



Analyse af vindrestriktioner på Storebæltsforbindelsen

Juni 2021



Indhold

1	Resumé og konklusion	4
2	Introduktion til relevant lovgivning og aktører	9
2.1	Delsystemer og tekniske specifikationer for interoperabilitet	9
2.2	Aktører	10
2.3	Jernbanevirksomhedens ansvar	11
2.4	Infrastrukturforvalterens ansvar	15
3	Analysedesign	18
4	Måling af vind	20
4.1	Måling og beskrivelse af vind	20
4.2	Håndtering af vind/storm generelt på infrastrukturen	22
4.3	Sådan måles vind og reageres på vind på Storebælt.....	22
4.4	Vindmålingen på ulykkestidspunktet i 2019.....	23
5	Er Storebælt en særlig case?	25
5.1	Vindklimaet på Storebælt i forhold til andre steder	25
5.2	Sporene på Storebælt i forhold til andre steder	29
5.3	Andre forhold på Storebæltsbroen som adskiller sig fra anden infrastruktur.....	29
6	Vindgrænser i forhold til fastgørelse	33
6.1	Fastlæggelse af A-værdien – trailer blæser ud af profil ved vindens påvirkning	33
6.2	Fastlæggelse af B og C værdi, forholdet mellem middelvind og maksimale vindstød og køredynamik	38
6.3	Fastlæggelse af D-værdien, usikkerhed ved vindmålinger	47
6.4	Fastlæggelse af V-værdierne, hvor skal vindgrænserne ligge.....	52
7	Trafikale restriktioner og konsekvenser	54
8	Hændelser	61
9	Vindskærme som barriere.....	62
10	Profilkontrol som barriere	64
11	Beredskab og vind i Banedanmark	66
12	Diskussion, klimaforandringer mv.	68
13	Videre arbejde med vind i Banedanmark	69

14	Bilag 1 Havarikommissionens beskrivelse af ulykken	71
-----------	---	-----------

1 Resumé og konklusion

Den 18. december 2019 udkom Havarikommissionen med sin undersøgelsesrapport om togulykken den 2. januar 2019, hvor lyntog 210 kolliderede med en sættevognstrailer fra godstog 9233 på Storebæltsbroen. Havarikommissionen gav samlet 4 anbefalinger i sin rapport, hvor anbefaling 3 retter sig mod Banedanmark.

Anbefaling 3:

Havarikommissionen anbefaler, at Trafikstyrelsen sikrer at Banedanmark og A/S Storebælt gennemfører analyse af behov for opdaterede sikkerhedsmæssige krav til vindrestriktioner og kvalitet af vindmålinger, samt sikre at bl.a. stormberedskabet er bekendt med de sikkerhedsmæssige grænser.

Banedanmark har med baggrund i anbefalingen indgået et samarbejde med DTU om analyse af vindforholdene på Storebæltsforbindelsen (Vestbroen). DTU har foretaget alle beregninger og har godkendt alle tekstafsnit, der indeholder afrapportering og fortolkning af beregningerne. Trafikstyrelsen har kommenteret på en ikke endelig version af analysen. A/S Storebælt¹ har været inddraget i arbejdet og har bidraget med data. Havarikommissionen har godkendt de steder, hvor Havarikommissionen er citeret.

Analysens primære konklusion

Analysen viser, at såfremt en trailer er forsvarligt fastgjort på en lommevogn, kan den ikke blæses af ved de vindgrænser, der eksisterede før ulykken på Storebælt den 2. januar 2019 eller ved de reducerede vindgrænser, der blev indført efter ulykken. For en forsvarligt fastgjort trailer er problemet ikke, at den blæser af, men at hele togvognen inklusive trailer mister sin stabilitet. Det kan ske ved vindstød på ca. 35 m/s. Det er orkanstyrke og optræder normalt kun få gange om året i Danmark.

Analysen viser ligeledes, at såfremt en trailer ikke er forsvarligt fastgjort, så skal godstrafikken for at undgå risiko for, at den blæser af, standses ved vindhastigheder under 14,2 m/s. Det skyldes, at der skal tages højde for, at der vil være vindstød, der er kraftigere end den målte gennemsnitlige vindhastighed, og at der skal tages højde for, at vinden ændrer sig fra tidspunktet for måling, til toget kører af broen. I praksis vil Banedanmark ud fra et hensyn om en ekstra sikkerhedsmargen som infrastrukturforvalter være nødt til at fastlægge en vindgrænse et sted i spændet 11 -13 m/s, hvor broen lukkes for gods og evt. en lavere værdi, hvor hastigheden nedsættes. Disse vindhastigheder optræder så hyppigt, at det vil få meget store trafikale konsekvenser for både gods- og passagertrafik, hvis der skal indføres grænser, der tager højde for, at gods ikke er forsvarligt fastgjort.

