbedekkingen	9
3	Waarnemingen van schades	12
3.1	Schadewaarnemingen in literatuur	12
3.2	Schades rondom MAA.....	14
4	Oplossingsrichtingen.....	17
4.1	In rekening te brengen belasting	17
4.2	Verankeringsberekening.....	17
4.3	Invloedgebied	18
5	Conclusies en aanbevelingen	20
5.1	Conclusies	20
5.2	Aanbevelingen	20
6	Referenties	23
7	Ondertekening	24

1 Inleiding

In de omgeving van Maastricht Aachen Airport (MAA) is sprake van herhaaldelijk optredende schades aan dakbedekkingen van hellende daken ten gevolge van vliegtuigwervels. Uit de waargenomen schadegevallen komt het beeld naar voren dat met name landende vliegtuigen zorgen voor het loskomen en in sommige gevallen neervallen van dakpannen. MAA heeft aan TNO gevraagd te adviseren met betrekking tot mogelijkheden om deze schades in de toekomst te voorkomen.

Dit onderzoek richt zich op de mogelijkheden om maatregelen aan gebouwen te treffen. Mogelijk maatregelen aan de vliegtuigen of de landingsbaan zijn onderzocht door NLR [NLR, 2018] en TO70 [TO70, 2021], en maken geen onderdeel uit van de scope van dit onderzoek.

In dit rapport wordt in hoofdstuk 2 op basis van beschikbare literatuur besproken welke belasting er kan worden uitgeoefend op de dakbedekking ten gevolge van vliegtuigwervels, en in welk gebied deze belasting kan optreden. Dakpannen moeten bestand zijn tegen een belasting door de wind. Deze belasting wordt vergeleken met de belasting door vliegtuigwervels om een uitspraak te kunnen doen over de benodigde weerstand van dakbedekkingen tegen vliegtuigwervels.

Hoofdstuk 3 geeft een overzicht van de schades die zijn opgetreden in de periode 2018 – 2021, op basis van informatie die door MAA is aangeleverd.

Hoofdstuk 4 bespreekt oplossingen die mogelijk zijn om dakpannen te verankeren op daken. Daarnaast wordt een invloedgebied gedefinieerd waarbinnen sprake is van een risico op schades aan hellende daken, gegeven de waargenomen schades.

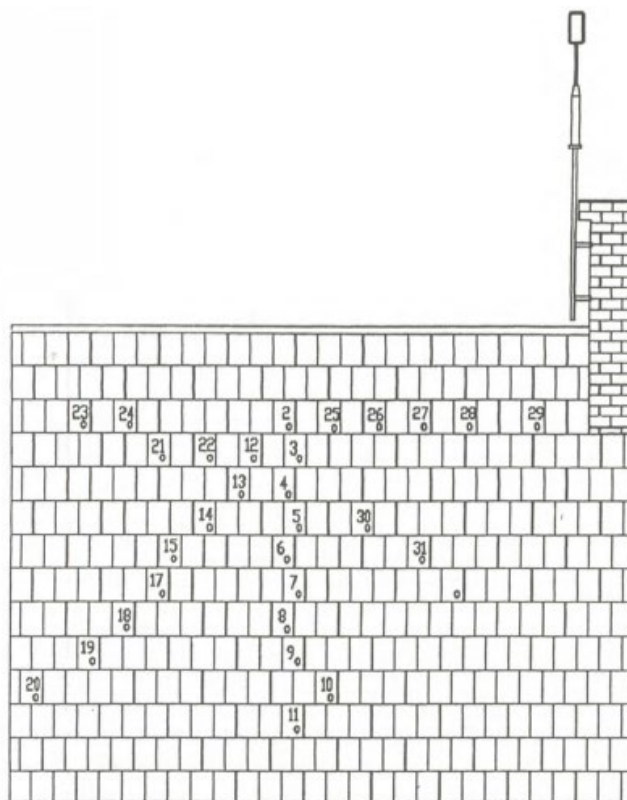
Hoofdstuk 5 geeft een overzicht van de belangrijkste conclusies en doet aanbevelingen voor mogelijke vervolgstappen.

2 Belasting op daken

Wervels (vortices) afkomstig van vliegtuigvleugels kunnen resulteren in een belasting op daken van gebouwen in de nabijheid van vliegvelden. In sommige gevallen kan dit resulteren in schade aan de dakbedekking. Het fenomeen dat hiervoor zorgt is onder meer beschreven in eerdere rapporten van NLR en T070 [NLR, 2018], [T070, 2021], en wordt in dit rapport niet omschreven. Om de schade te kunnen duiden en om tot aanbevelingen voor maatregelen te komen, is het van belang te weten hoe groot de optredende krachten zijn op de dakbedekkingen. Deze krachten zijn het gevolg van een drukverschil over de dakbedekking. Deze wordt in dit hoofdstuk beschreven, en vervolgens vergeleken met de drukverschillen die als gevolg van stormen kunnen worden verwacht.

2.1 Drukken ten gevolge van vortexbelasting

Voor de belastingen op daken door vortices als gevolg van vliegtuigen is onderzoek beschikbaar uit de jaren '90 [Blackmore, 1994]. In dit onderzoek zijn drukverschillen over de dakbedekking gemeten aan 1 huis op ongeveer 1,4 km in het verlengde van een landingsbaan van Heathrow Airport. Deze metingen zijn uitgevoerd over een periode van 12 maanden. Voor zover bekend is dit het enige onderzoek waarbij de drukken op een dakbedekking als gevolg van vliegtuigwervels zijn gemeten.



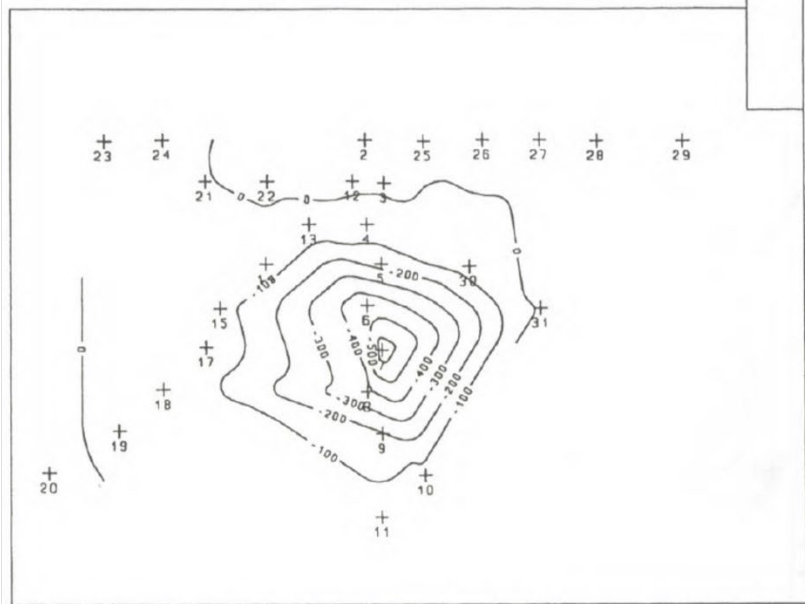
Figuur 1 Drukpunten op het dak van het huis uit het onderzoek van Blackmore [1994].

