

Risikovurdering i forbindelse med vindmøller og motorveje



Risø-R-Report

John Dalsgaard Sørensen, Risø DTU & AAU
Jørgen Lemming, Risø DTU
Jens Nørkær Sørensen, DTU Mekanik
Risø-R-1788(DA)
Juni 2011



Forfatter: John Dalsgaard Sørensen, Risø DTU & AAU
Jørgen Lemming, Risø DTU
Jens Nørkær Sørensen, DTU Mekanik
Titel: Risikovurdering i forbindelse med vindmøller og motorveje
Afdeling: Vindenergi Afdelingen

Abstract (in English):

This report treats risk assessment of siting wind turbines close to highways in Denmark. The assessment only deals with the risk of total or partly failure of the turbines and the risk of ice throw from the blades.

The report describes the fundamental methods, risk assessments as well as the assumptions and limitations the results are based on.

The results is based on an example with a number of turbines sited along the highway and presented as the risk per driven km on the highway.

Risø-R-1788(DA)
Juni 2011

ISSN 978-87-550-3921-6

Kontrakt nr.: 64036-0016

Gruppens reg. nr.:
1120308-04

Sponsorship: Energistyrelsen

Sider: 18
Tabeller: 6
Referencer: 17

Afdelingen for Informationsservice
Risø Nationallaboratoriet for Bæredygtig Energi
Danmarks Tekniske Universitet
Postboks 49
4000 Roskilde
Danmark
Telefon 46774005
bibl@risoe.dtu.dk
Fax 46774013
www.risoe.dtu.dk

Indhold

Forord	4
Sammenfatning	5
Vurderinger af risiko for vindmøllesvigt.	5
Vurderinger af risiko for isafkast	6
1 Indledning	9
2 Risikovurderinger ifm. vindmøllesvigt	9
3 Risikovurderinger ifm. overisning og isafkast	11
4 Forøgelsen af sandsynligheden i procent	17
5 Referencer	18

Forord

Denne rapport omhandler risikovurderinger i forbindelse med opstilling af vindmøller i nærheden af motorveje i Danmark. Der ses i denne rapport kun på risikoen fra nedfaldende dele fra vindmøllen i tilfælde af hel eller delvist havari og fra isafkast i tilfælde af overisning. I det følgende beskrives den grundlæggende fremgangsmåde, risikovurderinger, og de forudsætninger / begrænsninger, som de baseres på.

Sammenfatning

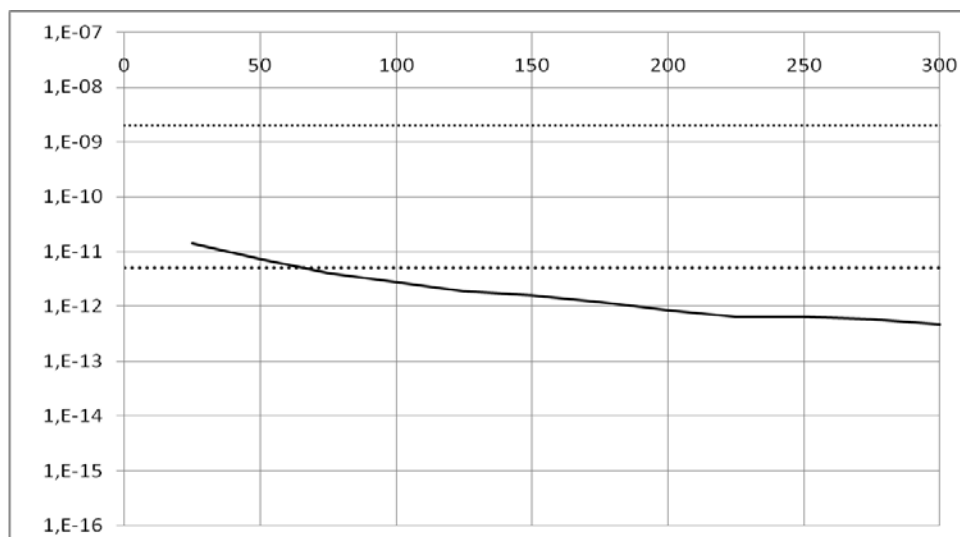
Denne rapport omhandler risikovurderinger i forbindelse med opstilling af vindmøller i nærheden af motorveje i Danmark. Der ses i denne rapport kun på risikoen fra nedfaldende dele fra vindmøllen i tilfælde af hel eller delvist havari og fra isafkast i tilfælde af overisning. I det følgende beskrives den grundlæggende fremgangsmåde, risikovurderinger, og de forudsætninger / begrænsninger, som de baseres på.

Vurderinger af risiko for vindmøllesvigt.

Der er indsamlet data fra et stort antal 'moderne' vindmøller (fra Danmark og udlandet og med samme grundlæggende teknologi som nye vindmøller). Disse data indeholder oplysninger om hændelser, hvor dele fra vindmøllen er kastet / faldet i en afstand fra vindmøllen. Dette dækker bl.a. smådele tabt fra nacellen samt dele af vindmøllevinger eller nacelle. Data indeholder oplysninger om afstanden fra vindmøllen, hvor vindmølledele er landet, og størrelsen af vindmølledelene.

Baseret på disse data er risikoen estimeret for, at personer i køretøjer bliver dræbt pga. vindmølledele 'bortkastet' fra en vindmølle i tilfælde af helt eller delvist svigt. Risikoen udtrykkes som en sandsynlighed pr kørt km. Der er set bort fra risikobidrag fra påkørsel af dele, der lander indenfor stoplængden ved opbremsning, og det antages, at der i gennemsnit er 1,5 person i hvert køretøj. Det antages, at der er placeret en række vindmøller med en typisk totalhøjde på 120m (svarende til vindmøllerne i det bagvedliggende datagrundlag) og en indbyrdes afstand på 400-500 m langs vejen.