Analysen viser tilsvarende, at vindgrænsen kan fastlægges op til 26,1 m/s, såfremt trailere er forsvarligt fastgjort. Også her bør der dog lægges en yderligere sikkerhedsmargin ind, som bl.a. tager højde for ændringer i

¹ A/S Storebælt er et datterselskab i Sund & Bælt Holding A/S. Der er forskellige ejerforhold, ansættelsesforhold og ansvarsforhold i holdingselskabet. I denne rapport refereres til A/S Storebælt i alle tilfælde.

vinden. Således vurderes en vindgrænse på 25 m/s umiddelbart at være acceptabel i forhold til fastspændt gods, da man ved disse vindniveauer samtidig arbejder med Danmarks Meteorologiske Instituts (DMI) løbende varsler. Derfor er togtrafikken på Vestbroen mindre sårbar overfor pludselige ændringer i vindhastigheden ved høje vindhastigheder.

Banedanmark fastholder de nuværende reducerede vindgrænser, hvor hastigheden sættes ned ved 15 m/s, og broen lukkes for gods ved 20 m/s. Dette er begrundet i, at de nuværende vindgrænser bidrager til sikkerheden i forhold til de oprindelige vindgrænser, og at de trafikale konsekvenser er håndterbare, jf. nedenfor.

DTU konkluderede i forbindelse med Havarikommissionens undersøgelse i 2019, at vindmålerne på tidspunktet for ulykken gav et retvisende billede. Siden er der opstillet yderligere vindmålere for at øge sikkerheden omkring vindmålingerne. De grænseværdier for vind, der opstilles i denne rapport, tager endvidere højde for, at der altid vil være en måleusikkerhed.

Ved at sammenligne forskellige klimatiske lokaliteter, ses det, at Storebælt ikke i sig selv er et sted med særligt problematiske vindforhold, og der vil kunne findes lignende forhold andre steder i både den danske og den europæiske infrastruktur. Det, der specielt karakteriserer togtrafikken over Storebælt, er, at den finder sted på en bro i ca. 26 meters højde, hvor det blæser ca. 12 % kraftigere end i 10 meters højde (standardhøjde for vindmålinger). Vinden blæser desuden ofte lidt kraftigere over vand, fordi der er mindre friktion på en vandoverflade end i et kuperet landskab med forskellige forhindringer, såsom træer, buske og bygninger. Særligt når vinden er i nord, hvor der er et stort åbent stykke, vil der ofte være kraftigere vind på Storebælt end andre steder på infrastrukturen. På den anden side vil et kuperet landskab med forhindringer øge turbulensen. Den mindre friktion fra vandoverfladen giver således mindre turbulensdannelse og dermed en mindre forskel mellem vindstød og middelvinden, hvilket medfører en større forudsigelighed. For vinden betyder det samlet set, at der er et behov for at lukke for broen, når det blæser over en vis grænse, men derudover er der ikke noget særligt, der gør sig gældende for vindforholdene på Storebælt. Når der er effektive vindgrænser, vindmålere og procedurer i trafikstyringen, som der er på Storebælt, så er der således ikke noget, der i sig selv er særligt ved Storebælt.

Analysen har også forholdt sig til andre mulige særlige forhold i infrastrukturen på Storebælt. Den viser, at vedligeholdelsesstanden af sporene på broen er inden for de fastsatte regler og bedre end gennemsnittet på den danske jernbane. Samtidigt udsættes tog for et tryk i forbindelse med ind- og udkørsel af tunnelen. Imidlertid er det en påvirkning, der også gør sig gældende for tunneller andre steder. Med effektivt fastsatte vindgrænser er der således ikke nogen særlig risiko ved at køre gods over Storebæltsbroen. Gods, som ikke er fastspændt forsvarligt, vil dog have en større sandsynlighed for at blæse af på Storebælt end andre steder, da det på en blæsevejrsdag ofte er her, det blæser kraftigst. Det bør dog igen understreges, at med de vindgrænser, der er og har været på Storebælt, vil en forsvarligt fastspændt trailer ikke kunne blæses af.