In het onderzoek werden drukverschillen gemeten over 30 pannen (zie Figuur 1) op het dakvlak aan de zijde van de landingsbaan. Voor de details over de opzet en uitvoering van het experiment wordt verwezen naar het betreffende artikel van Blackmore [1994]. Deze drukverschillen worden in dit rapport kortweg met *druk* aangeduid. Een resulterende belasting van het dakvlak af gericht (zuiging) wordt met een negatieve waarde voor de druk aangeduid. Zuiging is bepalend voor het optreden van schade aan dakpannen.

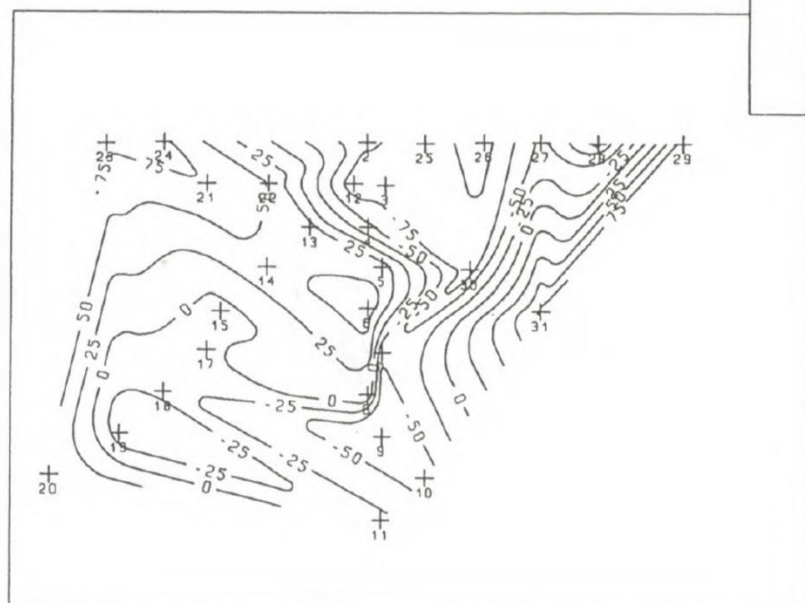
De belangrijkste bevindingen uit de metingen door Blackmore [1994] zijn:

- Er zijn twee type belastingen ten gevolge van vliegtuigwervels te onderscheiden (voorbeelden van beide typen zijn weergegeven in Figuur 2):
 - Type 1: Een lokale, intense zuiging die wordt veroorzaakt door een wervel met een gestructureerde circulaire stroming rond een enkele kern.
 - Type 2: Een meer verdeelde chaotische belasting die zowel als druk of zuiging op het dak werkt, en lijkt te worden veroorzaakt door meerdere in elkaar gerolde wervels.
- De type 1 wervel zorgt voor hoge belastingen meestal tussen de -200 en -700 Pa. Er is 1 waarneming van -1190 Pa. Dit type wervelbelasting komt echter weinig voor; minder dan 5% van de gemeten wervelbelastingen was van dit type en 6 gemeten belastingen waren lager (leidend tot hogere belastingen) dan -500 Pa.
- De type 2 wervel resulteert in belastingen tussen -150 en +150 Pa, en was in het onderzoek verantwoordelijk voor meer dan 95% van de wervelstoten op het dak. Vanwege de lage belastingen is het type 2 wervel volgens Blackmore [1994] niet van belang voor het ontwerp van daken en niet kritisch voor de bevestiging van dakbedekkingen.
- De grootste piekdruk van een type 1 wervel treedt lokaal en over zeer korte duur op. Daarbij verplaatst de piekbelasting zich in de tijd over het dak. Deze eigenschappen worden geïllustreerd in Figuur 2(a) en Figuur 3, figuren die overgenomen zijn uit het artikel van Blackmore.
 - Over een duur van 0,2 s neemt de piekdruk af van -220 Pa naar -1190 Pa, en in de daarop volgende 0,2 s neemt deze weer toe tot ongeveer -400 Pa.
 - De wervelbelasting verplaatst zich van de nok naar beneden over de hoogte van het dak met een snelheid van ongeveer 2 tot 5 m/s.
 - De grootste piekdruk treedt op als de wervel zich ongeveer één werveldiameter of meer heeft verplaatst over het dak, dus niet bij de randen maar meer in het midden van het dakvlak.
 - Het oppervlak waarbinnen de belasting volgens Blackmore [1994] voldoende laag is (lager dan -540 Pa is aangehouden in het geciteerde onderzoek) om een niet-verankerde dakpan los te trekken varieert voor het type 1 wervel tussen 0,03 en 0,24 m².