Undersøgelserne viser, at sandsynligheden pr. kørt km for at en person i et køretøj mister livet pga. helt eller delvist svigt/kollaps (havari) af en vindmølle kan antages at være af mindre betydning. Sandsynligheden pr kørt km vil være under $5 \cdot 10^{-12}$ for møller, der står mere end 60 meter fra vejen (eller under 10^{-11} uden for en normal byggelinje på 40 meter). Til sammenligning er den statistiske risiko for at miste livet i øvrigt ved færdsel på motorveje på $2 \cdot 10^{-9}$ pr kørt km (2009 tal), jf. Figur 4. Beregningerne viser endvidere, at højden af vindmøllerne og afstanden mellem er af mindre betydning.



Figur 1 Sandsynlighed pr. kørt km for at en person i et køretøj mister livet pga. helt eller delvist svigt/kollaps (havari) af en vindmølle som funktion af afstanden til en vej. Stiplede kurver viser niveauerne $5 \cdot 10^{-12}$ og $2 \cdot 10^{-9}$.

I risikovurderinger ved forhold omkring veje benyttes normalt sandsynligheden for, at en trafikant mister livet pr. kørt km. En væsentlig årsag hertil er, at der findes veldokumenterede data for denne risiko for veje i mange lande, bl.a. Danmark. I 2009 er denne sandsynlighed således $2 \cdot 10^{-9}$ pr kørt km (eller i gennemsnit for alle motorveje 0,002 dræbte pr. million kørte km).

Tages der udgangspunkt i det såkaldte ALARP (As Low As Reasonably Practicable) princip vil et yderligere / ekstra risikobidrag kunne betragtes som ubetydeligt, hvis dette bidrag er mindre end denne sandsynlighed reduceret med en faktor 100, dvs. $2 \cdot 10^{-11}$ pr kørt km. Tages endvidere hensyn til ønsket om en fremtidig reduktion af det generelle sikkerhedsniveau på de danske motorveje bør acceptgrænsen reduceres til $5 \cdot 10^{-12}$ (sort punktlinje), svarende til en forventet halvering af dræbte hvert 10. år fremover. Dette er en grænse, som Cowi A/S har foreslået anvendt som værende acceptabelt for placering af fremtidige vindmøller langs motorveje.

I risikovurderinger benyttes, som nævnt ovenfor, normalt sandsynligheden for, at en trafikant mister livet pr. kørt km. En væsentlig årsag hertil er, at der findes veldokumenterede data for denne risiko for veje i mange lande, bl.a. Danmark. Herudfra kan der således opstilles acceptkriterier for risikoen. Der indgår ikke en vurdering af trafikintensiteten ved en konkret vejstrækning, ligesom der i beregningerne ikke er taget højde for indirekte konsekvenser, som f.eks. et harmonikasammenstød som følge af at trafikanter foretager en undvigemanøvre.

Vurderinger af risiko for isafkast

Risikovurdering ifm. isafkast ved overisning er forbundet med stor usikkerhed, idet det er nødvendigt at foretage en række antagelser, som ikke umiddelbart kan verificeres ud fra statistiske data. Ved vurdering af risikoen fra isafkast skal der betragtes dels situationer, hvor vindmøllen er i drift (generelt ved vindhastigheder mellem 3m/s og 25m/s) og dels situationer, hvor vindmøllen er stoppet,

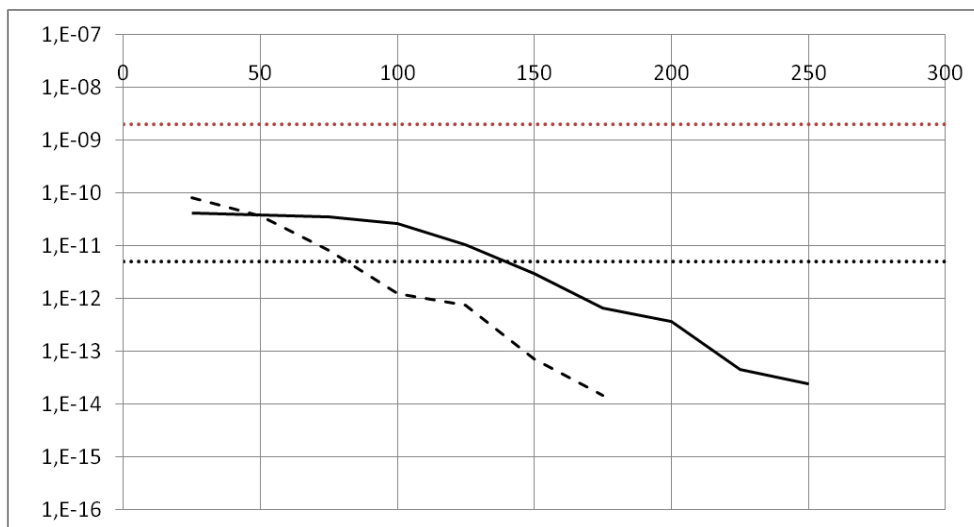
For overisning af vinger under drift er der i beregningerne ikke medtaget effekter af evt. opvarmning af vinger ved overisning, stop i tilfælde af masseubalancer, særlige belægninger til modvirkning af opbygning af is og systemer til stop af vindmøllerne, hvis der varsles overisning.

Vindmøller stoppes normalt når vindhastigheden er større end 25m/s eller mindre end 3-4m/s, men også i tilfælde af fejlsituationer, når vindmøllens kontrolsystem opdager en fejl, bl.a. i de tilfælde, hvor isdannelse på vingerne medfører masseubalancer. Det bemærkes, at denne og andre teknikker til detektion af is på vingerne endnu er under udvikling – der pågår således en række forsknings- og udviklingsprojekter herom. Behovet for anvendelsen af isdetektorer under danske klimaforhold, er dog begrænset, jf. nedenfor.