Nærværende analyse tager udgangspunkt i den eksisterende ansvarsfordeling på jernbanen, jf. nedenfor. Den forholder sig således ikke til, hvordan jernbanevirksomhederne agerer i forhold til for eksempel lastning af toget.

Roller og ansvar m.v.

Den ansvarsfordeling på jernbanen, som er fastlagt i EU-reglerne, forpligter Banedanmark som infrastrukturforvalter til at sikre, at infrastrukturen er sikker. Banedanmark opstiller i den forbindelse krav, herunder tekniske krav, til jernbanevirksomhederne, når de kører på infrastrukturen. Dette omfatter bl.a. krav til, at den hastighed, der tillades, stemmer overens med forholdene, herunder vindpåvirkningen. Banedanmark kan som infrastrukturforvalter desuden træffe beslutning om nedsættelse af hastighed, lukning af Storebæltsbroen eller andet for at imødegå risici ved vindforhold m.v.

Jernbanevirksomhederne, der transporterer passagerer eller gods på banen, har på deres side bl.a. ansvaret for, at deres materiel er sikkert, herunder for godsoperatører, at godset er forsvarligt fastgjort, og at deres materiel er foreneligt med de krav og begrænsninger, som infrastrukturen stiller.

Kravene, der refereres til i relation til infrastrukturforvalteren, handler om, hvornår et tog vælter og ikke om, hvornår gods blæser af vognen. Der er i den europæiske regulering defineret specifikke krav til infrastrukturforvalteren i forhold til grænserne for sidevind. Disse krav er afhængig af, hvilken hastighed der tillades på en strækning. På Storebælt tillades der hastigheder på op til 180 km/t., hvilket indebærer, at et referencetog, der er stabilt ved 34,8 m/s sidevind ved 200 km/t (som ifølge EU-reglerne er den relevante tabelværdi), skal kunne køre sikkert på strækningen under de mest kritiske forhold. Referencetogene, som infrastrukturforvalteren i reguleringen skal forholde sig til, er passagertog. Jernbanevirksomhederne, der har godstog, skal forholde sig til infrastrukturens begrænsninger, og det indebærer således en referenceværdi på maksimalt 34,8 m/s.

Det er altså Banedanmarks ansvar, at trafikken indstilles, inden der nås vindhastigheder på 34,8 m/s, mens det er jernbanevirksomhedernes ansvar at deres materiel er sikkert ved vindhastigheder op til 34,8 m/s. Grænsen er i overensstemmelse med de empiriske observationer om, at en fastspændt trailer inklusive lommevogn ville vælte ved ca. 35 m/s, jf. ovenfor. Vindhastigheder på 34,8 m/s er orkanstyrke og optræder meget sjældent i Danmark. På andre steder på infrastrukturen håndteres vind via varsler fra Danmarks Meteorologiske Institut, hvor der via Banedanmarks "beredskabsplan storm" bl.a. iværksættes. udtynding i trafikken og lukning af strækninger. Her er argumentet primært at undgå væltede træer og nedrevne køreledninger. Faren for ulykker relateret til køreledningsanlægget og væltede træer indebærer, at trafikken altid lukkes ved 25 m/s middelvind svarende til den effektive nødvendige grænse på Storebælt for en fastspændt trailer, idet det dog blæser mindre på land. På land er processen baseret på DMI's varsler og - hvis stormberedskabet er aktiveret - af stormberedskabets løbende meldinger fra DMI. Dermed sikres også, at trafikken er indstillet inden der nås vindhastigheder ved fx springende vind i nærheden af de kritiske 34,8 m/s.

Trafikale konsekvenser

Banedanmark har i sikkerhedsbestemmelserne gældende for Storebæltsforbindelsen fastsat særlige regler for benyttelse af Storebæltsforbindelsen. Reglerne foreskriver ved hvilken vindgrænse, tog skal nedsætte hastigheden, og ved hvilken vindgrænse, togtrafikken skal indstilles. På baggrund af ansvarsfordelingen mellem infrastrukturforvalter og jernbanevirksomheder, er grænseværdierne fastsat ud fra den forudsætning, at jernbanevirksomheden har sørget for at gods er behørigt fastspændt.