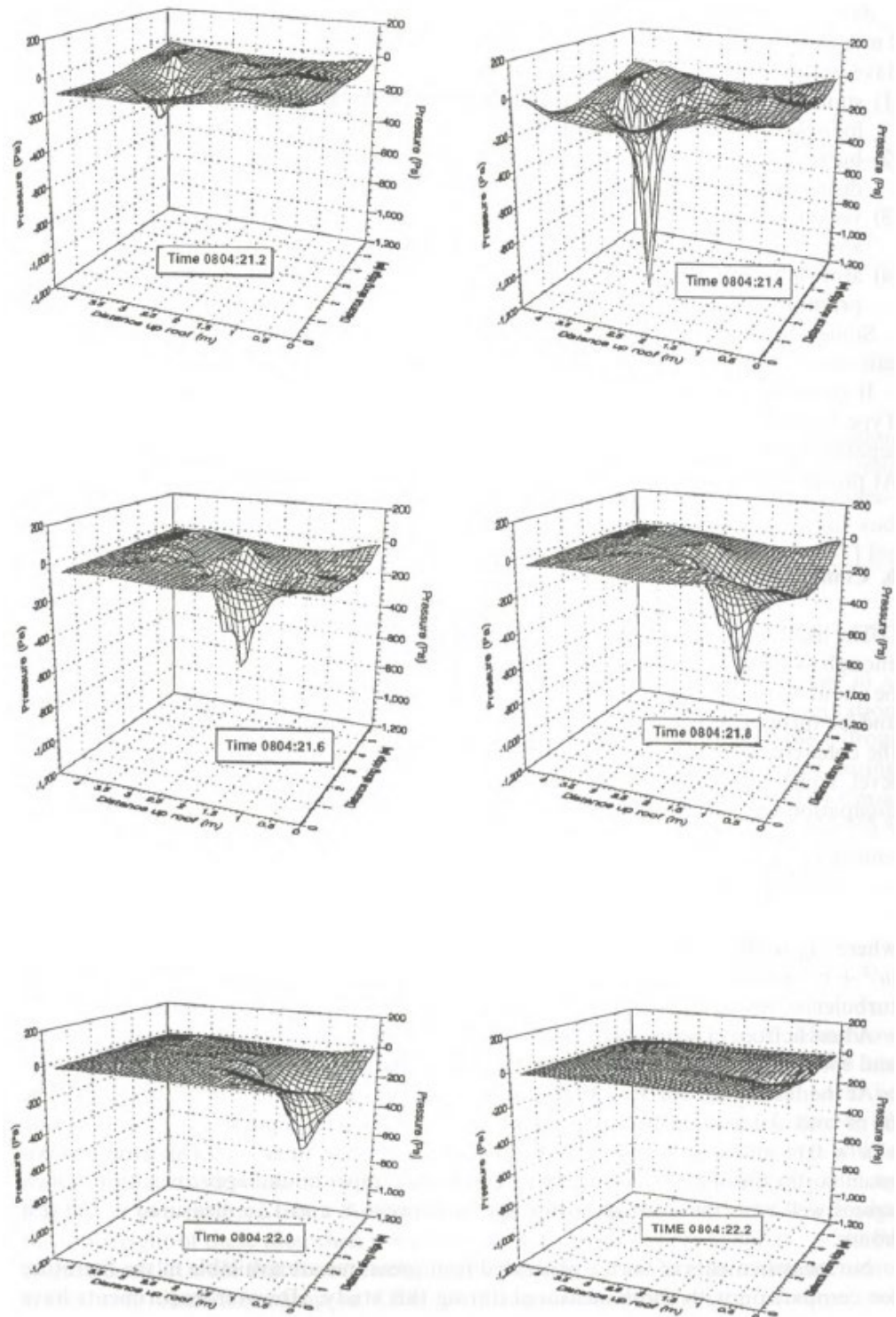
(a) Type 1



(b) Type 2



Figuur 2 Voorbeelden van gemeten piekdrukverdeling voor de twee typen vliegtuigwervels: (a) type 1 en (b) type 2 op de locaties in figuur 1. Overgenomen van Blackmore [1994].



Figuur 3 3D weergave van de drukverdeling in de tijd van een type 1 wervel. Overgenomen van Blackmore [1994].

Op basis van het onderzoek van Blackmore [1994] heeft BRE de richtlijn Digest 467 [BRE, 2002] uitgebracht. De belangrijkste opmerkingen uit deze richtlijn zijn:

- De type 2 wervel (type 1 genoemd in Digest 467) wordt niet verwaarloosbaar geacht voor dakbedekkingen en kan in belastingen tussen -200 en +200 Pa resulteren (aanpassing van de ± 150 Pa in Blackmore [1994]).
- De metingen door Blackmore [1994] zijn uitgevoerd op een dak zonder onderdak (dat is een dak waarbij onder de dakpannen geen dakbeschot aanwezig is, ofwel vanaf de zolder kun je rechtstreeks de dakpannen zien). Volgens Digest 467 [2002] is het aannemelijk dat de belastingen op een dak met onderdak lager zijn doordat de druk over de dakbedekking zich makkelijker kan vereffenen. Bij een windbelasting is de effectieve belasting door deze drukvereffening lager. In hoeverre dit ook het geval zal zijn voor een wervelbelasting is onbekend. Uit de gerapporteerde schadegevallen rond MAA (zie hoofdstuk 3) blijkt dat deze zijn opgetreden bij daken met onderdak zowel als bij daken zonder onderdak,
- Op basis van het onderzoek van [Blackmore, 1994], beveelt BRE Digest 467 [BRE, 2002] aan om rekening te houden met een ontwerpdruk van -1200 N/m^2 voor de belasting ten gevolge van vliegtuigwervels. Deze belasting geldt voor alle lei- of pannendaken op afstanden vanaf 1 km vanaf het landingspunt op de landingsbaan, en is van toepassing op een oppervlakte op het dak met een diameter van orde grootte $0,5 \text{ m}$ ($0,2 \text{ m}^2$).

Naar aanleiding van de studie voor MAA heeft TNO contact gezocht met Paul Blackmore. Hij heeft in persoonlijk contact met TNO aangegeven dat in Engeland nu wordt overwogen een extra veiligheidsfactor van 1,5 te hanteren, bovenop de waarde van 1200 N/m^2 , om te verrekenen dat vliegtuigen de afgelopen decennia groter en zwaarder zijn geworden. Deze waarde is vooralsnog niet gevalideerd met meetdata.

Op basis van de bevindingen uit Blackmore [1994] en BRE Digest 467 [BRE, 2002] worden de volgende conclusies getrokken:

- Een vortexbelasting (type 1) is anders dan een ontwerpwindvlaagbelasting in de zin dat het:
 - om kleinere oppervlaktes gaat waarvoor de ontwerpbelasting van toepassing is ($\sim 0,2 \text{ m}^2$ versus 1 m^2);
 - van veel kortere duur is ($\sim 0,2 \text{ s}$ versus 3 s);
 - de vortexbelasting zich over het dak verplaatst en de grootste belasting meestal in het midden van het dak optreedt (dit in tegenstelling tot een windbelasting die het grootst is in de buurt van de dakranden en rond uitsteeksels op het dak).
- Voor daken op een afstand van 1 km vanaf het landingspunt op de landingsbaan is een ontwerpdruk van -1200 N/m^2 voor een oppervlak van $0,2 \text{ m}^2$ van toepassing. Hierbij kan een veiligheidsfactor van 1,5 worden toegepast. Voor kleinere afstanden is geen informatie beschikbaar.
- Voor daken met een onderdak is mogelijk een lagere belasting van toepassing vanwege drukvereffening. Hier is echter geen onderzoek van gevonden. Alleen door metingen aan een dak met onderdak is deze invloed te bepalen.

