

# **Risikovurdering ifm. opsætning af nye vindmøller ved Avedøre Holme**

Udarbejdet af: John Dalsgaard Sørensen, RISØ-DTU  
Jens Nørkær Sørensen, DTU  
Peter Friis Hansen, DTU

Dato: April 2008

# Indholdsfortegnelse

<b>1</b>	<b>Indledning .....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Risikovurderinger .....</b>	<b>5</b>
2.1	Havari af vindmølle.....	5
2.2	Isafkast ved overisning .....	11
<b>3</b>	<b>Konklusion .....</b>	<b>14</b>
<b>4</b>	<b>Referencer .....</b>	<b>14</b>
	<b>Bilag 1. Summerede sandsynligheder pr. år ved evt. havari.</b>	<b>15</b>
	<b>Bilag 2. Summerede sandsynligheder pr. år ved evt. havari eller isafkast ved overisning .....</b>	<b>16</b>
	<b>Bilag 3. Risiko for overisning .....</b>	<b>17</b>

# Sammenfatning

Ved Avedøre Holme står i dag 16 vindmøller, hhv. 12 Bonus-møller (300 kW opstillet i 1992), 3 Vestas-møller (660 kW opstillet i 1993) og 1 testmølle (1 MW opstillet i 2000). Det planlægges at nedtage de 12 Bonus-møller og testvindmøllen. I stedet planlægges opstillet 3 nye store, møller (ca. 3- 5 MW) i havet ca. 15 m fra land for de to østlige vindmøller og ca. 100 m fra land for den vestligste vindmølle.

I denne rapport er der foretaget en vurdering af sandsynligheden for at dele af vindmøllerne ved evt. havari eller isafkast ved overisning rammer en person, som befinder sig indenfor nedfaldsområdet. Ved vurdering af risiko for personskade skal de beregnede sandsynligheder, kombineres med sandsynligheden for, at en person opholder sig indenfor nedfaldsområdet.

Risikovurderingerne er baseret dels på en model for bestemmelse af kasteafstande ved vindmøllehavari dels de samme principper som benyttes i en nyere anvisning fra Holland på risikoanalyser i områder omkring vindmøller

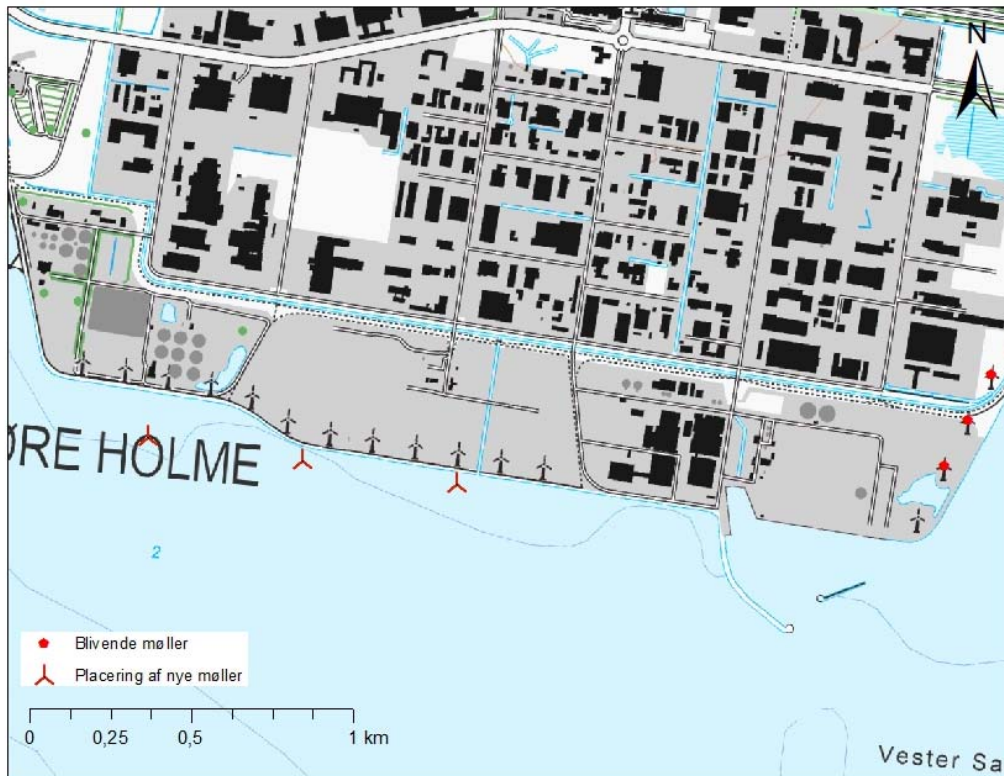
Risikovurderingerne for såvel eksisterende som nye vindmøller ved Avedøre Holme viser, at

- sandsynligheden for at ramme en person generelt er lav for såvel eksisterende som nye vindmøller
- der ikke er en forøget sandsynlighed ved at nedtage de 12 Bonus vindmøller og erstatte dem med 3 nye større vindmøller

Det bemærkes, at vurderingerne er baseret på simplificerede antagelser, specielt vedr. fastsættelse af sandsynligheder for havari af vindmøllerne, idet kun data for relativt gamle typer af vindmøller har været tilgængelige. Det er endvidere en forudsætning for disse estimater, at vindmøllerne følger en systematisk vedligeholdelsesplan.

# 1 Indledning

Ved Avedøre Holme står i dag 16 vindmøller, hhv. 12 Bonus-møller (300 kW opstillet i 1992), 3 Vestas-møller (660 kW opstillet i 1993) og 1 testmølle (EK50 1 MW opstillet i 2000). De 12 Bonus-møller er placeret på linie langs det øst-vest gående dige yderst på Holmen, mens de 4 øvrige møller står på en nord-sydgående linie øst for Avedøreværket, med testmøllen placeret længst mod syd. Det planlægges at nedtage de 12 Bonus vindmøller og testvindmøllen. I stedet planlægges opstillet 3 nye store, møller (ca. 3- 5 MW), der opstilles i havet ca. 15 m fra land for de to østlige vindmøller og ca. 100 m fra land for den vestligste vindmølle, se figur 1.



Figur 1. placering af vindmøller.