Figur 2 viser sandsynligheden pr kørt km for at en person i et køretøj mister livet pga. isafkast fra en vindmølle med en tiphøjde på 150m som funktion af afstanden til en række vindmøller placeret langs en motorvej med en indbyrdes afstand på 400m. Andre afstande mellem vindmøllerne ændrer kun ubetydeligt sandsynlighederne.

Kasteafstandene ses på figuren, som de afstande, hvor kurven knækker nedad. Første knæk svarer til kasteafstanden ved 5 m/s, andet knæk ved 10 m/s osv. Max kasteafstand ved 25m/s er afstanden, hvor kurven stopper. Da sandsynlighedskurven er bestemt ved vægtning med sandsynlighederne for de forskellige vindhastigheder fås meget lave sandsynligheder ved de længste kasteafstande. F.eks. vil sandsynligheden

ved vindmøller opstillet mere 150 meter fra en motorvej øges med under 0,1 % i forhold til den statistiske sandsynlighed på $2 \cdot 10^{-9}$ for at en trafikant mistede livet pr. kørt km i 2009.



Figur 2. Sandsynlighed pr kørt km for at en person i et køretøj mister livet pga. isafkast fra en vindmølle som funktion af afstanden til en vej. Fuldt optrukken kurve: vindmølle i drift - stiplede kurve: vindmølle stoppet.

I figur 2 er endvidere som i figur 1 vist risikoniveauer svarende til $2 \cdot 10^{-9}$ og $2 \cdot 10^{-11}$ pr kørt km.

I det følgende beskrives de benyttede forudsætninger og kommentarer til disse.

- Der er benyttet 10 minutters middelhastigheder i beregningerne. Vindretningen er antaget jævnt fordelt på alle retninger.
- Oplysninger fra DMI viser at der i Danmark i gennemsnit forekommer overisning med istykkelse større end 3mm i Danmark 0,175 gange pr år. Disse oplysninger er knyttet til overisning af stillestående konstruktioner ved jordoverfladen. Da istykkelse vokser med størrelsen af vindhastigheden, kan der på en roterende vinge opbygges større istykkelse. Ligeledes kan der i rotorhøjde være vejr-situationer, der medfører opbygning af større istykkelse end ved jordoverfladen. Dette er baggrunden for det skønsmæssige estimat for frekvensen af overisning på 0,175 gange pr. år, der kan medføre isstykker, som kan kastes over større afstande.
- Det er i beregningerne antaget, at isstykker skal have en tykkelse på minimum 2cm for at kunne kastes over større afstande uden at gå i mindre stykker, og samtidigt kunne gøre skade på et forbigående køretøj. I litteraturen benyttes ofte isstykker på 1,0 - 1,5kg ved vurdering af risici i forbindelse med isafkast. Det har ikke været muligt at finde data for isafkast fra vindmøller i Danmark. Dette skyldes primært, at overisning ikke har været et problem for vindmøller under danske klimaforhold.
- Ved overisning af vingerne vil der kunne afkastes et antal isstykker. Da der ikke foreligger data er det skønsmæssigt antaget, at der ved en overisning kan afkastes op til 10 isstykker med en vægt over 1,0 -1,5 kg, jf. ovenfor.
- Ved overisning har vindhastigheden (og vindretning) betydning for hvor langt isstykker kan kastes. Data over en periode på 50 år fra DMI viser, at vindhastigheder ved overisninger har en gennemsnitlig værdi på 6,3m/s og en spredning på 2,9m/s. Ved beregning af sandsynlighederne i figur 2 er sandsynlighedsfordelingen fra disse data benyttet, idet vindhastighederne er omregnet til navhøjde.

- Hvis et isstykke på 1,0-1,5 kg rammer et køretøj, er det antaget, at sandsynligheden er 10% for at i gennemsnit 1,5 personer i bilen mister livet. Dette estimat vurderes at være konservativt.
- Et køretøj antages at have et areal på 10m² svarende til størrelsen på en almindelig personbil.
- For en vindmølle under drift er det konservativt benyttet, at isstykkerne afkastes ved den mest ugunstige position af vingen.
- Der er ikke taget højde for indirekte konsekvenser, som f.eks. et harmonika-sammenstød som følge af at trafikanter foretager en undvigemanøvre.

Af figur 2 ses, at risikoen for at en person i en bil dræbes i tilfælde af isafkast ved overisning falder kraftigt når afstanden øges. Den maksimale kasteafstand svarer stort set til 1,7 gange møllehøjden.

Risikoen ifm isafkast for en vindmølle i drift ses derimod at være lidt større, end risikoen hvis vingerne er stillestående. Det bemærkes, at isstykker under drift typisk kastes vinkelret på vindretningen, medens de for en stoppet vindmølle typisk kastes i vindretningen. Som beskrevet ovenfor er der imidlertid en række væsentlige usikkerheder ved bestemmelse af niveauet for sandsynligheden pr. kørt km.

Det anbefales derfor, at der for konkrete projekter udføres en egentlig risikovurdering, som også medtager placeringen i forhold til vejen og den dominerende vindretning.

1 Indledning

Denne rapport omhandler risikovurderinger ifm opstilling af vindmøller i nærheden af motorveje i Danmark. Der ses i denne rapport kun på risikoen fra nedfaldende dele fra vindmøllen i tilfælde af hel eller delvist havari og fra isafkast i tilfælde af overisning. I det følgende beskrives den grundlæggende fremgangsmåde, risikovurderinger, og de forudsætninger / begrænsninger, som de baseres på.