Het onderzoek van Blackmore [1994] en de op basis daarvan opgestelde BRE Digest 467 [2002] hebben de volgende beperkingen:

- Blackmore [1994] heeft metingen uitgevoerd over een periode van 1 jaar aan 1 dak. De hoogst gemeten waarde van -1190 Pa is als uitgangspunt genomen voor de ontwerpdruk in de Digest 467 [BRE, 2002]. Er ligt geen statistische analyse ten grondslag aan deze ontwerpwaarde. Er is geen relatie gelegd met de achtergronden bij de betrouwbaarheid van dakbedekkingen.
- De metingen door Blackmore [1994] zijn uitgevoerd op een dak op een afstand van 1,4 km van de landingsbaan. De resultaten zijn volgens BRE Digest 467 [2002] van toepassing vanaf 1 km van het landingspunt op de landingsbaan. Er worden geen uitspraken gedaan over de belasting ten gevolge van wervels op gebouwen op minder dan 1 km afstand.
- Het onderzoek van Blackmore [1994] benoemt niet voor welke type vliegtuigen de gemeten drukken zijn opgetreden. BRE Digest 467 [2002] geeft aan dat een verhoogde ontwerpdruk moet worden overwogen voor luchthavens met uitzonderlijk risico, uitzonderlijke vliegtuigtypes of uitzonderlijke bedrijfsomstandigheden (in overleg met de luchthaven of de lokale overheid). Er wordt niet omschreven wat hier precies onder wordt verstaan.
- Het onderzoek van Blackmore geeft geen informatie over de aanvliegroute van de vliegtuigen waarbij de metingen zijn uitgevoerd.

Blackmore heeft aan TNO aanvullende informatie verstrekt over de meetcampagne bij Heathrow. De B747 toestellen gaven de grootste krachten op de dakbedekking. Andere toestellen (B737, B757, Airbus 300 en ook de Concorde) leidden tot (veel) lagere drukken op de dakpannen.

2.2 Windbelasting op dakbedekkingen

De krachten die als gevolg van de wind moeten worden weerstaan door dakbedekkingen worden bepaald aan de hand van de bouwregelgeving (aangestuurd via het Bouwbesluit). Voor dakbedekkingen moet worden aangetoond dat deze voldoende bestand zijn tegen deze belastingen.

Sinds in 1992 het Bouwbesluit van kracht is in Nederland wordt verwezen naar NEN 6707 [NEN, 2019a] (bevestiging van dakbedekkingen), waarin regels staan voor de bevestiging van dakbedekkingen. Deze regels zijn in NPR 6708 [NEN, 2019b] vertaald naar vereenvoudigde rekenmodellen en praktijkrichtlijnen.

Bij toepassing van NPR 6708 voor gebouwen in Meerssen en Beek gelden de volgende uitgangspunten:

- Zuid Limburg ligt in windgebied III.
- We rekenen in NPR 6708 met onbebouwd gebied. Dit is in veel gevallen in de praktijk een veilige aanname. Als hieraan wordt voldaan voldoen ook de daken in bebouwd gebied. Omdat veel woningen in het gebied waar schades zijn opgetreden in bebouwd gebied liggen, wordt in dit rapport ook de vergelijking met bebouwd gebied gemaakt.
- We gaan uit van hellende daken met dakpannen (gezien de aard van de gerapporteerde schades ten gevolge van vliegtuigen, zie hoofdstuk 3). NPR 6708 geeft ook regels voor platte daken, maar deze worden in dit rapport niet behandeld.
- De dakhelling is tussen 25 en 55 graden.

- Zowel daken met, als daken zonder luchtdicht onderdak worden beschouwd.
- Als nokhoogte (referentiehoogte) wordt een interval tussen 8 en 20 meter gekozen. Dit interval omvat de gerapporteerde schadegevallen, en ook de hoogte van het grootste deel van de aanwezige huizen in het gebied waar de schades zijn opgetreden.

De belasting door wind wordt in een druk (N/m^2 , $1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ Pa}$ uitgedrukt. In Tabel 1 en Tabel 2 is weergegeven welke ontwerpwaarde voor de druk als gevolg van wind op hellende daken op basis van de genoemde uitgangspunten moet worden weerstaan. Deze drukken betreffen alle zuiging op de dakpannen (de resulterende kracht is van het dak af gericht).

Tabel 1: Ontwerpwaarde voor de belasting op dakpannen voor onbebouwd gebied

Onbebouwd gebied	Gesloten onderdak (in N/m²)			Open onderdak (in N/m²)		
Hoogte (m)	Rand	Midden	Nok	Rand	Midden	Nok
8	832	325	501	2256	1593	1593
10	896	350	539	2429	1715	1715
15	1024	400	616	2776	1960	1960
20	1126	440	678	3054	2156	2156

Tabel 2: Ontwerpwaarde voor de belasting op dakpannen voor bebouwd gebied

Bebouwd gebied	Gesloten onderdak (in N/m²)			Open onderdak (in N/m²)		
Hoogte (m)	Rand	Midden	Nok	Rand	Midden	Nok
8	653	255	393	1770	1250	1250
10	717	280	431	1943	1372	1372
15	845	330	508	2290	1617	1617
20	947	370	570	2568	1813	1813

De hoogste belastingen treden op bij daken met een open onderdak (de waarden in de grijs gemarkeerde cellen). De gevonden waarden zijn in de hier uitgewerkte gevallen bij open onderdaken alle hoger dan 1200 N/m^2 . Dit betekent dat dakbedekkingen met open onderdak die met NEN 6707 zijn ontworpen met een nokhoogte groter dan 8 m in staat moeten zijn een zuigbelasting van -1200 N/m^2 te weerstaan. Opgemerkt wordt dat daken zonder onderdak vaak relatief oud zijn, en destijds niet werden berekend op windbelasting, en derhalve vaak niet zijn voorzien van aanvullende verankering. Deze oudere daken zijn waarschijnlijk zeer gevoelig voor vortexbelasting.

Voor de daken met gesloten onderdak geldt dat in alle gevallen de gevonden waarden kleiner zijn dan -1200 N/m^2 . De op te nemen windbelasting is het kleinste in de middenzone van het dak. Dit betekent dat deze dakbedekkingen als deze precies aan de eisen van NEN 6707 voldoen een zuigbelasting van -1200 N/m^2 niet kunnen weerstaan.

Verreweg de meeste daken worden in Nederland gebouwd met een dakbeschot en isolatie, wat een gesloten onderdak vormt. Daken met open onderdak komen

doorgaans alleen voor bij oudere gebouwen. Deze oudere gebouwen zijn vaak al gerealiseerd voor de introductie van de regelgeving voor het verankeren van dakpannen, en in die gevallen zal er niet gerekend zijn aan de weerstand van de dakbedekking.