Endvidere er følgende forhold væsentlige for risikovurderingen:

- Der er ingen beboelse inden for en afstand af ca. 1,5 km fra vindmøllerne.
- Nærmeste nabo til vindmøllerne er industri; mod vest Spildevandscenter Avedøre (ca. 40 arbejdspladser) og videre mod øst AV Miljø (lossepladsdeponi med 6 - 8 arbejdspladser). Længst mod øst er Avedøreværket placeret.
- Langs de eksisterende vindmøller er en offentlig tilgængelig, befæstet sti (gang, løb, cykling m.m.). Stien forbliver og området vil fortsat bruges rekreativt, når de nye vindmøller er opstillet.
- Vindmøllerne bliver vedligeholdt regelmæssigt.

I dette dokument er foretaget en vurdering af sandsynligheden for, at en person rammes af dele fra en af vindmøllerne ved evt. havari eller af isfragmenter ved overisning af vindmøllen. De beregnede sandsynligheder er fundet ved at antage, at nedslagsområdet er dækket af et areal, svarende til en cirkel omsluttende vingen/vingestykket. Den gennemsnitlige sandsynlighed er da givet som arealet af nedslagsområdet divideret med arealet af området, der udspændes af den maximale kasteafstand, dvs.  $P = \pi(\frac{1}{2}L)^2 / (\pi R_{\max}^2) = 1/4 \cdot (L/R_{\max})^2$ , hvor  $L$  angiver længden af vingen/vingestykket og  $R_{\max}$  er

den maximale kastelængde. Ved vurdering af risiko for personskade skal de i denne rapport estimerede sandsynligheder for at ramme en person, som opholder sig indenfor nedfaldsområdet, kombineres med sandsynligheden for, at personen opholder sig indenfor området. Risikovurderingerne er baseret på den model for bestemmelse af kasteafstande ved vindmøllehavari, der er beskrevet i [1] og [2]. Endvidere er vurderingerne baseret på samme principper som benyttes i en nyere anvisning fra Holland på risikoanalyser i området omkring vindmøller, se [3] og [4].

## 2 Risikovurderinger

I tabel 1 er vist data for de 16 eksisterende møller på Avedøre Holme. I tabel 2 er data vist for de 3 nye vindmøller.

Antal	Type og effekt	Opsætningsår	Navhøjde [meter]	Rotordiameter [meter]	Totalhøjde [meter]	Omdrejninger pr minut
3 (forbliver)	Vestas V47, 660kW	2000	40	47	63,5	28,5
1 (nedtages)	EK50, 1000kW	1993	55	50	80	Ca. 25
12 (nedtages)	Bonus Combi, 300kW	1992	30	31	45,5	Ca. 31

Tabel 1. Tekniske data for eksisterende vindmøller.

Antal	Type og effekt	Opsætningsår	Navhøjde [meter]	Rotordiameter [meter]	Totalhøjde [meter]	Omdrejninger pr minut
3	3- 5 MW	2008	Op til 105	Op til 120	Op til 165	5 - 13

Tabel 2. Tekniske data for nye vindmøller.

I afsnit 2.1 beskrives en risikovurdering hvor enten hele vingen brækker af eller hvor en del af vingen brækker af. Da der ikke er angivet detaljerede strukturelle data for vingen (dvs. masse- og inerti-fordelinger), antages vingestykket's længde at svare til den yderste tredjedel. In ref. [1] er der foretaget et detaljeret parameterstudium af de maximale kastelængder som funktion af brudsted for forskellige typer vindmøller. I de fleste tilfælde fandtes den maksimale kasteafstand at optræde ved et havari, hvor den yderste tredjedel af vingen kastes af. I afsnit 2.2 medtages i risikovurderingen også risikoen for isafkast ved overisning.

### 2.1 Havari af vindmølle

I Sørensen [1] og [2] er beskrevet en metode til bestemmelse af dels maksimale kasteafstande og dels sandsynligheden for en person, som opholder sig indenfor nedfaldsområdet, rammes af en vinge/vingedel i en given afstand fra vindmøllen. Sandsynlighederne beregnes for både afkast af en hel vinge og for afkast af den yderste tredje del af vingen. Metoden er baseret på følgende overordnede forudsætninger:

- Modellen forudsætter at vingen eller vingestykket brækker af ved et rent snit.
- Aerodynamikken er baseret på en strip-teori, hvori modstands- og opdriftskræfter beregnes ud fra tabulerede værdier af de aktuelle profildata.
- Bevægelsesmodellen indeholder ligninger for både den translatoriske og den roterende (tum-lende) bevægelse af vingestykket.
- Kastelængderne i nærværende rapport er baseret på interpolation af kastelængderne beregnet i ref. [1].

De maksimale kasteafstande og sandsynligheder for at dele af møllevingerne ved evt. havari rammer en person, der befinder sig indenfor nedfaldsområdet, estimeres ved 3 forskellige hastigheder af vingetippen (vingespidsen):

- $V_{tip}$  ved normal drift
- $1.25 \times V_{tip}$  ved 25% 'overspeed'
- $3 \times V_{tip}$  ved 200% 'overspeed'

Den maksimale tiphastighed er bestemt dels af vindhastigheden og dels af luftens kompressible effekter. En simpel aerodynamisk analyse viser, at tiphastigheden ved løbskørsel er proportional med vindhastigheden og vingens glidetæl. En grov tommelfingerregel er, at tiphastigheden vil være 15-20 gange større end vindhastigheden ved løbskørsel. De kompressible effekter gør dog, at tiphastigheden under ingen omstændigheder vil kunne overstige Mach 1, dvs. lydhastighed (340m/s). I praksis vil dette være i størrelsesordenen Mach 0.8 (270-280m/s), da der typisk vil indstille sig et begyndende chok på vingetippen, som vil introducere en stor luftmodstand, og derved forhindre en yderligere acceleration af vingen. Ved et nyligt havari på Djursland viste videooptagelser at vingetippen kørte ved en hastighed på ca. 280 m/s, svarende til Mach 0.85.

I nærværende rapport opereres med 200% overspeed som maksimal hastighed, svarende til en tiphastighed på maksimalt 210 m/s. Baseret på extrapoleringer fra resultaterne i ref. [1], vil forskellen i kastelængder ved tiphastigheder på henholdsvis 210 m/s og 280 m/s dog være ubetydelige, hvorfor vi her, som en gennemsnitsværdi, benytter 200% overspeed, som den maksimale tiphastighed.

I tabel 3 er vist de relevante vingetip hastigheder for eksisterende og nye vindmøller ved Avedøre Holme. I tabel 4 er vist maksimale kastafstande.

Tabel 5 viser sandsynligheden for nedfald indenfor den maksimale kasteafstand fra vindmøllen for henholdsvis en hel vinge og en tredjedel vingestump. Det bemærkes, at disse sandsynligheder for nedfald ikke er helt jævnt fordelt – bl.a. er der, relativt set, en lidt større sandsynlighed for nedfald tæt ved vindmøllen.