De aktuelle grænseværdier medfører vindrestriktioner ca. 2% af tiden. Det er et niveau, som tillader Banedanmark at opretholde en tilfredsstillende punktlighed og kapacitet. En vindrestriktion, som er 5 m/s lavere end i dag på Storebæltsbroen, hvor hastigheden nedsættes ved 10 m/s og broen lukkes ved 15 m/s, vil få store konsekvenser. Den vil heller ikke være tilstrækkeligt til at sikre, at ikke-forsvarligt fastgjorte trailere på lommevogne ikke kan blæse af, da den beregnede grænseværdi er 14,2 m/s. Banedanmark vil endvidere være nødt til at indlægge en sikkerhedsmargin og fastsætte en grænse, som er ca. et par meter i sekundet lavere. En vindrestriktion på Storebæltsbroen, som er 10 m/s lavere end i dag, vil få meget store trafikale konsekvenser. Restriktionen vil løse problemet med ikke-fastgjorte trailere på Storebæltsbroen, men ikke i resten af landet.

Banedanmark har endvidere forholdt sig til et forslag fra branchen om at lægge begrænsninger på trafikken - bl.a. at der ikke afvikles trafik i de modsatte spor, mens der er godstog på Storebæltsbroen. Storebælt er en meget befærdet strækning, og disse forslag ville have meget store konsekvenser for både gods- og passagertrafik, hvis de blev implementeret.

Vindskærme og profilkontrolanlæg som barrierer

Sidevindsfølsomheden for tog stiger kraftigt, når hastigheden stiger. I takt med introduktionen af højhastighedstog, er opmærksomheden på aerodynamik og risikoen for, at tog vælter eller afsporer på grund af vind, blevet større. På særligt udsatte steder på det europæiske jernbanenet, og langt overvejende ved højhastighedsbaner, er der opsat vindskærme, som skærmer af for kraftig sidevind.

Opsætning af vindskærme er kostbart og nogle steder meget vanskeligt. Banedanmark estimerer, at det som udgangspunkt vil koste ca. 33.000 kr. per meter at opsætte vindskærme i den almindelige infrastruktur. Nogle steder vil det derudover kræve ændringer i sporets underbygning, ligesom der vil skulle findes særlige løsninger på broer. I nogle tilfælde kan det også blive nødvendigt at ekspropriere for at få plads til vindskærmen. Hvis der skal opsættes vindskærme, der er en sikker barriere mod, at en ikke-forsvarligt fastgjort trailer blæser af, skal vindskærme opsættes på hovedparten af de danske strækninger. Det vil blive meget omkostningsfuldt og have væsentlig betydning for dyreliv og landskabet. Desuden vil der være samme problemstilling mange steder i Europa. A/S Storebælt oplyser, at såfremt man ønsker at opsætte vindskjolde på Storebælt, skal der gennemføres omfattende beregninger af, at broen og eventuelle vindskærme kan holde til det ekstra vindtryk, der vil opstå i en kraftig storm. Banedanmark vil derfor

ikke foreslå vindskærme som løsning. Vindskærme er heller ikke nødvendige, hvis jernbanevirksomhederne iagttager deres ansvar for, at godset er fastspændt.

Profilkontrolanlæg har sensorer, der ved togets passage kontrollerer, at alt gods er indenfor læsseprofilen. Profilkontrolanlæg giver ikke nogen garanti for, at gods ikke falder af eller forskubber sig. Anlæggene fungerer alene som kontrol af, at godset på tidspunktet for passage af anlægget ikke har forskubbet sig. Anvendelse af profilkontrolanlæg vil reducere længden af den kørsel, hvor en ikke-forsvarligt fastgjort trailer er blæst ud af profilen. For at virke skal profilkontrolanlægget nå at give alarm så tidligt, at toget kan bremses inden, det møder et modkørende tog. Hvor meget risikoen kan reduceres, afhænger af hvor mange anlæg, der opsættes.

Hvis man opstiller profilkontrolanlæg i hver ende af Storebæltsforbindelsen, vil man kunne fjerne risikoen for ikke forsvarligt fastspændt gods, der er blæst ud af profil, inden det er kørt op på broen, rammer et modkørende tog på broen. Man vil ligeledes kunne sikre sig, at ikke forsvarligt fastspændt gods, der er blæst ud af profil på Storebæltsbroen, ikke rammer et modkørende tog, efter at toget er kørt i land. Det sikrer imidlertid ikke mod ikke forsvarligt fastspændt gods, der blæser ud af profil på broen, rammer et modkørende tog på broen. Ikke forsvarligt fastspændt gods kan blæse ud af profilen mange steder, og der er så meget trafik på hovedstrækningen, at det relativt hurtigt vil ramme et modkørende tog, hvis det er kommet ind i det modsatte spors profil.