3 Waarnemingen van schades

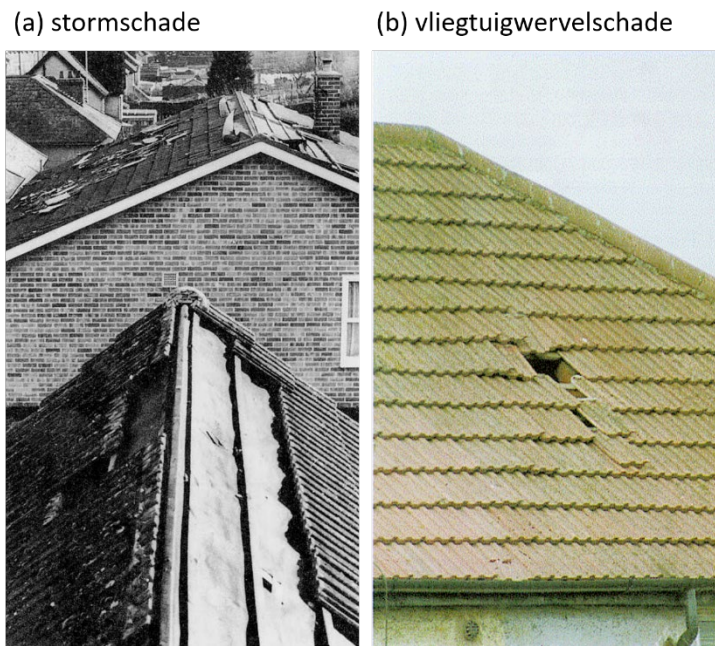
Door MAA is informatie ter beschikking gesteld van de gemelde schades rondom het vliegveld in de periode 2018-2021. Deze informatie is door TNO beschouwd om na te gaan in hoeverre er specifieke situaties zijn te onderscheiden die gevoelig zijn voor schades. Allereerst is nagegaan of er in beschikbare (internationale) literatuur gegevens zijn te vinden die voor de analyse van de schades van belang zijn.

3.1 Schadewaarnemingen in literatuur

Er is in de wetenschappelijke literatuur, behalve het onderzoek van Blackmore [1994], geen informatie gevonden over waarnemingen van schades. Informatie over schades bij andere luchthavens betreft informatie die via media op internet terug te vinden is. In die berichten is weinig specifieke informatie beschikbaar over de omstandigheden waaronder eventuele schades zijn opgetreden. Het beeld ontstaat dat schades exclusief optreden aan dakpannen en leien, en dat deze schadegevallen vaak optreden bij relatief rustig weer (gemiddelde windsnelheid lager dan 10 m/s). Dakpannen en leien zijn relatief kleine bouwproducten en deze passen in de afmetingen die door BRE zijn benoemd (schades aan elementen van < 0,5 m²).

In Blackmore [1994] en Digest 467 [BRE, 2002] worden de volgende bevindingen gedaan met betrekking tot waarnemingen van schades door vliegtuigwervels en door een windbelasting:

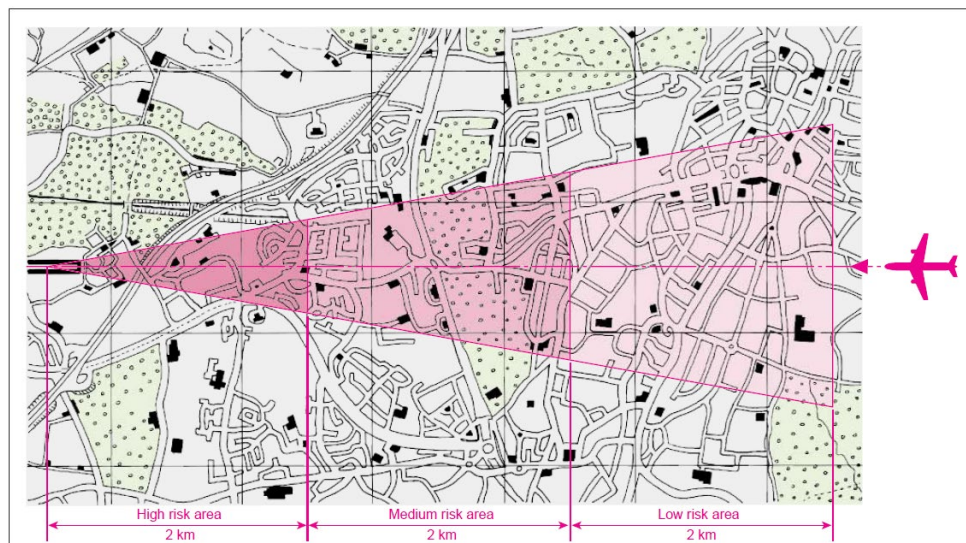
- Van de 714 schades waargenomen door Blackmore [1994] tussen januari 1989 en maart 1991, trad er maar 1 op bij een gemiddelde windsnelheid groter dan 10 m/s. Het grootste deel van de schades (~70%) werd waargenomen bij gemiddelde windsnelheden lager dan 5 m/s.
- Het schadebeeld op daken bij een vliegtuigwervelbelasting wijkt af van de schade die over meestal wordt geobserveerd na een storm (zie Figuur 4):
 - Stormschade treedt over het algemeen op nabij de randen en de nok van een dak over een relatief groot oppervlak.
 - Wervelschade treedt meestal op in het midden van het dak over een klein rond oppervlak, of over een langgerekte smalle strook die meestal diagonaal over het dak loopt.
- Over het algemeen zijn meerdere dichtbij elkaar gelegen gebouwen in een gebied beschadigd na een storm. In het geval van wervelschade zijn het meestal een beperkt aantal gebouwen enigszins willekeurig verdeeld over een gebied (uitgaande van meerdere vliegtuiglandingen over een bepaalde periode).
- Over het algemeen treden vliegtuigwervelschades op in de zomerperiode, terwijl stormschades meestal optreden in de herfst en winter.



Figuur 4 Typische schadebeelden voor (a) een storm en (b) een vliegtuigwervel. Afkomstig uit Digest 467 [BRE, 2002].