	$P$ [kW]	$H$ [m]	$R$ [m]	$V_{tip}$ [m/s]	$1.25 \times V_{tip}$ [m/s]	$3 \times V_{tip}$ [m/s]
Bonus Combi	300	30	15,5	50	62,5	150
V47	660	40	23,5	70	87,5	210
EK50	1000	50	25	65	81,25	195
Ny mølle	3-5000	< 105	< 60	70	87,5	210

Tabel 3. Vingetip hastigheder.  $P$ : effekt,  $H$ : navhøjde og  $R$ : rotordiameter.

	Hel vinge $1,25 \times V_{tip}$	Hel vinge $3 \times V_{tip}$	Vingedel $1,25 \times V_{tip}$	Vingedel $3 \times V_{tip}$
Bonus Combi	135	250	230	500
V47	165	350	370	560
EK50	165	350	400	770
Ny mølle	200	360	420	800

Tabel 4. Maksimale kasteafstande [m].

	Hel vinge 1,25 x Vtip	Hel vinge 3 x Vtip	Vingedel 1,25 x Vtip	Vingedel 3 x Vtip
Bonus Combi	$3 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-5}$
V47	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-5}$
EK50	$6 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-5}$
Ny mølle	$2 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$

Tabel 5. Sandsynlighed for at dele af møllevingerne ved evt. havari rammer en person, som befinder sig indenfor nedfaldsområdet.

Den årlige sandsynlighed for hel eller delvis svigt (havari) af hele vindmøllen eller hel / delvis vingesvigt vurderes på basis af oplysninger i Braam et al. [3], se tabel 6. Det bemærkes, at disse data er indsamlet for ældre typer af vindmøller, og at sandsynlighederne for havari derfor vurderes at være konservative for nye vindmøller med et systematisk vedligeholdelsesprogram.

Sandsynligheden indenfor en afstand på  $R + H$  fra vindmøllen for at dele af vindmøllerne ved evt. havari af hele vindmøllen rammer en person, som befinder sig indenfor nedfaldsområdet, er tilnærmest estimeret som  $R/H/\pi$ , hvor  $R$  er rotorradius og  $H$  er navhøjde.

	Hele vind- møllen	Hel vinge 1,25 x Vtip	Hel vinge 3 x Vtip	Vingedel 1,25 x Vtip	Vingedel 3 x Vtip
Sandsynligheden for svigt pr. år	$3.2 \cdot 10^{-4}$	$4.2 \cdot 10^{-4}$	$5.0 \cdot 10^{-6}$	$2.6 \cdot 10^{-4}$	$2.6 \cdot 10^{-4}$

Tabel 6. Sandsynlighed pr. år for svigt (havari) af vindmølle og hel/delvis vingesvigt.

Ved at kombinere oplysningerne i tabel 5 og 6 kan sandsynligheden pr. år for at dele af vindmøllerne ved evt. havari rammer en person, som befinder sig indenfor nedfaldsområdet, bestemmes. Resultatet er vist i tabel 7.

	Hele vind- møllen	Hel vinge 1,25 x Vtip	Hel vinge 3 x Vtip	Vingedel 1,25 x Vtip	Vingedel 3 x Vtip
Bonus Combi	$5,26 \cdot 10^{-5}$	$1,26 \cdot 10^{-6}$	$5,00 \cdot 10^{-9}$	$2,60 \cdot 10^{-8}$	$5,20 \cdot 10^{-9}$
V47	$5,98 \cdot 10^{-5}$	$2,10 \cdot 10^{-6}$	$5,00 \cdot 10^{-9}$	$2,60 \cdot 10^{-8}$	$7,80 \cdot 10^{-9}$
EK50	$5,09 \cdot 10^{-5}$	$2,52 \cdot 10^{-6}$	$5,00 \cdot 10^{-9}$	$2,60 \cdot 10^{-8}$	$7,80 \cdot 10^{-9}$
Ny mølle	$5,82 \cdot 10^{-5}$	$8,40 \cdot 10^{-6}$	$3,00 \cdot 10^{-8}$	$1,82 \cdot 10^{-7}$	$5,20 \cdot 10^{-8}$

Tabel 7. Sandsynlighed pr. år indenfor den maksimale kasteafstand fra vindmøllen for at dele af vindmøllerne ved evt. havari rammer en person, som befinder sig indenfor nedfaldsområdet.

	Hele vind- møllen	Hel vinge 1,25 x Vtip	Hel vinge 3 x Vtip	Vingedel 1,25 x Vtip	Vingedel 3 x Vtip
Bonus Combi	$5,39 \cdot 10^{-5}$	$1,30 \cdot 10^{-6}$	$3,12 \cdot 10^{-8}$	$3,62 \cdot 10^{-8}$	$5,20 \cdot 10^{-9}$
V47	$6,20 \cdot 10^{-5}$	$2,14 \cdot 10^{-6}$	$3,88 \cdot 10^{-8}$	$3,38 \cdot 10^{-8}$	$7,80 \cdot 10^{-9}$
EK50	$5,35 \cdot 10^{-5}$	$2,56 \cdot 10^{-6}$	$3,88 \cdot 10^{-8}$	$3,38 \cdot 10^{-8}$	$7,80 \cdot 10^{-9}$
Ny mølle	$6,69 \cdot 10^{-5}$	$8,66 \cdot 10^{-6}$	$2,64 \cdot 10^{-7}$	$2,34 \cdot 10^{-7}$	$5,20E-08$

Tabel 8. Summerede sandsynligheder pr. år for at dele af vindmøllerne ved evt. havari rammer en person, som befinder sig indenfor nedfaldsområdet.

Antages konservativt, at svigthændelserne er statistisk uafhængige kan den årlige sandsynlighed for at dele af vindmøllerne ved evt. havari rammer en person, som befinder sig indenfor nedfaldsområdet, bestemmes ved at summerede de årlige sandsynligheder for de enkelte hændelser. Disse resul-

tater er præsenteret i tabel 8. De tilhørende kasteafstande (radius i konturcirkler med samme sandsynlighed) er vist i tabel 9.

	Hele vindmøllen	Hel vinge 1,25 x Vtip	Hel vinge 3 x Vtip	Vingedel 1,25 x Vtip	Vingedel 3 x Vtip
Bonus Combi	45,5	135	250	230	500
V47	63,5	165	350	370	560
EK50	75	165	350	400	770
Ny mølle	165	200	360	420	800

Tabel 9. Maksimale kasteafstande [m] svarende til de summerede sandsynligheder i tabel 8.