Banedanmark vurderer, at man kun vil kunne fjerne en mindre del af risikoen for ulykker på Storebæltsbroen, hvor jernbanevirksomheder ikke har fastspændt godset, ved opsættelse af to profilkontrolanlæg i forbindelse med broen. Det skal tilføjes, at Havarikommissionen tidligere har vurderet, at traileren var på plads ved passage af tunnelen, og at de profilkontrolanlæg, der tidligere har været på Storebæltsbroen, derfor ikke ville have forhindret ulykken den 2. januar 2019.

Profilkontrolanlæg har udviklet sig i takt med, at der er udviklet bedre sensorteknologi. Anlæggene er blevet billigere og mere pålidelige. Banedanmarks foreløbige vurdering er, at to profilkontrolanlæg i forbindelse med Storebæltsbroen, der ikke skal bygges ind i sikringsanlægget, men giver en alarm i fjernstyringscentralen, vil koste ca. 12 millioner kroner. Hertil kommer løbende driftsomkostninger. Banedanmark arbejder videre med at udarbejde et beslutningsoplæg herom.

2 Introduktion til relevant lovgivning og aktører

2.1 Delsystemer og tekniske specifikationer for interoperabilitet

Det europæiske jernbanesystem er i interoperabilitetsdirektivet² opdelt i en række strukturelle og funktionelle delsystemer, herunder infrastruktur, rullende materiel, drift og trafikstyring, som fremgår af interoperabilitetsdirektivets bilag II.

Der er for hvert delsystem udarbejdet en teknisk specifikation for interoperabilitet (TSI), jf. interoperabilitetsdirektivet art. 4, stk. 1. En TSI er en specifikation, der er vedtaget i henhold til interoperabilitetsdirektivet, og som gælder for hvert delsystem eller hver del af et delsystem med sigte på at opfylde de væsentlige krav og sikre interoperabiliteten i EU's jernbanesystemer, jf. interoperabilitetsdirektivets art. 2, nr. 11).

På Trafikstyrelsens hjemmeside findes en oversigt over gældende TSI'er³, idet følgende TSI'er er særligt relevante for denne analyse:

- TSI Drift og trafikstyring, OPE (krav til drift og trafikstyringsregler samt faglige kvalifikationer, sprogkompetencer, sundheds- og sikkerhedsbetingelser gældende for personale, der udfører sikkerhedskritisk arbejde i forbindelse med tog, der kører over landegrænser)
- TSI Infrastruktur, INF (krav til spor, sporskifter, broer, tunneler, perroner mv. i jernbaneinfrastrukturen)
- TSI Lokomotiver og passagervogne, LOC&PAS (krav til køretøjers konstruktion, interoperabilitet og tekniske kompatibilitet med jernbaneinfrastrukturen)
- TSI Rullende materiel — godsvogne, WAG (krav til køretøjers konstruktion, interoperabilitet og tekniske kompatibilitet med jernbaneinfrastrukturen)

TSI'erne har direkte virkning i EU's medlemsstater, herunder i dansk ret, jf. TEUF-artikel 288.

Hvor interoperabilitetsdirektivet opstiller retningslinjerne for jernbanens interoperabilitet, opstiller sikkerhedsdirektivet⁴ reglerne for sikkerheden på jernbanen, herunder sikkerhedsledelsessystemer, jf. sikkerhedsdirektivets art. 9. Interoperabilitetsdirektivet og sikkerhedsdirektivet er implementeret i dansk ret ved bl.a. jernbaneloven⁵ samt bekendtgørelse nr. 147 om

² Europa-Parlamentets og Rådets direktiv (EU) 2016/797 af 11. maj 2016 om interoperabilitet i jernbanesystemet i Den Europæiske Union.

³ <https://www.trafikstyrelsen.dk/da/Jernbanesikkerhed/Regler-og-gebyrer/EU-regler#tsier>

⁴ Europa-Parlamentets og Rådets direktiv (EU) 2016/798 af 11. maj 2016 om jernbanesikkerhed.

⁵ Lov nr. 686 af 27. maj 2015 Jernbanelov.

sikkerhedsgodkendelse og sikkerhedscertifikat på jernbaneområdet med senere ændringer⁶.