Met betrekking tot het gebied waar schade kan worden verwacht aan dakbedekkingen zijn de volgende bevindingen gedaan:

- Volgens Digest 467 [2002] kan schade optreden binnen een gebied van ongeveer $\pm 10^\circ$ aan beide zijden van de aanvliegroute van landende vliegtuigen, en strekt dit zich uit tot 6 km van het landingspunt op de baan. Dit gebied is weergegeven in Figuur 5.
- De grootste kans op schade is volgens BRE Digest 467 [BRE, 2002] in de 2 km die het meest nabij het landingspunt liggen. Volgens Digest 467 zorgden ongeveer 0,2% van de vliegtuigbewegingen in het onderzoek van Blackmore [1994] voor schade; 80% van deze schadegevallen traden op in het hoge risico gebied.
- De kans op schade bij het opstijgen is volgens Digest 467 [BRE, 2002] laag. In het onderzoek van Blackmore [1994] waren er onvoldoende gegevens om de grootte van het risicogebied bij het opstijgen te definiëren. Het gebied zal volgens Digest 467 echter veel kleiner zijn dan bij de landing vanwege de steile hellingshoek van het vliegtuig. Het gebied waar een kans bestaat op schade aan dakbedekkingen wordt dus bepaald door landende vliegtuigen.



Figuur 5 Risicogebieden voor vortexschade. Afkomstig uit BRE Digest 467 [2002].

3.2 Schades rondom MAA

Van de schades rondom MAA is een overzicht gemaakt van de meldingen vanaf 2018 tot heden, waarbij informatie over de schades (foto's, eigenschappen gebouw, etc.) is verzameld. Hierbij is onder meer gekeken naar de oriëntatie van het dakvlak ten opzichte van de baan van het vliegtuig, naar de relatie met het type vliegtuig, en de weersomstandigheden.

Deze informatie is door TNO beschouwd en uit de waarnemingen volgt:

- Alle schadegevallen zijn opgetreden aan hellende daken gedekt met dakpannen.
- Er is geen eenduidig onderscheid te maken naar het dakvlak waarbij de schades optreden.
- Schades treden zowel op bij daken met als daken zonder onderdak.
- In de meeste gevallen is sprake van enkele dakpannen die zijn losgeraakt. In één geval is sprake van twee grote oppervlaktes van pannen die zijn losgekomen. Dit betreft een oud gebouw met een dak zonder onderdak.
- Vrijwel alle schades betreffen dakpannen die niet zijn verankerd. Er is één schade bij een verankerde dakbedekking opgetreden. Hier is waarschijnlijk sprake van een verankering waarbij elke vierde pan is verankerd. Bij toepassing van de normen voor verankering volgt dat een dergelijke verankering weinig tot geen effect heeft om schades te voorkomen.
- Er was vrijwel altijd sprake van weinig wind (rustig weer).

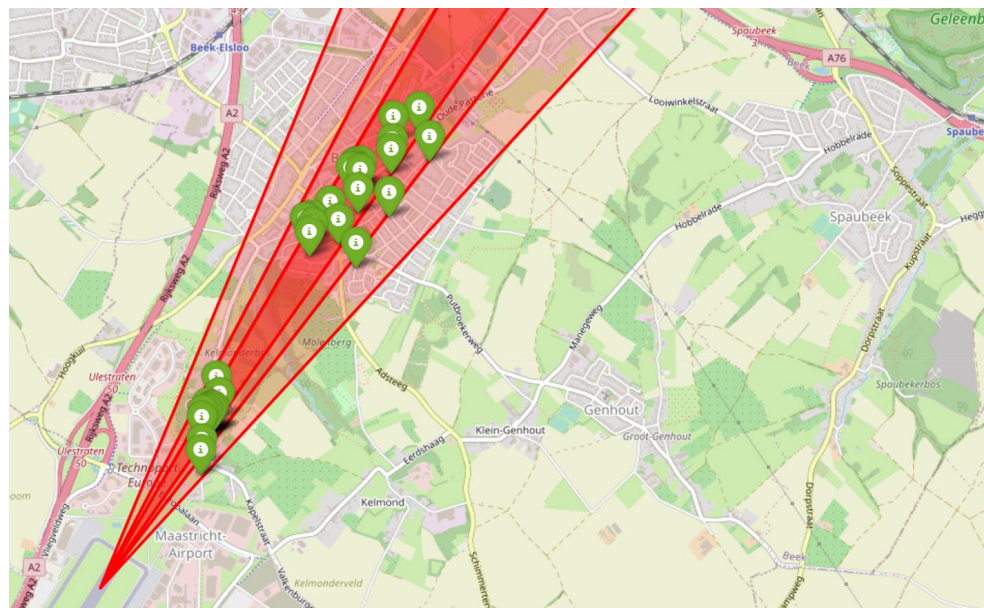
De schades zijn waargenomen in het gebied wat is weergegeven in bijgaande figuren. In Figuur 6 en Figuur 7 is de door MAA beschikbare gestelde zone weergegeven waarbinnen de vliegtuigen landen (de ILS zone). Deze zone wordt bepaald door het verlengde van de landingsbaan +/- 2,5 graden en is donkerrood weergegeven. Daarnaast is een iets grotere zone weergegeven (+/- 5 graden, middenrood), waarin de meeste (doch niet alle) schades worden gevonden. De schadegevallen die buiten dit gebied vallen liggen in Beek. Deze gevallen liggen allemaal ten zuidoosten van dit gebied in de lichtrode zone (+/- 10 graden). Alle schadegevallen liggen binnen de +/- 10 graden contour die wordt gegeven door

BRE Digest 467 [BRE, 2002]. In het noorden (Geverik en Beek) komen de schades voor tot een afstand van ongeveer 3600 meter vanaf de drempel, in het zuiden (Meerssen) tot ongeveer 2000 meter vanaf de drempel.

Er zijn meer schades uit Geverik en Beek gerapporteerd dan uit Meerssen. Het verschil in aantal schades kan onder meer zijn bepaald door:

- Het aantal vliegbewegingen (er landen meer vliegtuigen vanuit het noorden);
- Het aantal gebouwen met hellend dak onder de aanvliegroute (het aantal huizen in het invloedgebied is groter in Beek dan in Meerssen);
- Het hoogteprofiel van de landende vliegtuigen (vanuit het zuiden is een steiler profiel van kracht dan vanuit het noorden, wat waarschijnlijk een reden is dat het gebied in Meerssen kleiner is dan in Beek);
- De topografie rondom het vliegveld, dat hoger ligt dan de omliggende dorpen.
- Daarnaast kan de bouwkundige staat van de daken een rol spelen. Onduidelijk is of daar verschillen waar te nemen zijn tussen Beek en Meerssen;
- Daarnaast zijn er mogelijke factoren die te maken hebben met de eigenschappen van de vliegtuigen tijdens de landing. Deze zijn in het rapport van TO70 behandeld [TO70, 2021].

Er is op basis van de beschikbare gegevens geen eenduidige relatie vast te stellen tussen deze mogelijk invloedfactoren en de opgetreden schades.