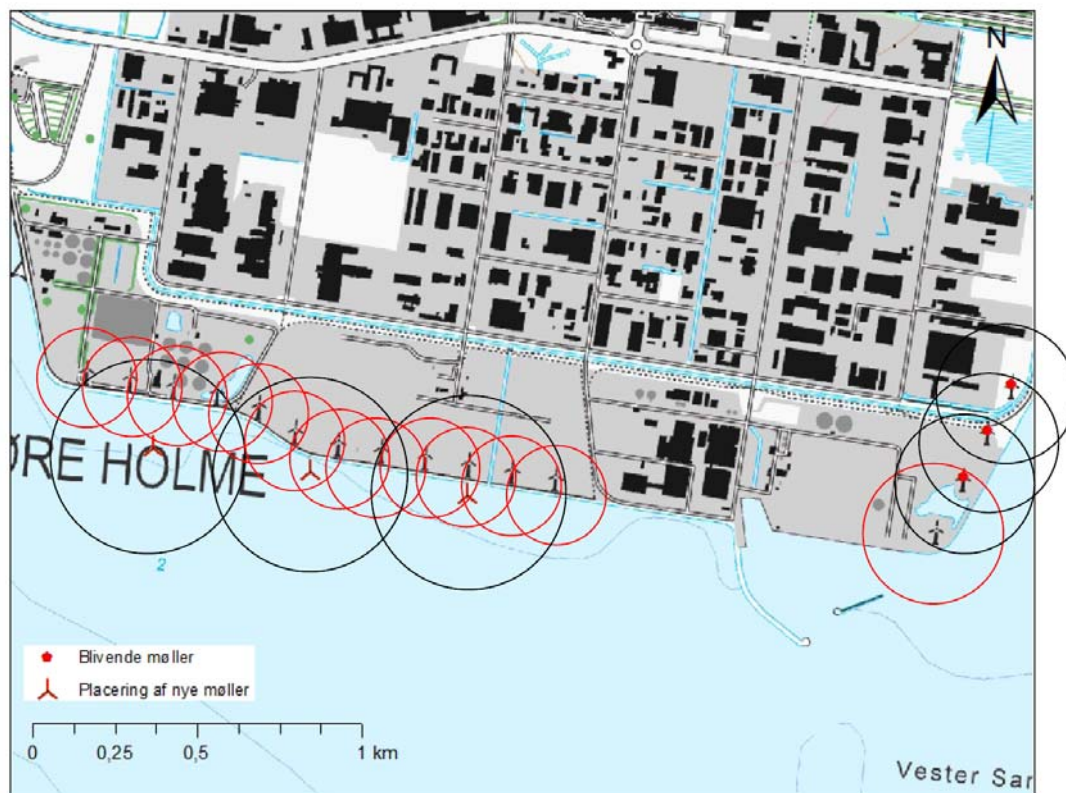
I bilag 1 er vist summerede sandsynligheder pr. år for at dele af vindmøllerne ved evt. havari rammer en person, der befinder sig indenfor nedfaldsområdet, som funktion af afstand fra vindmøllen.

I tabel 10 er vist afstande fra vindmøllerne med samme summerede årlige sandsynlighed ( $10^{-5}$  og  $10^{-6}$ ) – disse afstande er også radius i konturcirkler med samme årlige sandsynlighed. En årlig sandsynlighed på  $10^{-6}$  svarer til et risikoniveau, som ofte bliver anvendt ved generelle risikovurderinger som et acceptabelt risikoniveau. Det samme acceptkriterium er også benyttet i den hollandske 'håndbog' for vurdering af vindmøllerisiko, se [3] og [4]. Til sammenligning kan nævnes at sikkerhedsniveauet i de danske bygningsnormer svarer til en formel sandsynlighed for svigt på  $10^{-6} - 10^{-5}$  for normal sikkerhedsklasse.

	$10^{-5}$	$10^{-6}$
Bonus Combi	86	143
V47	118	200
EK50	125	206
Ny mølle	198	299

Tabel 10. Afstande [m] fra vindmølle med samme summerede årlige sandsynlighed.

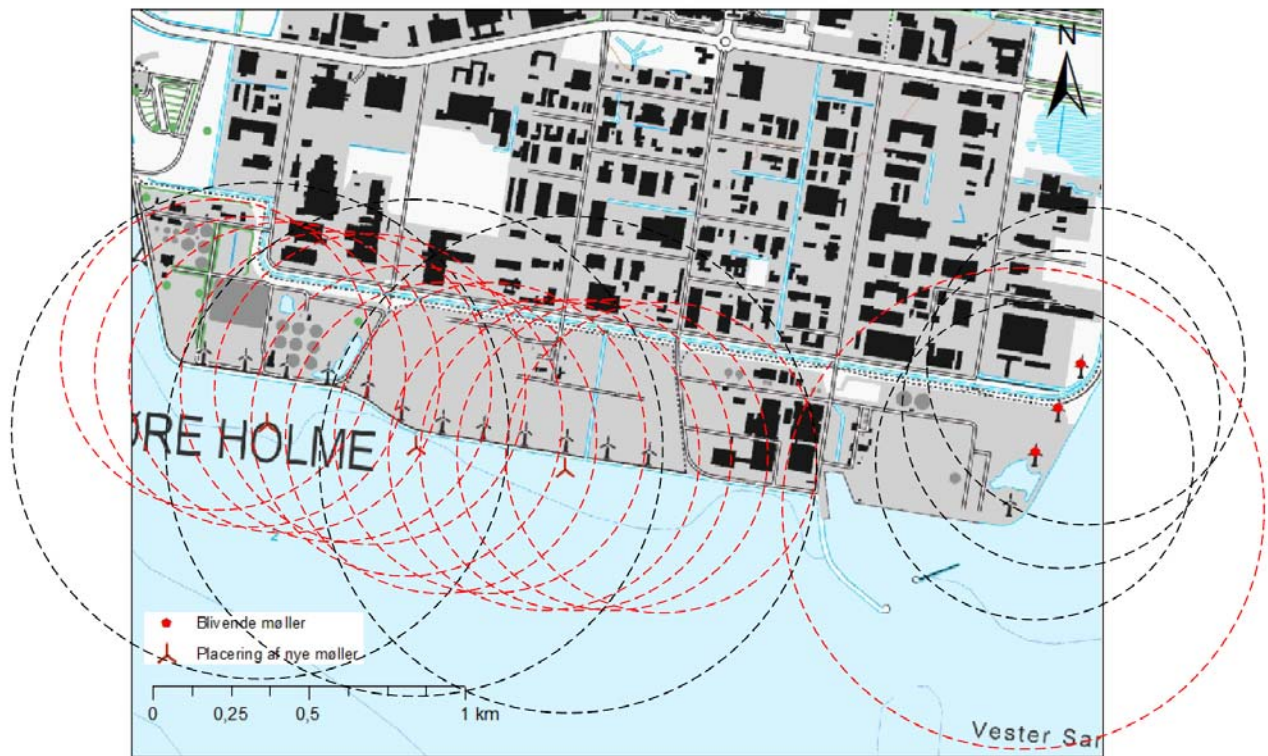
I figur 2 er konturcirkler fra tabel 10 vist svarende til en årlig sandsynlighed på  $10^{-6}$  for at dele af vindmøllerne ved evt. havari rammer en person, der befinder sig indenfor nedfaldsområdet. I figur 3 er konturcirkler fra tabel 9 vist svarende til maksimale kasteafstande.