Med hjemmel i jernbanelovens § 19 udgiver Banedanmark som infrastrukturforvalter trafikale regler, som gælder for alle, som kører eller på anden måde færdes på Banedanmarks infrastruktur, herunder jernbanevirksomheder. Jernbanevirksomhederne er efter jernbanelovens § 15 forpligtet til at følge disse trafikale regler, som er tilgængelige på Banedanmarks hjemmeside www.bane.dk. De trafikale regler omfatter bl.a. Lokale Sikkerhedsinstrukser (SIN-L), SR – Supplerende Sikkerhedsbestemmelser (SR SSB) og Sikkerhedsreglementet af 1975 (SR).

2.2 Aktører

Banedanmark tildeler som infrastrukturforvalter infrastrukturkapacitet til jernbanevirksomheder på Banedanmarks infrastruktur, jf. jernbanelovens § 17. I den forbindelse udarbejder Banedanmark årligt en netredegørelse, som beskriver jernbaneinfrastrukturen samt de generelle vilkår for jernbanevirksomhederne for adgang til og trafikering på Banedanmarks infrastruktur, jf. jernbanelovens § 18. Netredegørelsen findes på Banedanmarks hjemmeside www.bane.dk.

I forbindelse med tildelingen af infrastrukturkapacitet indgår Banedanmark en adgangskontrakt med jernbanevirksomheden om bl.a. betingelser for jernbanen, jf. jernbanelovens § 20. Banedanmark offentliggør derudover efter jernbanelovens § 19 sine krav til færdsel på jernbanen, og jernbanevirksomhederne skal overholde infrastrukturforvalterens krav til færdsel, jf. jernbanelovens § 15.

Overordnet gælder der et krav om, at Banedanmark som infrastrukturforvalter og jernbanevirksomhederne er ansvarlige for sikkerheden på deres respektive dele af jernbanesystemet, jf. jernbanelovens § 57, stk. 1.

Banedanmark er som infrastrukturforvalter navnlig ansvarlig for anlæg, forvaltning og vedligeholdelse af jernbaneinfrastruktur, herunder trafikstyring, togkontrol og signaler.⁷ Jernbanevirksomhederne beskæftiger sig enten med godstransport, passagertransport eller sørger alene for trækraft.⁸ Banedanmark skal have en sikkerhedsgodkendelse, jf.

⁶ Bekendtgørelse 2017-01-30 nr. 147 om sikkerhedsgodkendelse og sikkerhedscertifikat på jernbaneområdet.

⁷ En infrastrukturforvalter er i Europa-Parlamentets og Rådets direktiv 2012/34/EU af 21. november 2012 om oprettelse af et fælles europæisk jernbaneområde, artikel 3, nr. 2) defineres som: "ethvert organ eller enhver virksomhed, der navnlig er ansvarlig for anlæg, forvaltning og vedligeholdelse af jernbaneinfrastruktur, herunder trafikstyring, togkontrol og signaler; infrastrukturforvalterens funktioner på et net eller en del af et net kan tildeles forskellige organer eller virksomheder". Banedanmarks opgaver fremgår derudover af bekendtgørelse nr. 1276 af 20. november 2015 om Banedanmarks opgaver og beføjelser.

⁸ En jernbanevirksomhed er i Europa-Parlamentets og Rådets direktiv 2012/34/EU af 21. november 2012 om oprettelse af et fælles europæisk jernbaneområde, artikel 3, nr. 1) defineret som: "enhver offentlig eller privat virksomhed med licens i henhold til dette direktiv, hvis hovedaktivitet består i godstransport og/eller passagertransport med jernbane, og som er

jernbanelovens § 59, stk. 1, og jernbanevirksomhederne skal have et EU-sikkerhedscertifikat, jf. jernbanelovens § 58, stk. 1. Sikkerhedsgodkendelser udstedes af Trafikstyrelsen, jf. § 3 i bekendtgørelse 712⁹, mens en jernbanevirksomhed kan vælge, om de ønsker at få udstedt EU-sikkerhedscertifikat fra Det Europæiske Jernbaneagentur, ERA, eller fra Trafikstyrelsen, jf. § 2, stk. 3 i bekendtgørelse 712. Såfremt EU-sikkerhedscertifikatet skal dække et driftsområde i flere lande, udstedes EU-sikkerhedscertifikatet af ERA, jf. § 2, stk. 2 i bekendtgørelse 712.