2 Risikovurderinger ifm. vindmøllesvigt

Grundlaget for beregning af sandsynligheden for at køretøjer på en vej rammes af vindmølledele, der bortkastes fra vindmøller i tilfælde af svigt, er følgende data fra en repræsentativ database med svigttoplysninger for moderne vindmøller:

- Afstand fra vindmølle
- Størrelse af vindmølledele

På basis heraf kan sandsynligheden P_Z per år per m^2 for at en bortkastet vindmølledele rammer i ΔA_j mellem radius R_{j-1} og radius R_j fra vindmøllen:

$$P_{Z,j} = \frac{n_j}{\Delta A_j \cdot N_T} \quad (1)$$

hvor

n_j antal vindmølledele mellem radius R_{j-1} og radius R_j

ΔA_j areal af område mellem radius R_{j-1} og radius R_j

N_T antal vindmølleår, som data repræsenterer

Sandsynligheden (per km) for at et køretøj rammes af en vindmølledele bortkastet fra en vindmølle placeret i en afstand d fra en vej estimeres vha. følgende model from [1], annek B, afsnit 23:

$$P_A = \frac{1}{V_0} \frac{1}{365 \cdot 24 \cdot 3600} \int_s P_Z(s) A(s) ds \cdot \frac{1}{D} \quad (2)$$

hvor

V_0 hastighed af køretøj – vælges til 80 km/t = 22 m/s for motorveje

$P_Z(s)$ sandsynlighed $P_Z(s)$ fra (1) som funktion af afstanden fra vindmøllen

$A(s)$ areal af vindmølledele som funktion af afstand

S vejstrækning, der gennemkøres

D indbyrdes afstand mellem vindmøller placeret langs en vej

Den statistiske usikkerhed knyttet til et begrænset antal svigtdata medtages ved at bestemme en øvre 95% grænse på for $P_Z(s)$, idet det antages at svigthændelserne følger en Poisson proces.

Antages endvidere, at konsekvensen hvis en vindmølledele rammer et køretøj er at i gennemsnit 1,5 personer mister livet hvis et køretøj rammes, kan risikoen R_A esti-

meres for at miste livet per kørt km pga. vindmølledele bortkastet fra vindmøller i tilfælde af svigt:

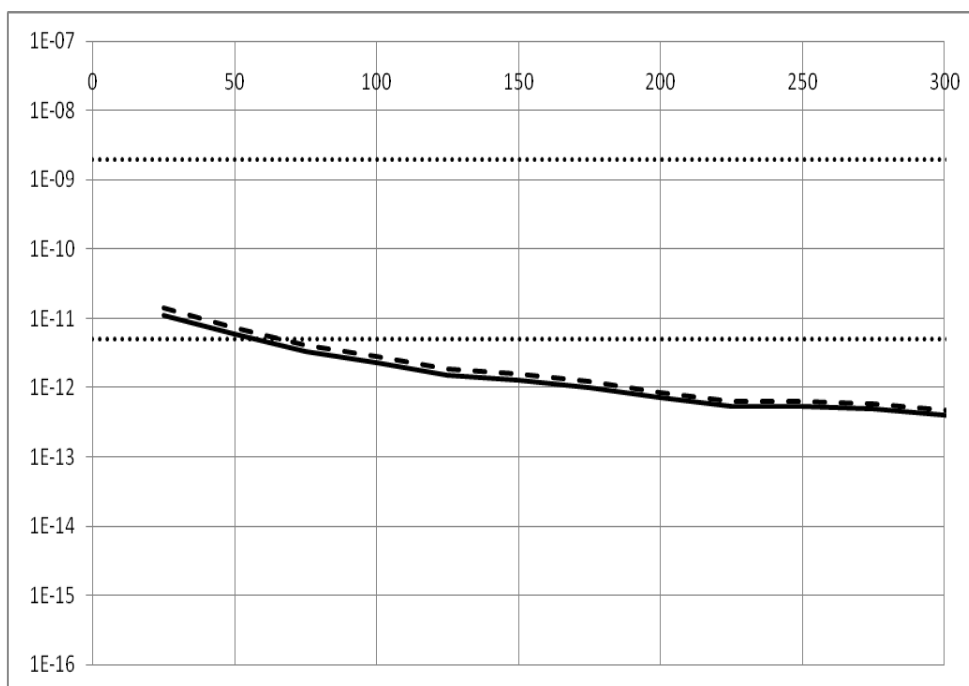
$$R_A = 1,5 \cdot P_D \cdot P_A \quad (3)$$

hvor

$P_D = 1$ er sandsynligheden for at blive dræbt hvis en genstand rammer et køretøj

Det bemærkes, at der således konservativt antages en sandsynlighed på 100% for at i gennemsnit 1,5 personer mister livet, hvis et køretøj rammes af en vindmølledele.

Der er indsamlet data fra et stort antal 'moderne' vindmøller (fra Danmark og udlandet og med samme grundlæggende teknologi som nye vindmøller). Disse data indeholder oplysninger ifm hændelser, hvor dele fra vindmøllen er kastet / faldet i en afstand fra vindmøllen. Dette dækker bl.a. smådele tabt fra nacellen og dele af vindmøllevinger og nacelle. Data indeholder oplysninger om afstanden fra vindmøllen, hvor vindmølledele er landet og størrelsen af vindmølledele. På basis heraf kan bestemmes dels sandsynlighed $P_Z(s)$ som funktion af afstanden fra vindmøllen og dels arealet $A(s)$ for vindmølledele som funktion af afstanden. Dernæst kan R_A bestemmes som funktion af afstanden d fra en vej. I figur 1 ses R_A vist for $D = 400\text{m}$ og 500m .



Figur 1. Sandsynlighed pr. kørt km for at en person i et køretøj mister livet pga. helt eller delvist svigt/kollaps (havari) af en vindmølle som funktion af afstanden til en vej (i m). Fuldt optrukken linie: $D = 500\text{m}$; stiplede linie: $D = 400\text{m}$; prikkede linier viser niveauerne $5 \cdot 10^{-12}$ og $2 \cdot 10^{-9}$.

Figur 1, at risikobidraget fra 'bortkastede' vindmølledele kan antages at være af mindre betydning (under $5 \cdot 10^{-12}$ for møller, der står mere end ca. 60 meter fra vejen) sammenlignet med den statistiske risiko for at miste livet i øvrigt ved færdsel på motorveje, som er på $2 \cdot 10^{-9}$ pr kørt km (2009), [2]. Endvidere er højden af vindmøllerne og afstanden mellem disse også af mindre betydning.