Figur 2. Konturcirkler svarende til en årlig sandsynlighed på  $10^{-6}$  for at dele af vindmøllerne ved evt. havari rammer en person, der befinder sig indenfor nedfaldsområdet.

Figur 2 med konturcirkler svarende til en årlig sandsynlighed på  $10^{-6}$  viser:

- at risikoniveauet ved at udskifte de 12 gamle Bonus vindmøller med 3 nye store vindmøller kun øges marginalt i et lille område. I størstedelen af det område, som konturcirklerne dækker, er risikoniveauet enten uændret eller falder, idet det samlede område, hvor cirklerne overlapper, bliver væsentligt mindre med de nye vindmøller.
- at konturcirklerne for de eksisterende 12 Bonusmøller dækker over ca. 1/2 landområde og 1/2 vandområde. For de planlagte nye vindmøller er det ca. 2/3 vandområde og 1/3 landområde, hvor det dog gælder, at  $10^{-6}$ -cirklen for de nye vindmøller rækker lidt længere ind i land, men udstrækker sig dog ikke så langt langs kystlinien.
- at det samlede landareal, der afskæres af  $10^{-6}$  cirklerne for de tre havvindmøller, stort set er det samme for de gamle Bonus møller og de nye møller.



Figur 3. Konturcirkler svarende til maksimal kasteafstand ved vindmølle havari.

Figur 3 med konturcirkler svarende til maksimale kasteafstande viser:

- at der er områder, hvor cirklerne overlapper. Dette svarer til, at flere vindmøller kan kaste en vinge i et givet område. Dette er specielt tilfældet for de eksisterende vindmøller, hvor op til 8 vindmøller kan kaste en havareret vinge ind i et givet område.
  - I de områder, hvor to  $10^{-6}$  konturcirkler overlapper øges sandsynligheden til  $2 \cdot 10^{-6}$ . Disse områder er meget beskedne for de nye møller, medens konturcirklerne for de 12 eksisterende Bonus vindmøller stort set overlapper langs hele gang / cykelstien langs vandet.
  - Der er områder uden for  $10^{-6}$  konturcirklerne, hvor konturcirkler for de maksimale kasteafstande overlapper. I disse områder øges risikoniveauet kun beskedent i forhold til sandsynligheden på  $10^{-6}$ . For de nye vindmøller er der et område, hvor alle 3 kan kaste en havareret vinge ind. Konservativt kan det antages, at sandsynligheden for at dele af vindmøllerne ved evt. havari rammer en person, som befinder sig indenfor nedfaldsområdet, bliver  $10^{-6} + 2 \cdot 10^{-7} = 1.2 \cdot 10^{-6}$ , der stadig er lav (det antages, at sandsynligheden uden for  $10^{-6}$  konturcirklen er  $10^{-7}$ ). For de eksisterende vindmøller er der områder, hvor 6 konturcirkler med maksimale kasteafstande overlapper. Her øges sandsynligheden til  $1.5 \cdot 10^{-6}$ . I disse områder nedsættes risikoniveauet således ved at udskifte de gamle vindmøller med nye.

## 2.2 Isafkast ved overisning

Baseret på modellen for isafkast i [5] estimeres de maksimale afstande for isafkast fra vindmøllerne på Avedøre Holme som vist i tabel 11. Vindhastighederne på 13 m/s og 25 m/s er benyttet i [5] som repræsentative værdier og svarer til vindhastigheden hvor der ca. fås maksimal effekt og hvor vindmøllen stoppes. Ved beregning af konturcirkler i det følgende (tabel 13) benyttes værdierne svarende til en repræsentativ vindhastighed på 13 m/s. I forhold til den årlige fordeling af vindhastigheder er 13 m/s et konservativt valg. De tilhørende sandsynligheder for at isafkast ved overisning rammer en person, som befinder sig indenfor nedfaldsområdet, er vist i tabel 12.

Vindhastighed	13 m/s (alm. drift)	25 m/s
Bonus Combi	200	230
V47	250	285
EK50	240	275
Ny mølle	250	285

Tabel 11. Maksimale kasteafstande for isafkast [m].

Vindhastighed	13 m/s (alm. drift)	25 m/s
Bonus Combi	$8 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-6}$
V47	$5 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$
EK50	$5 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$
Ny mølle	$5 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$

Tabel 12. Sandsynlighed for at isafkast ved overisning rammer en person, som befinder sig indenfor nedfaldsområdet.

Hypigheden for overisning vurderes konservativt til 5 gange pr. år, se bilag 3 og [6].