Som betingelse for sikkerhedsgodkendelsen og EU-sikkerhedscertifikatet gælder et forudgående krav om, at Banedanmark og virksomhederne har implementeret et sikkerhedsledelsessystem, som bl.a. er tilpasset den enkelte virksomhed, og som kan håndtere identificerede farer og eksterne krav samt opretholde eller forbedre jernbanesikkerheden.¹⁰

Trafikstyrelsen fører som sikkerhedsmyndighed efter jernbanelovens § 55 tilsyn med, om jernbanevirksomhederne og Banedanmark overholder betingelserne for deres respektive EU-sikkerhedscertifikat og sikkerhedsgodkendelse, jf. jernbanelovens § 70.

2.3 Jernbanevirksomhedens ansvar

TSI OPE¹¹ vedrører delsystemet Drift og trafikstyring, jf. TSI OPE, artikel 1, som efter interoperabilitetsdirektivets bilag II, punkt 2.5. er defineret til at omfatte følgende:

“De procedurer med tilhørende udstyr, som giver mulighed for at sikre en sammenhængende drift af de forskellige strukturelt definerede delsystemer under både normal og uregelmæssig drift, herunder navnlig oprangering af tog og kørsel med tog samt planlægning og styring af trafikken.

De faglige kvalifikationer, som der kan stilles krav om som en forudsætning for varetagelse af enhver opgavetype inden for banetrafikken.”

TSI OPE omfatter efter bilag til TSI OPE, afsnit 2.2. “Principper”:

“Denne forordning omfatter de komponenter i delsystemet Drift og trafikstyring, hvor der er driftsmæssige grænseflader mellem

forpligtet til at sørge for trækraften; udtrykket omfatter også virksomheder, der kun leverer trækraft”.

⁹ Bek. nr. 712 af 20. maj 2020 om sikkerhedsgodkendelse, EU-sikkerhedscertifikat og sikkerhedscertifikat på jernbaneområdet.

¹⁰ Jf. § 6 i bekendtgørelse nr. 147 af 30. januar 2017. Banedanmarks nuværende sikkerhedsgodekendelse er udstedt efter bekendtgørelse 147. Bekendtgørelse 147 er efterfølgende erstattet af bekendtgørelse nr. 712 af 20. maj 2020, hvorefter fremtidige ansøgninger om sikkerhedsgodkendelse- og certifikater behandles.

¹¹ Kommissionens gennemførelsesforordning (EU) 2019/773 af 16. maj 2019 om den tekniske specifikation for interoperabilitet gældende for delsystemet Drift og trafikstyring i jernbanesystemet i Den Europæiske Union og om ophævelse af afgørelse 2012/757/EU.

jernbanevirksomheder og infrastrukturforvaltere, og hvor der især er mulighed for at fremme interoperabiliteten."

TSI OPE har med sit anvendelsesområde snitflader til bl.a. TSI INF, TSI LOC&PAS og TSI WAG, der opstiller tekniske specifikationer for hhv. infrastrukturen, passagertransporter og godstransporter. Det fremgår af bilag til TSI OPE, afsnit 2.2. "Principper" om grænsefladerne til andre TSI'er, at:

"De fleste af kravene i denne forordning vedrører processer og procedurer, men nogle af dem vedrører også fysiske elementer i køretøjer og infrastrukturen, der er vigtige for deres driftsmæssige funktion i forbindelse med denne forordning.

Disse fysiske komponenter er omhandlet i de strukturelt definerede TSI'er, der dækker andre delsystemer end delsystemet Drift og trafikstyring. De skal vurderes efter de procedurer, der er fastsat i disse TSI'er."

TSI OPE pålægger et ansvar på såvel infrastrukturforvaltere, herunder Banedanmark, som jernbanevirksomheder. TSI OPE finder anvendelse på rullende materiel, uanset om der er tale om lokomotiver, passagervogne eller godsvogne.

Det følger af TSI OPE og jernbaneloven, at det er jernbanevirksomhedens ansvar at sikre, at deres rullende materiel er egnet til at køre på den infrastruktur, som det skal køre på. Således fremgår det af bilag til TSI OPE, afsnit 4.2.2.5.1., "Kompatibilitet mellem køretøj og strækning", B):

"Jernbanevirksomheden er ansvarlig for at sikre, at alle køretøjer i dens tog, er kompatible med de strækninger, som toget skal køres på."

Desuden følger det af bilag til TSI OPE, afsnit 4.2.2.5.1., "Kompatibilitet mellem køretøj og strækning" A):

"Jernbanevirksomhedens sikkerhedsledelsessystem skal omfatte en procedure, hvormed det kan sikres, at alle de køretøjer, jernbanevirksomheden anvender, er godkendt til, registreret til og kompatible med de strækninger, som toget skal køres på, herunder de krav, som personalet skal overholde."