Figuur 6 Aanduiding van adressen met schades in Beek/Geerik (periode 2018-2021), donkerrode zone: ILS zone. Overige lijnen begrenzing van gebied +/- 5 graden (middenrood) en +/- 10 graden (lichtrood) ten opzichte van verlengde van de landingsbaan.



Figuur 7 Aanduiding van adressen met schades in Meerssen (periode 2018-2021), donkerrode zone: ILS zone. Overige lijnen begrenzing van gebied +/- 5 graden (middenrood) en +/- 10 graden (lichtrood) ten opzichte van verlengde van de landingsbaan.

4 Oplossingsrichtingen

Naar aanleiding van de in hoofdstuk 2 en 3 beschreven achtergronden is de vraag welke mogelijkheden er zijn om ervoor te zorgen dat dakbedekkingen voldoende bestand zijn tegen de vortexbelastingen. Hiervoor wordt in dit hoofdstuk een beschouwing gegeven van de methode waarmee de benodigde verankering van de dakpannen kan worden vastgesteld en uitgevoerd. Tevens wordt ingegaan op het gebied waarvoor deze maatregel van toepassing kan zijn. Oplossingsrichtingen die te maken hebben met het vliegverkeer zijn in dit rapport niet beschouwd.

4.1 In rekening te brengen belasting

Uitgangspunt voor de aan te houden belasting is de belasting die in Digest 467 [BRE, 2002] wordt geadviseerd, vermenigvuldigd met een veiligheidsfactor. Er wordt in de UK thans een factor van 1,5 voorgesteld, die toegepast wordt op de waarde van 1200 N/m². De ontwerpwaarde voor de belasting is daarmee 1800 N/m².

In hoofdstuk 2 was reeds beschreven dat de waarde van 1200 N/m² is vastgesteld voor daken zonder onderdak, en dat geen meetgegevens voor daken met onderdak beschikbaar zijn. Aangenomen wordt dat in dat geval de resulterende druk op de pannen kleiner is vanwege het effect van drukvereffening in de luchtlaag tussen onderdak en dakpan. Echter zonder meetgegevens is geen inschatting te geven van de optredende belasting bij gesloten onderdaken en wordt de hier aangehouden waarde van 1800 N/m² als veilig beschouwd.

4.2 Verankeringsberekening

De weerstand van de pannen wordt bepaald door het eigen gewicht (rekening houdend met de dakhelling; bij een steiler dak is deze weerstand minder dan bij een flauwe helling), en door de rekenwaarde van de sterkte van een mechanische verankering (panhaken, nagels en/of schroeven). Om deze rekenwaarde vast te stellen wordt in NEN 6707 [NEN, 2019a] naar de Europese testmethode verwezen die eind jaren '90 bij TNO is ontwikkeld en nu is beschreven in EN 14437 [NEN, 2020]. Deze testmethode wordt door de industrie gebruikt om hun producten te voorzien van een rekenwaarde. Per combinatie van dakpan en bevestigingsmiddel wordt een andere waarde gevonden.

Daarnaast speelt ook het verankeringspatroon een rol. Geadviseerd wordt een dambordsgewijze verankering (de pannen worden om en om verankerd) of een volledige verankering (ieder pan wordt verankerd) te gebruiken. De weerstand per m² wordt bepaald door de rekenwaarde van de haak te vermenigvuldigen met het aantal haken per m², wat weer afhangt van de grootte van de pannen en van het verankeringspatroon.

Het benodigde type en aantal verankeringen is afhankelijk van de gebruikte dakpannen, de dakhelling en de gebouwhoogte. Aanbevolen wordt om per dak dat versterkt moet worden een specifieke berekening uit te voeren, rekening houdend met type dakpan, dakhelling en eigenschappen van de bevestigingselementen. Een voorbeeldberekening is als volgt:

- 1: De te behalen weerstand van dakpannen is 1800 N/m² als gevolg van vliegverkeer, uitgaande van de eis uit de UK, inclusief de voorgestelde veiligheidsfactor.
- 2: De weerstand als gevolg van eigen gewicht is 450 N/m² (dit is orde van grootte de weerstand van keramische pannen, betonpannen zijn iets zwaarder en geven dus meer weerstand).
- 3: Het aantal pannen per m² is 15 (in praktijk is dit tussen 10 en 20, afhankelijk van de grootte van de dakpan).

Dit betekent dat in dit voorbeeld de benodigde sterkte van een aanvullende verankering ten minste 1350 N/m² is, ofwel 90 N per pan.

Dit betekent dat als alle dakpannen worden verankerd met panhaken met een uittrekwaarde van 90 N of meer de vereiste weerstand wordt behaald. Voor veel dakpantypen zijn dergelijke haken op de markt. Als blijkt dat met de beschikbare panhaken de vereiste sterkte niet wordt bereikt, zullen de pannen aanvullend ook met schroeven in de panlat moeten worden bevestigd. Deze schroeven kunnen dambordsgewijs worden aangebracht (met tegelijk de panhaken volledig bevestigd).

Indien niet bekend is welke sterkte een bepaalde combinatie van dakpan en bevestiging heeft, wordt aanbevolen eerst een test uit te voeren conform de Europese beproevingsmethode beschreven in EN14437.

Dergelijke specifieke berekeningen kunnen door dakdekkersbedrijven of de leveranciers van pannen en bevestigingsmaterialen per project worden gemaakt, waarbij als op te nemen belasting de waarde 1800 N/m² wordt gespecificeerd in plaats van de normaal gesproken aan te houden windbelasting.

4.3 Invloedgebied

Om de risico's te bepalen en vervolgens mogelijke maatregelen vast te stellen is van belang wat het invloedgebied is waarbinnen schades kunnen worden verwacht. Op basis van de waargenomen schades in de periode vanaf 2018 wordt de volgende beschrijving van het invloedgebied gegeven:

- Meerssen

Het gebied dat wordt begrensd door de +/- 5 graden contour in figuur 3, tussen het sportpark Marsana en de Burgemeester Kisselsstraat.

-Geverik

Het gebied tussen de aansluiting Geverikerstraat en Daalstraat, de Mariakapel en de grens met het terrein van MAA.

-Beek

Het gebied tussen sportpark de Carmel en ten noordwesten van kasteel Genbroek, begrensd door de 2,5 graden contour aan westkant uit figuur 2, en een 7,5 graden contour aan oostkant.

Dit voorgestelde gebied is ongeveer de helft van het gebied dat eerder door NLR werd voorgesteld. Het gebied komt min of meer overeen met het door TO70 aangeduide 'best fit' gebied voor de waargenomen schades.

Het aantal panden dat deze gebieden omvat is door TNO niet vastgesteld.