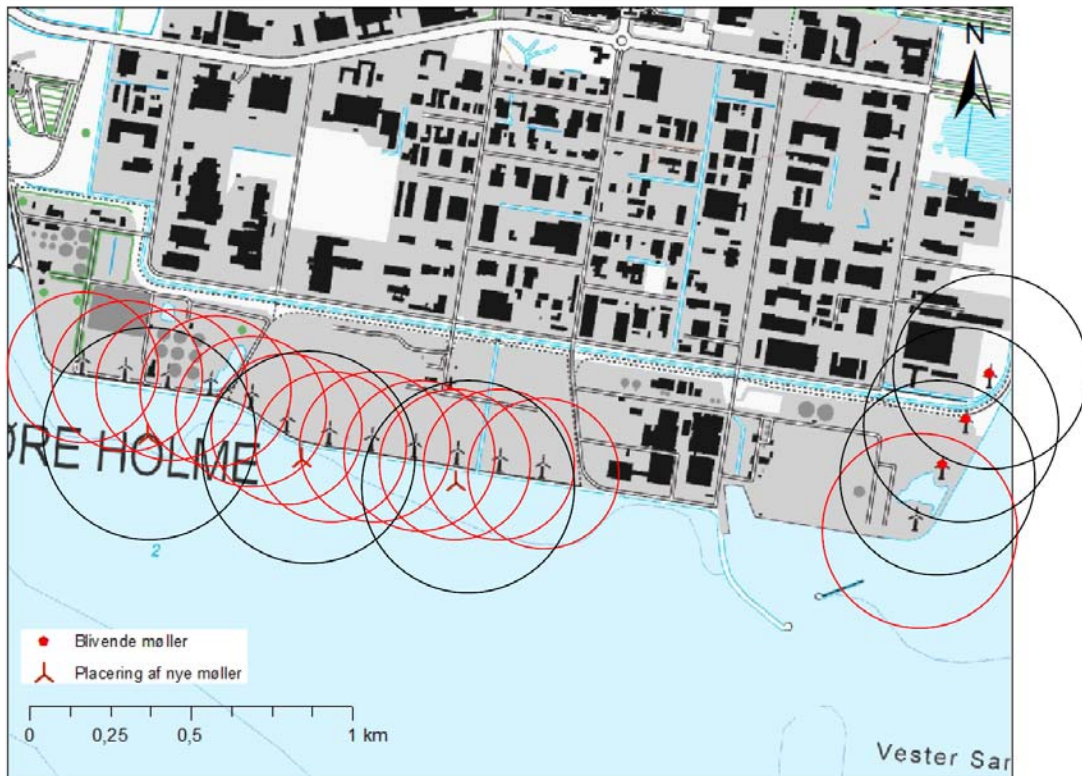
I bilag 2 er vist summerede sandsynligheder pr. år for at dele af vindmøllerne ved evt. havari eller isafkast ved overisning rammer en person, som befinder sig indenfor nedfaldsområdet.

Konturcirkler med samme summerede årlig sandsynlighed ( $10^{-5}$  og  $10^{-6}$ ) for at dele af vindmøllerne ved evt. havari eller isafkast ved overisning rammer en person, som befinder sig indenfor nedfaldsområdet kan nu bestemmes således, at både risikoen for vindmøllehavari og overisning medtages, se tabel 13.

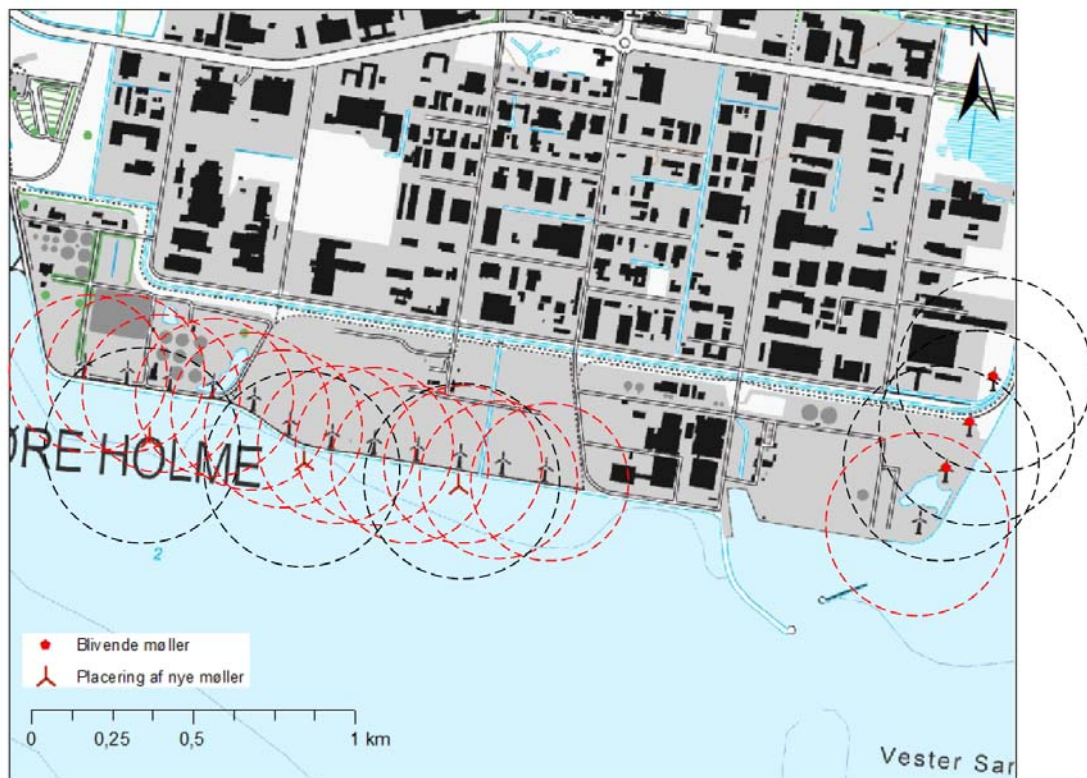
	$10^{-5}$	$10^{-6}$
Bonus Combi	210	226
V47	264	300
EK50	256	295
Ny mølle	272	326

Tabel 13. Afstande [m] fra vindmølle med samme summerede årlige sandsynlighed – inkluderer risiko for vindmøllehavari og isafkast.

Sammenlignes tabel 13 med konturcirklerne i tabel 10 ses, at især  $10^{-5}$  konturcirklerne er øget.



Figur 4. Konturcirkler svarende til en årlig sandsynlighed på  $10^{-6}$  for at dele af vindmøllerne ved evt. havari eller isfragmenter ifm. overisning rammer en person, som befinder sig indenfor nedfaldsområdet.



Figur 5. Maksimal afstand for isafkast svarende til en årlig sandsynlighed på  $10^{-7}$  for, at en person, der befinder sig i nedfaldsområdet (tæt ved den maksimale kastelængde), rammes af isafkast ved overisning.

I figur 4 er vist konturcirkler fra tabel 13 svarende til en årlig sandsynlighed på  $10^{-6}$  – inkluderer risiko for vindmøllehavari og isafkast. I figur 5 er vist den maksimale afstand for isafkast fra tabel 11 svarende til en årlig sandsynlighed på  $10^{-7}$  for, at en person, der befinder sig i nedfaldsområdet (tæt ved den maksimale kastelængde), rammes af isafkast ved overisning ved en vindhastighed i navhøjde på 25m/s. Resultaterne viser,

- at der ved at nedtage de 12 Bonus vindmøller og erstatte dem med 3 nye større vindmøller ikke er en forøget sandsynlighed for at dele af vindmøllerne ved evt. havari eller isafkast ved overisning rammer en person, som befinder sig indenfor nedfaldsområdet.