I risikovurderinger benyttes normalt sandsynligheden for at en trafikant mister livet pr kørt km. En væsentlig årsag hertil er, at der findes veldokumenterede data for denne risiko for veje i mange lande, bl.a. Danmark. I 2009 er denne sandsynlighed således $2 \cdot 10^{-9}$ pr kørt km, [2]. Benyttes det såkaldte ALARP (As Low As Reasonably Practicable, se [3] og [4]) princip antages ofte at et yderligere / ekstra risikobidrag kan betragtes som ubetydeligt, hvis dette bidrag er mindre end denne sandsynlighed reduceres med en faktor 100, dvs. $2 \cdot 10^{-11}$ pr kørt km. Tages hensyn til forventet halvering af dræbte hvert 10. år fremover på de danske motorveje kan acceptgrænsen i henhold til vurderinger for placering af fremtidige vindmøller langs motorveje foretaget af COWI A/S reduceres til $5 \cdot 10^{-12}$ [17].

Det bemærkes, at ovennævnte risikovurdering er baseret på et stort statistisk datagrundlag for moderne vindmøller. Tidligere risikovurderinger ifm. bortkastede vindmølledele ved svigt har været baseret på statistiske oplysninger for svigt af ældre vindmøller. Dette gælder den i Holland udarbejdede vejledning ('Handbook') i risikovurdering af vindmøller, se [1] og [5], og risikovurderinger i Danmark ifm. vindmølleprojekter ved Avedøre og Kappel, se [6] og [7]. For Ontario, Canada er der i [8] beskrevet anbefalinger vedr. risikovurdering for konsekvenser af isafkast og svigt af vindmøllevinger. I denne rapport beskrives grundlæggende samme fremgangsmetode til vurdering af risikoen ifm helt eller delvist havari, som beskrevet i den hollandske håndbog, [1] og [5].

3 Risikovurderinger ifm. overisning og isafkast

Sandsynligheden (per km) for at et køretøj ifm isslag rammes af et isstykke bortkastedt fra en vindmølle placeret i en afstand d fra en vej estimeres vha. følgende model baseret på (2):

$$P_A = \sum_{v_i=5,10,15,20,25\text{m/s}} \left[\frac{1}{V_0} \frac{1}{365 \cdot 24 \cdot 3600} \int_s P_Z(s, v_i) A(s) ds \cdot \frac{1}{D} \right] \cdot P(V = v_i) \quad (4)$$

hvor

$P(V = v_i)$ sandsynlighed for at middelvindhastighed V i navhøjde ifm overisning er lig v_i . Middelvindhastigheden diskretiseres i værdierne 5, 10, 15, 20 og 25m/s.

$P_Z(s, v_i)$ sandsynlighed (pr m og pr år) for at isstykke lander i afstanden s fra vindmøllen hvis middelvindhastigheden er v_i . Der antages en ensformig sandsynlighedsfordeling indenfor kasteafstanden R_i ved middelvindhastigheden v_i . Endvidere benyttes en ensformig retningsfordeling af vindhastigheden. $P_Z(s, v_i)$ bestemmes af

$$P_Z(s, v_i) = v \frac{1}{R_i} \quad (5)$$

hvor

v antal isslag pr år.

Isklasse	Tykkelse [mm]	Frekvens [antal pr år]
1	<0,1	0,775
2	0,1-1,5	1,455

3	1,5-3	0,395
4	3-5	0,110
5	5-10	0,060
6	10-20	0,005

Tabel 1. Observerede isslag i Danmark, [9].

I tabel 1 er vist antal isslag pr år i gennemsnit over 4 målestationer (Karup, Aalborg, Kastrup, Skrydstrup) for forskellige isklasser, baseret på observationer fra DMI over 50 år, [9]. Observationerne viser, at isslagshændelser yderst sjældent varer over 12 timer.

Arealet af et køretøj vælges til $A(s) = 10 \text{ m}^2$ svarende til størrelsen af en almindelig personbil.

Det vurderes, at isstykker skal have en tykkelse på minimum 2cm for at kunne kastes over større afstande uden at gå i mindre stykker, og samtidigt kunne gøre skade på et forbigående køretøj. I litteraturen benyttes ofte isstykker på 1,0 - 1,5kg ved vurdering af risici ifm isafkast. Det har ikke været muligt at finde data for isafkast fra vindmøller i Danmark. Dette skyldes primært, at overisning ikke har været et problem for vindmøller under danske klimaforhold.

Tabel 1 viser, at der i Danmark i gennemsnit forekommer overisning med isstykker større end 3mm i Danmark 0,175 gange pr år. Disse oplysninger er knyttet til overisning af stillestående konstruktioner ved jordoverfladen. Da isstykker vokser med størrelsen af vindhastigheden, kan der på en roterende vinge opbygges større isstykker. Ligeledes kan der i rotorhøjde være vejr-situationer, der medfører opbygning af større isstykker end ved jordoverfladen. På basis heraf benyttes et skønsmæssige estimat for frekvensen af overisning på $\nu = 0,175$ gange pr. år, der kan medføre isstykker, som kan kastes over større afstande. Det bemærkes, at dette estimat er behæftet med stor usikkerhed.

Ved overisning af vingerne vil der kunne afkastes et antal isstykker. Det har ikke været muligt at finde data herfor. Skønsmæssigt er det antaget, at der ved en overisning kan afkastes op til 10 isstykker med en vægt over 1 kg, se ovenfor. Det bemærkes, at dette estimat er behæftet med stor usikkerhed.