Er is geen onderscheid te maken in laag, middel of hoog risico zoals dat in de BRE Digest (zie figuur 5) is vastgesteld, gezien de verdeling van de waargenomen schades over deze gebieden.

5 Conclusies en aanbevelingen

Dit hoofdstuk geeft de belangrijkste conclusies en doet aanbevelingen voor nader onderzoek.

5.1 Conclusies

De volgende conclusies worden getrokken op basis van de literatuurstudie en de schadewaarnemingen rond Maastricht Aachen Airport:

- Een vortexbelasting is anders dan een ontwerpwindvlaagbelasting in de zin dat het:
 - om kleinere oppervlaktes gaat waarvoor de ontwerpbelasting van toepassing is ($\sim 0,2 \text{ m}^2$ versus 1 m^2);
 - van veel kortere duur is ($\sim 0,2 \text{ s}$ versus 3 s);
 - de belasting zich over het dak verplaatst en de grootste belasting meestal in het midden van het dak optreedt (een windbelasting is het grootst in de buurt van de dakranden en rond uitsteeksels op het dak).
- De drukken die optreden kunnen groter zijn dan de drukken die als gevolg van de windbelasting kunnen optreden. Voor daken op een afstand vanaf 1 km van vanaf het landingspunt op de landingsbaan is een ontwerpdruk van -1200 N/m^2 voor een oppervlak van $0,2 \text{ m}^2$ van toepassing. Hierbij kan een veiligheidsfactor van 1,5 worden toegepast. Voor kleinere afstanden is geen informatie beschikbaar.
- Voor daken met een onderdak is mogelijk een lagere belasting van toepassing vanwege drukvereffening. Hier is echter geen onderzoek van gevonden. Alleen door metingen aan een dak met onderdak is deze invloed te bepalen.
- Schades treden op aan dakpannen en leien voornamelijk als gevolg van landend vliegverkeer. Er zijn voor zover bekend geen schades als gevolg van stijgend vliegverkeer.
- Er is geen duidelijk onderscheid waar te nemen tussen de schades aan de dakpannen als het gaat om dakeigenschappen zoals dakhelling of oriëntatie.
- Een dakbedekking zonder onderdak heeft tot grotere schades geleid dan dakbedekkingen met een gesloten onderdak. Deze laatste situatie komt veel meer voor.
- Er is een gebied benoemd wat op basis van de gerapporteerde schades als risicogebied kan worden aangemerkt.

5.2 Aanbevelingen

Om schades aan dakpannen in de toekomst te voorkomen is verankering van de dakpannen in het invloedsgebied een effectieve maatregel. Gezien de grootte van het bepaalde invloedsgebied in Meerssen, Beek en Geverik is het zinvol nader onderzoek te doen naar de optredende drukken die binnen het gebied optreden. Omdat in Nederland vooral daken met gesloten onderdaken aanwezig zijn, is het uitgaan van de door BRE gemeten waarden waarschijnlijk behoorlijk aan de veilige kant. Dit kan betekenen dat te zware maatregelen worden voorgesteld.

Indien de drukken op de dakbedekking specifiek worden vastgesteld voor de situatie rond Maastricht Aachen Airport kan dit mogelijk effect hebben op de maatregelen, zoals:

- Mogelijk dat daken die reeds verankeringen hebben niet hoeven worden versterkt.
- Minder verankeringen nodig (bijvoorbeeld dambordsgewijs in plaats van volledig).
- Minder complexe uitvoering van de verankering (standaard haken in plaats van schroeven)

Daken die zijn ontworpen en gebouwd voor de invoering van de regelgeving voor verankeringen (voor 1992) zijn waarschijnlijk gevoeliger voor vortexbelastingen. Bijzonder gevoelig zijn de oudere daken zonder onderdak. Overwogen kan worden eerst in kaart te brengen welke oudere daken er in de gedefinieerde risicogebieden aanwezig zijn, en welke daarvan zonder onderdak zijn uitgevoerd, om daar als eerste maatregelen te treffen.

MAA overweegt als maatregel om zonnepanelen aan te brengen op daken als maatregel om schade te voorkomen. De effectiviteit van een dergelijke maatregel moet daarvoor eerst vastgesteld worden. Hiervoor zou moeten worden nagegaan of het aanbrengen van zonne-energiesystemen kan helpen de belasting op dakbedekkingen ten gevolge van vliegtuigwervels te reduceren zonder schade aan de zonne-energiesystemen zelf. Aangezien er geen gegevens beschikbaar zijn van het effect van zonnepanelen op de wervelbelasting op dakbedekkingen zal dit door middel van in-situ metingen bepaald moeten worden. In deze metingen zouden drukken worden gemeten op een dak voorzien van dummy zonnepanelen. Een voorbeeld van een dergelijke meting die in het verleden is uitgevoerd voor bepaling van de windbelasting is gegeven in Figuur 8 (meting uitgevoerd door TNO). Dergelijke metingen zouden parallel uitgevoerd kunnen worden met metingen aan een dak zonder zonnepanelen om de vergelijking te kunnen maken en het effect van zonnepanelen te kunnen vaststellen.



Figuur 8 Foto van opzet voor drukmetingen aan een zonnepaneel.

6 Referenties

[Blackmore, 1994]

Blackmore, P.A., The effect of aircraft trailing vortices on house roofs, J. of Wind Engng & Ind. Aerodyn., 52, pg 155-170

[BRE, 2002]

Slates and tiles; avoiding damage from aircraft wake vortices, BRE Digest 467

[Halcrow, 2010]

London City Airport Wake Turbulence Study, Halcrow Group Limited, December 2010

[NEN, 2019a]

NEN 6707, Bevestiging van dakbedekkingen – eisen en bepalingsmethoden, laatste uitgave 2019

[NEN, 2019b]

NPR 6708, Bevestiging van dakbedekkingen – richtlijnen, Nationale Praktijkrichtlijn, laatste uitgave 2019

[NEN, 2020]

NEN-EN 14437, Determination of the uplift resistance of installed clay or concrete tiles for roofing - Roof system test method, laatste versie 2020

[NLR, 2018]

Woningschade door zogturbulentie vliegtuigen. NLR rapport NLR-TN-AOSI-AAM-01 V1 251018, 25 oktober 2018

[TO70, 2021]

Wake vortex gevallen in de omgeving van Maastricht Aachen Airport, Notitie 21.272.02, d.d. 20 augustus 2021

7 Ondertekening

Delft, 17 november 2021

TNO

[Redacted]
Senior Research Consultant

[Redacted]

[Redacted]
Project Manager

[Redacted]

[Redacted]
Research Manager
Structural Dynamics

[Redacted]