### 3 Konklusion

Dette notat beskriver overordnede vurderinger af risikoen for at dele af vindmøllerne ved evt. havari eller isafkast ved overisning rammer en person, som befinder sig indenfor nedfaldsområdet.

Risikovurderingerne viser, at

- sandsynligheden for at dele af vindmøllerne ved evt. havari eller isafkast ved overisning rammer en person, som befinder sig indenfor nedfaldsområdet, generelt er lav for såvel eksisterende som nye vindmøller
- der ved at nedtage de 12 Bonus vindmøller og erstatte dem med 3 nye større vindmøller ikke er en forøget sandsynlighed for at dele af vindmøllerne ved evt. havari eller isafkast ved overisning rammer en person, som befinder sig indenfor nedfaldsområdet

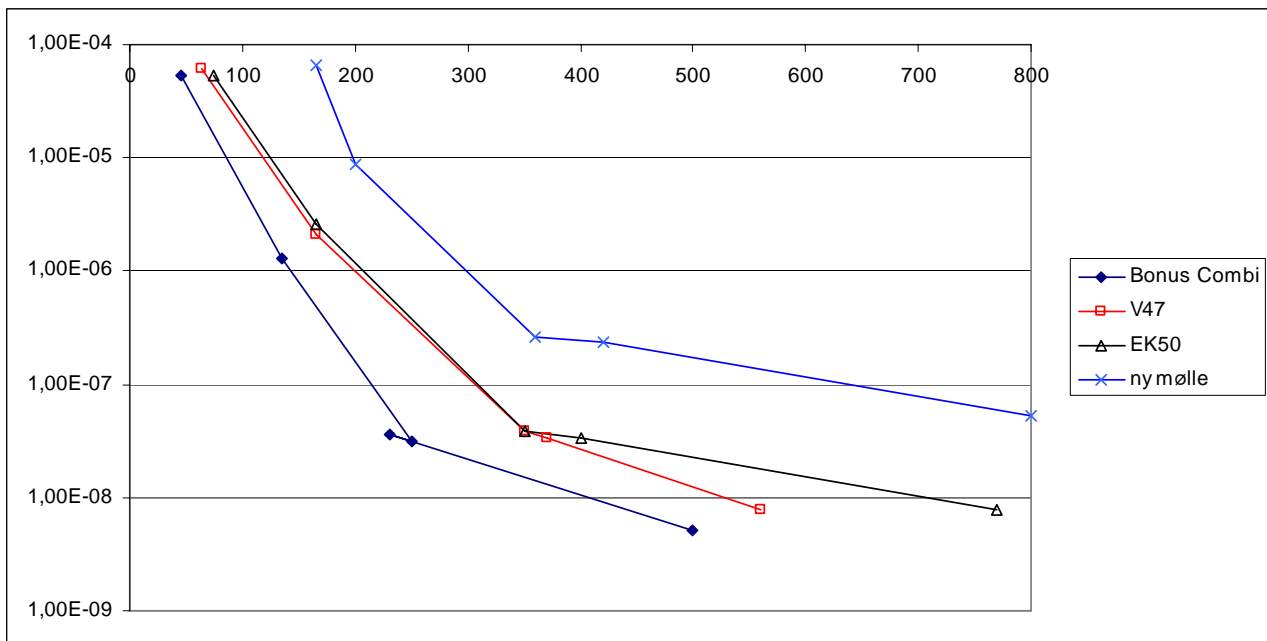
Det bemærkes, at vurderingerne er baseret på simplificerede antagelser, specielt vedr. fastsættelse af sandsynligheder for helt eller delvis havari af vindmøllerne, idet kun data for relativt gamle typer af vindmøller har været tilgængelige. Det er endvidere en forudsætning for disse estimater, at vindmøllerne følger en systematisk vedligeholdelsesplan.

### 4 Referencer

- [1] Sørensen, Jens N.: Beregning af risiko for personskade ved vindmøllehavari, hvor en vinge løsriveres. Rapport AFM 83-07, Afdelingen for fluid mekanik, Den Polytekniske Læreanstalt, Lyngby, 1983.
- [2] Sørensen, J.N. 'On the calculation of trajectories for blades detached from horizontal axis wind turbines', Wind Engineering, vol. 8, no. 3, 1984.
- [3] 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.
- [4] Braam, H., G.J. van Mulekom & R.W. Smit: Handboek Risicozonering Windturbines. (Handbook Risk Assessment of Wind Turbines), Novem, 2005. (på hollandsk).
- [5] Morgan, C. & E. Bossanyi: Wind turbine icing and public safety - A quantifiable risk? Wind Energy Production in Cold Climates, 1996.
- [6] Laakso et al.: State-of-the-art of wind energy in cold climates. IEA R&D Wind, 2003.