Vindhastigheder fra DMI registreret ifm isslag (10m højde) over en periode på 50år viser en middelværdi på 6,3 m/s og en spredning på 2,9 m/s. I det vindhastigheder til omregnes tiphøjde (150m) for terrænkategori 2 (landbrugsland) fås sandsynlighederne i tabel 2 for de diskretiserede middelvindhastigheder. Det bemærkes, at der i (4) benyttes 10 minutters middelvindhastigheder.

v_i	$P(V = v_i)$
5 m/s	0,27
10 m/s	0,45
15 m/s	0,17
20 m/s	0,04
25 m/s	0,004

Tabel 2. Sandsynligheder for (10 minutters) middelvindhastigheder i tiphøjde ifm isslag.

Kasteafstande er bestemt ved ballistiske beregninger baseret på modellerne beskrevet i [10] og [11]. I de ballistiske beregninger benyttes en gennemsnitlig modstandskoeff-

ficient på 0,6, massefylde af luft på $1,3 \text{ kg/m}^3$ og af is på 800 kg/m^3 . Koordinatsystemet er med placeringen af vindmøllen som Origo, dvs. afstandene er beregnet fra møllen (ikke fra isens placering på vingen).

Kastelængder under drift er bestemt med en vingetip hastighed på 70m/s, tårnhøjde = rotor diameter og istykkelse = 2cm. Tårnhøjderne svarer ca. til installerede effekter på: 40m ~ 500kW; 50m ~ 700kW; 70m ~ 1.5MW; 100m ~ 2.5MW og 120m ~ 3.6MW. Resultaterne er vist i tabel 3 og 4 for Psi = +45 grader og Psi = -45 grader. Psi er vinklen mellem horisontalen og vingen i tårnhøjde. Dvs. ved +psi er vingen midt imellem tårn og top, mens den ved -psi er midt imellem dens nederste position og tårnhøjden.

Tårn højde v_i	40 m	50 m	70m	100 m	120 m
5 m/s	69	69	67	70	68
10 m/s	88	91	98	111	121
15 m/s	112	119	134	159	178
20 m/s	138	149	172	209	234
25 m/s	166	181	212	259	292

Tabel 3. Kastelængder (i m) under drift for Psi = +45 grader.

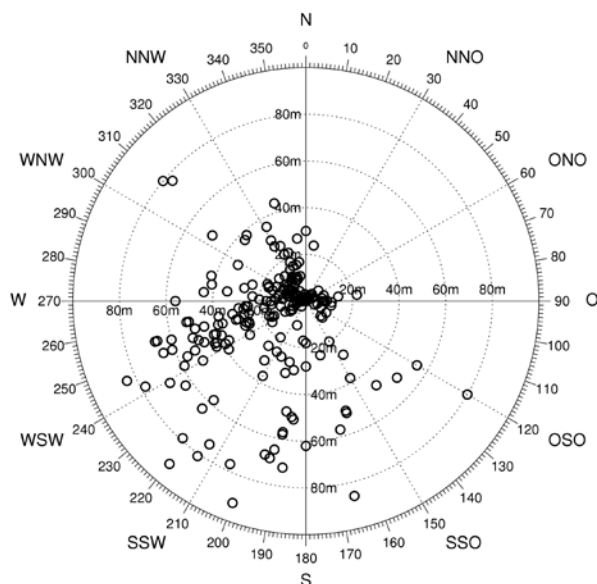
Tårn højde v_i	40 m	50 m	70m	100 m	120 m
5 m/s	91	96	104	117	125
10 m/s	100	105	115	130	140
15 m/s	113	119	132	150	162
20 m/s	129	137	152	174	189
25 m/s	147	156	174	200	218

Tabel 4. Kastelængder (i m) under drift for Psi = -45 grader.

'Kastelængder' for en stoppet vindmølle er bestemt for forskellige tiphøjder (totalhøjder) og en istykkelse = 2cm. Resultaterne er vist i tabel 5.

Totalhøjde v_i	50 m	75 m	100 m	150 m	200 m
5 m/s	7	12	18	30	42
10 m/s	16	27	38	62	87
15 m/s	28	45	62	98	135
20 m/s	42	64	88	136	185
25 m/s	57	85	115	176	238

Tabel 5. Kastelængder (i m) for en stoppet vindmølle.



Figur 2. Observerede isstykker fra Guetsch, [12].

Figur 2 viser observerede kastelængder for isstykker afrevet fra en 600 kW Enercon E-40 vindmølle, [12]. Disse data bekræfter stort set de beregnede kastelængder for en stoppet vindmølle. I tabel 5 angiver 2. kolonne kastelængderne for isafkast fra en stillestående mølle med en tårnhøjde på 50m og en rotorradius på 25m. Dette svarer til en mølle på 6-700 kW, hvor der er beregnet en maksimal kastelængde ved 25m/s vind på 85 m. I figur 2 ses den tilsvarende maximale kastelængde at være på 92m. Dette giver en fejl på under 10% i beregningen af den maximale kastelængde.

Antages endvidere, at konsekvensen hvis en vindmølle del rammer et køretøj er at i gennemsnit 1,5 personer i 10% af tilfældene mister livet hvis et køretøj rammes, kan risikoen R_A estimeres for at miste livet per kørt km pga. isafkast ved overisning:

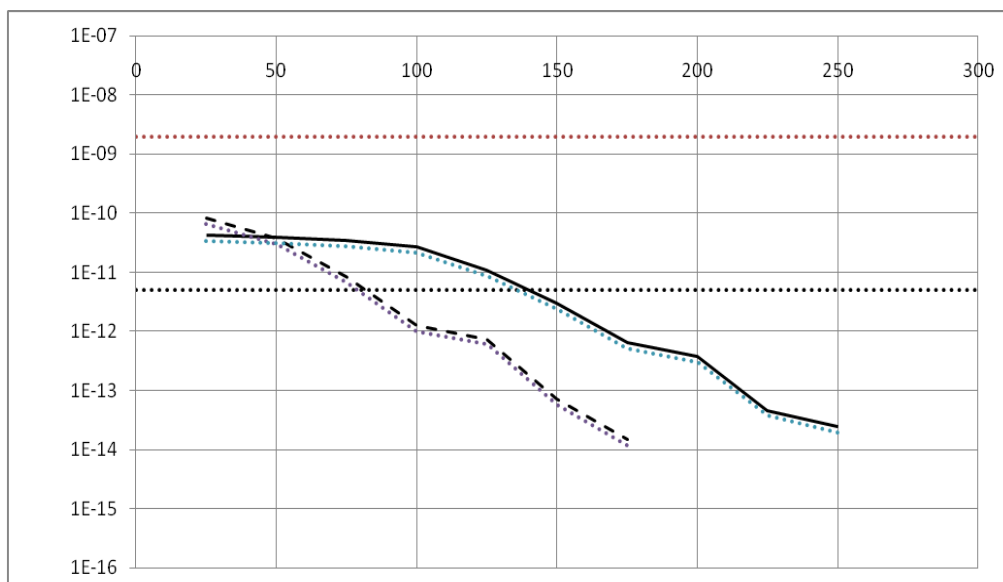
$$R_A = 1,5 \cdot N_{is} \cdot P_D \cdot P_A \quad (6)$$

hvor

P_D = 0,1 er sandsynligheden for at blive dræbt hvis et isstykke rammer et køretøj

N_{is} = 10 er antal 'store' isstykker, der bortkastes ved overisning

Det bemærkes, at der således konservativt antages en sandsynlighed på 10% for at i gennemsnit 1,5 personer mister livet, hvis et køretøj rammes af et isstykke.

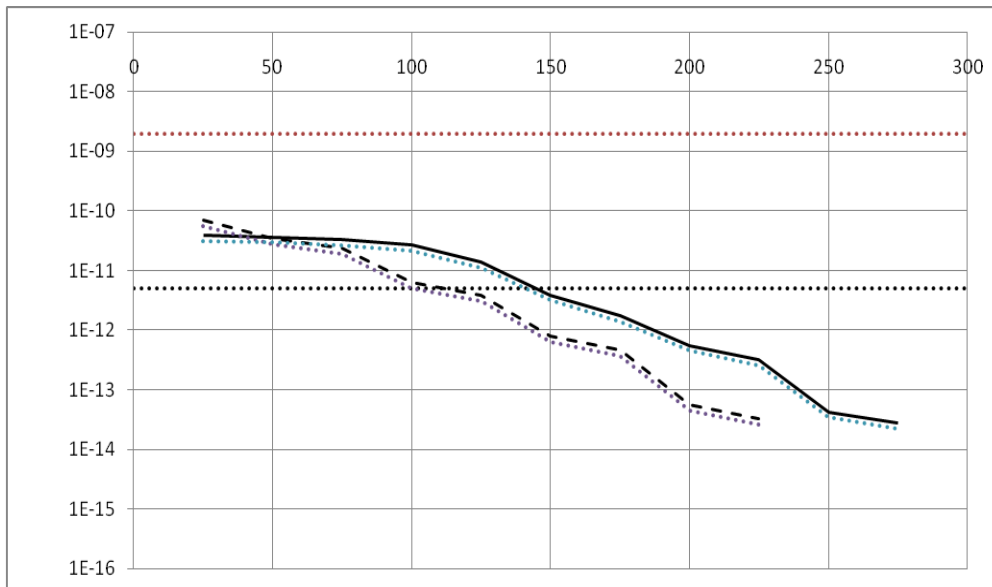


Figur 3. Sandsynlighed pr kørt km for at en person i et køretøj mister livet pga. isafkast fra en vindmølle som funktion af afstanden til en vej. Tårnhøjde / totalhøjde = 100m / 150m. Fuldt optrukken kurve: vindmølle i drift - stiplede kurve: vindmølle stoppet: $D = 400m$; prikket linie: $D = 500m$.

I figur 3 er vist sandsynligheden pr kørt km for at en person i et køretøj mister livet pga. isafkast fra en vindmølle som funktion af afstanden til en vej, dels for vindmøller i drift og dels for vindmøller der er stoppet. Konservativt er de maksimale kastelængderne for $\Psi = \pm 45$ grader benyttet.

I figur 4 er vist sandsynligheden pr kørt km for at en person i et køretøj mister livet pga. isafkast fra en vindmølle som funktion af afstanden til en vej, dels for vindmøller i drift og dels for vindmøller der er stoppet.

Af figur 3 og 4 ses, at risikoen for at en person i en bil dræbes i tilfælde af isafkast ved overisning falder kraftigt når afstanden øges. Den maksimale kasteafstand svarer stort set til 1,7 gange møllehøjden.



Figur 4. Sandsynlighed pr kørt km for at en person i et køretøj mister livet pga. isafkast fra en vindmølle som funktion af afstanden til en vej – middelvindhastighed i tårnhøjde. Tårnhøjde / totalhøjde = 120m / 200m. Fuldt optrukken kurve: vindmølle i drift - stiplede kurve: vindmølle stoppet: $D = 400\text{m}$; prikket linie: $D = 500\text{m}$.

Risikoen ifm isafkast for en vindmølle i drift ses at være lidt større end risikoen hvis vingerne er stillestående. Det bemærkes, at isstykker under drift typisk kastes vinkelret på vindretningen, medens de for en stoppet vindmølle typisk kastes i vindretningen.

For overisning af vinger under drift er der i beregningerne ikke medtaget effekter af evt. opvarmning af vinger ved overisning, at vindmøllens kontrolsystem stopper vingerne i tilfælde af masseubalancer, at vingerne kan have specielle belægninger, der modvirker opbygning af is og at vindmøllerne kan stoppes, hvis der varsles overisning.

Som beskrevet ovenfor er der imidlertid en række væsentlige usikkerheder ved bestemmelse af niveauet for sandsynligheden pr. kørt km. Det anbefales derfor, at der for konkrete projekter udføres en egentlig risikovurdering, som også medtager placeringen i forhold til en vej og den dominerende vindretning.