# Bilag 1. Summerede sandsynligheder pr. år ved evt. havari

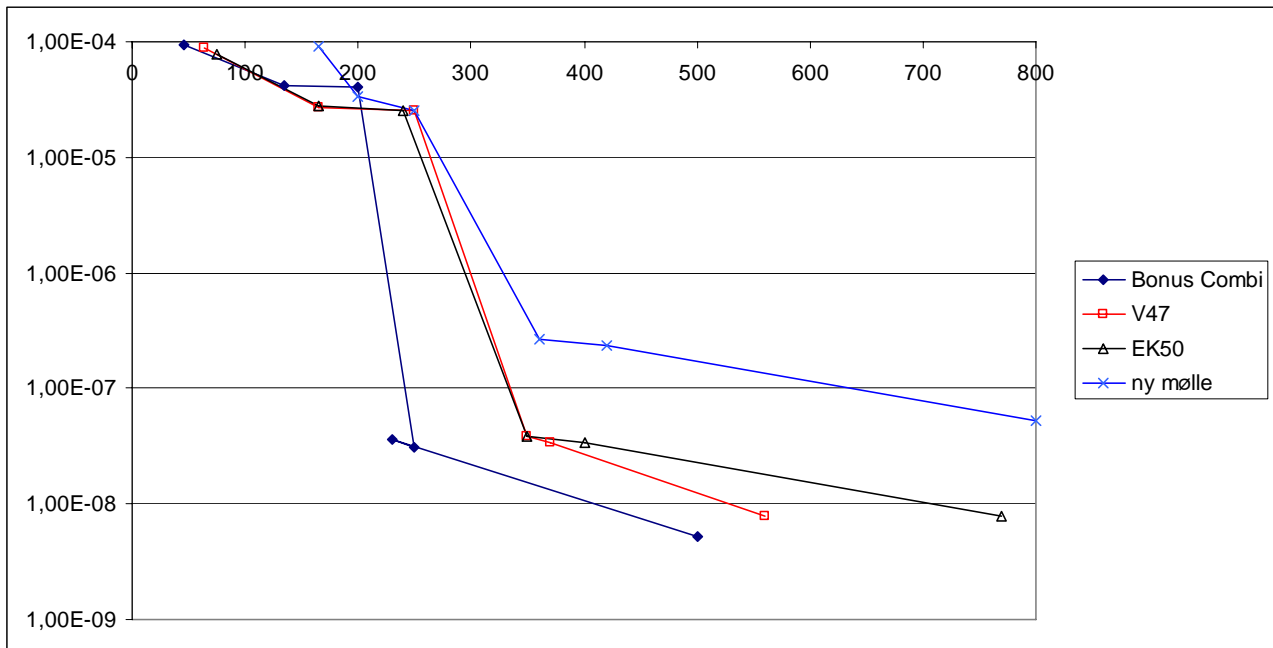
I figur B1 er vist de i tabel 8 summerede sandsynligheder pr. år for at dele af vindmøllerne ved evt. havari rammer en person, der befinder sig indenfor nedfaldsområdet, som funktion af afstanden i [m] fra vindmøllen fra tabel 9. Det ses, at sandsynligheden for at dele af vindmøllerne ved evt. havari rammer en person, som befinder sig indenfor nedfaldsområdet, er meget lille. Konturcirklerne for årlige sandsynligheder på  $10^{-6}$  fremkommer ved at finde afstanden, hvor kurverne skærer sandsynlighedsniveauet på  $10^{-6}$ .



Figur B1. Summerede sandsynligheder pr. år for at dele af vindmøllerne ved evt. havari rammer en person, der befinder sig indenfor nedfaldsområdet, som funktion af afstanden i [m] fra vindmølle.

## Bilag 2. Summerede sandsynligheder pr. år ved evt. havari eller isafkast ved overisning

I figur B1 er vist summerede sandsynligheder pr. år for at dele af vindmøllerne ved evt. havari eller isafkast ved overisning rammer en person, der befinder sig indenfor nedfaldsområdet, som funktion af afstanden i [m] fra vindmøllen. Det ses, at sandsynlighederne langt fra vindmøllen er meget små. Konturcirklerne for årlige sandsynligheder på  $10^{-6}$  fremkommer ved at finde afstanden hvor kurverne skærer sandsynlighedsniveauet på  $10^{-6}$ .



Figur B2. Summerede sandsynligheder pr. år for at dele af vindmøllerne ved evt. havari eller isafkast ved overisning rammer en person, der befinder sig indenfor nedfaldsområdet, som funktion af afstanden i [m] fra vindmølle.

### Bilag 3. Risiko for overisning

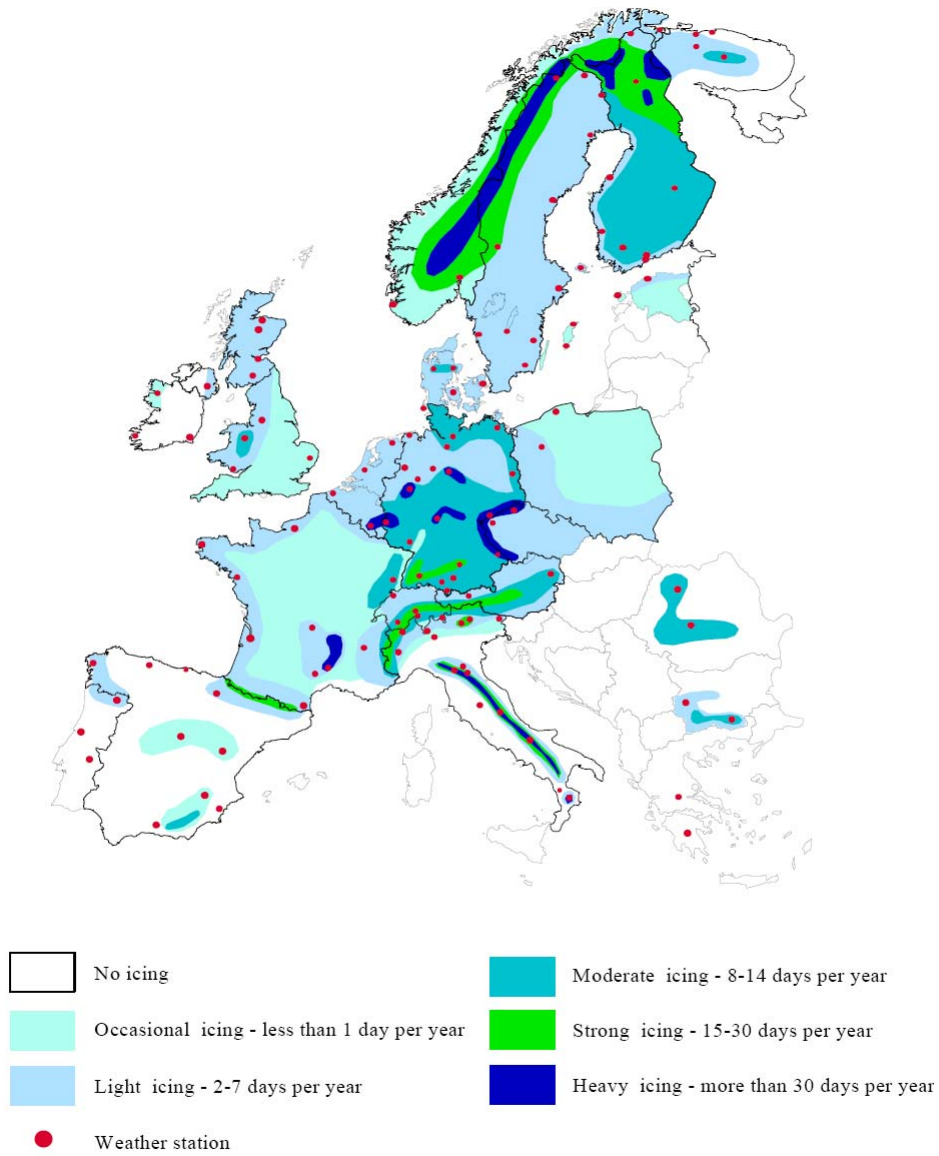


Figure 5. Icing map of Europe. [19]

Figur B3. Kort over risiko for overisning, fra [6].