Seifert [13] har baseret på observationer af isafkast og simplificerede beregningsmodeller foreslået følgende empiriske model til bestemmelse af en 'risiko cirkel' for isafkast fra vindmøllevinger for en vindmølle i drift, se [13]:

$$d = (D + H) \cdot 1.5 \quad (7)$$

hvor D er rotor diameter og H er navhøjde.

For en stillestående vindmølle angives i [13] følgende simplificerede, empiriske formel til bestemmelse af maksimal afstand for isnedslag:

$$d = V \frac{D/2 + H}{15} \quad (8)$$

hvor V er vindhastighed i navhøjde i m/s. D og H angives i m. Baseret på denne simplificerede model fås ved en vindhastighed på 20 m/s typisk en maksimal afstand på 1.7 gange vindmøllens totalhøjde.

Det bemærkes, at der i ovenstående kun tages hensyn til isafkast og at modellerne ikke er baseret på en egentlig risikoanalyse, f.eks. ville det være relevant at medtage sandsynligheden for forskellige vindhastigheder i vurdering af afstandskravet for en stillestående vindmølle. Seifert, [13] bemærker således i tilknytning til de simplificerede modeller i (7) og (8): 'This empirical and simplified equation can only be a "rough guess" and a help for a first shot in planning the position of a wind turbine close to streets or other objects, involving a certain risk. A more detailed calculation is recommended.'. Eksempler på mere detaljerede analyser findes i [14] og [15], se også [16].

4 Forøgelsen af sandsynligheden i procent

I tabel 6 er vist hvor mange procent sandsynligheden øges for at en trafikant mister livet pga. evt. nedfald af vindmølledele og nedfald af is for forskellige afstande mellem vej og vindmølle. Der sammenlignes med en sandsynlighed pr kørt km = $2 \cdot 10^{-9}$, der er sandsynligheden for, at en trafikant mister livet pr. kørt km (2009).

Afstand [m]	Vindmølledele	Isafkast- mølle i drift	Isafkast - mølle stoppet
50	0,37	1,9	1,8
100	0,14	1,4	0,06
150	0,08	0,1	0,004
200	0,04	0,02	
250	0,03	0,001	
300	0,02		

Tabel 6. Forøgelse (i procent) af sandsynlighed for at en trafikant mister livet pga. evt. nedfald af vindmølledele og nedfald af is for forskellige afstande mellem vej og vindmølle.

Det ses af tabel 6, at forøgelsen af risikoniveauet er meget beskedent for afstande over 150m.

5 Referencer

- [1] Braam, H., G.J. van Mulekom & R.W. Smit: Handboek Risicozonering Windturbines. (Handbook Risk Assessment of Wind Turbines), Novem, 2005. (in Dutch).
- [2] Vejdirektoratet.dk, Interaktiv årsstatistik, <http://webapp.vd.dk/uheldnykomm/UhRapport.asp?page=document&objno=105608> (5. juni 2011)
- [3] Health & Safety Executive, UK: The tolerability of risk from nuclear power stations. 1988, revised 1992. HMSO.
- [4] Melchers R.: On the ALARP approach to risk management. Reliability Engineering and System Safety. Vol. 71, No. 2, 2000, pp 201–208.
- [5] Braam, H. & L.W.M.M. Rademakers: Guidelines on the Environmental Risk of Wind Turbines in the Netherlands. Report ECN-RX--04-013, ECN, 2004.
- [6] Sørensen, J.D., J.N. Sørensen & P. Friis-Hansen: Risikovurdering ifm. opsætning af nye vindmøller ved Avedøre Holme, RISØ-DTU, April 2008.
- [7] Sørensen, J.D. & J.N. Sørensen: Risikovurdering ifm. opsætning af nye vindmøller ved Kappel, RISØ-DTU, Maj 2009.
- [8] Garrad Hassan: Recommendations for risk assessment of ice throw and blade failure in Ontario. 2007.
- [9] Nielsen, N.W.: Notat vedr. Isning på møllevinger. Danmarks Meteorologiske Institut, marts 2011.
- [10] Sørensen, Jens N.: Beregning af risiko for personskade ved vindmøllehavari, hvor en vinge løsriver. Rapport AFM 83-07, Afdelingen for fluid mekanik, Den Polytekniske Lærestalt, Lyngby, 1983.
- [11] Sørensen, J.N. 'On the calculation of trajectories for blades detached from horizontal axis wind turbines', Wind Engineering, vol. 8, no. 3, 1984.
- [12] Cattin, R., A. Heimo, S. Kunz, G. Russi, M. Russi, M. Tiefgraber, S. Schaffner, B.E. Nygaard: Alpine Test Site Guetsch - Meteorological measurements and wind turbine performance analysis. IWAIIS XII, Yokohama, October 2007.
- [13] Seifert, H., A. Westerhellweg & J. Kröning: Risk analysis of ice throw from wind turbines. DEWI, 2003.
- [14] Morgan, C. & E. Bossanyi: Wind turbine icing and public safety - A quantifiable risk? Wind Energy Production in Cold Climates, 1996.
- [15] Boucetta, Y. & P. Heraud: Ice throw risk assessment for the proposed kingdom community wind power project. Garrad Hassan, 2010.
- [16] Laakso et al.: State-of-the-art of wind energy in cold climates. IEA R&D Wind, 2003.
- [17] Møde med Jørgen Kampmann, COWI A/S., 19. april 2011.

Risø DTU er Nationallaboratoriet for Bæredygtig Energi. Forskningen er rettet mod udviklingen af klimavenlige energiteknologier og energisystemer, og bidrager til innovation, uddannelse og rådgivning. Risø har store forsøgsfaciliteter og tværfaglige forskningsmiljøer og inkluderer kompetencecenteret for nukleare teknologier.

Risø DTU
Nationallaboratoriet for Bæredygtig Energi
Danmarks Tekniske Universitet

Frederiksborgvej 399
Postboks 49
4000 Roskilde
Telefon 4677 4677
Fax 4677 5688

www.risoe.dtu.dk