Det fremgår endvidere af jernbaneloven, at jernbanevirksomheden er ansvarlig for at overholde infrastrukturforvalterens specifikke krav til kørsel på den infrastruktur, som jernbanevirksomhedens rullende materiel skal køre på. Således lyder lovens § 15:

"Jernbanevirksomhederne skal overholde infrastrukturforvalterens krav til færdsel, jf. § 19, stk. 1"

Af jernbanelovens § 19, stk. 1 og 2 fremgår det:

"Infrastrukturforvalteren offentliggør sine krav til færdsel på baneafsnit, som denne forvalter.

Stk. 2.

Infrastrukturforvalteren skal stille de tekniske forskrifter, der er nødvendige for kørslen på et baneafsnit, til rådighed for jernbanevirksomhederne."

Det fremgår derudover af adgangskontrakten, jf. ovenfor, som infrastrukturforvalteren indgår med jernbanevirksomheden i forbindelse med infrastrukturkapacitet, at:

"2.7 Tekniske og trafikale regler og instruktioner

Banedanmarks regler og instruktioner stilles til rådighed for Jernbanevirksomheden.

Jernbanevirksomheden skal supplere disse med Jernbanevirksomhedens egne regler og instruktioner, før de nødvendige forudsætninger for Jernbanevirksomhedens kørsel er til stede. Banedanmarks regler og instruktioner stilles til rådighed i elektronisk format på Banedanmarks hjemmeside.

Parterne er forpligtede til at følge disse regler og instruktioner."

Banedanmark har fastsat kravene til kørsel på Banedanmarks infrastruktur i et sæt trafikale regler, som jernbanevirksomhederne således er forpligtigede til at overholde. Det betyder, at jernbanevirksomhederne skal overholde de driftsmæssige begrænsninger og netspecifikke krav for kørsel, som bl.a. fremgår af de trafikale regler i SIN-L. Der er i SIN-L bl.a. fastsat lokale regler for kørsel på Vestbroen, der gælder ved kraftig vind:

Figur 1 SIN-L restriktioner ved kraftig vind

2.2.1. **Restriktioner ved kraftig vind**

Restriktionerne i nedenstående skema gælder i tilknytning til SR § 85 uanset vindretning.

Vind *)	Restriktion		
	Godstog	Øvrige el-tog	Øvrige dieseltog
< 21 m/s	Ingen	Ingen	Ingen
21 - 24 m/s	80 km/t †)	Ingen	Ingen
25 m/s eller derover	Indstillet	Indstillet	Indstillet
*) 10 minutters middel			
†) Gælder ikke solokørende lokomotiver			

Trafikstyrelsen har efter ulykken den 2. januar 2019 påbudt Banedanmark at skærpe kravene til vindgrænser på Storebælt. Disse skærpede krav fremgår af de supplerende sikkerhedsbestemmelser (SR SSB), der sammen med SIN-L, ligeledes skal overholdes af jernbanevirksomhederne, der kører på jernbanen:

Figur 2 Supplerende sikkerhedsbestemmelser SSB 129-2020

2. **Supplerende bestemmelse til SIN-L instruks 1.4.**

I forhold til bestemmelserne i skemaet i SIN-L instruks 1.4. punkt 2.2.1. gælder ved tværvind bestemmelserne i nedenstående skema:

Vindhastighed *)	Restriktion	
	Godstog	Øvrige tog
Mindre end 15 m/s	Ingen	
Fra 15 m/s og mindre end 20 m/s	80 km/t **)	Ingen
Fra 20 m/s og mindre end 25 m/s	Trafikken indstilles **)	Ingen
Fra 25 m/s	Al trafik indstilles	

*) 10 minutters middelvind
 **) Gælder ikke lokomotiv(er) uden vogne

Jernbanevirksomheder skal således sikre sig, at deres materiel er egnet til at køre sikkert ved de vindhastigheder, der er angivet i SIN-L og SR SSB.

I den forbindelse pålægger TSI OPE jernbanevirksomhederne at sørge for, at deres gods er behørigt fastspændt, idet det af bilaget til TSI OPE, afsnit 4.2.2.4.1. "Lastens sikkerhed", fremgår at:

"Jernbanevirksomheden skal sørge for, at godsvogne er læsset på en sikker og forsvarlig måde under hele transporten."

Det fremgår af bilag til TSI OPE, afsnit 4.2.3.3.1. "Kontroller og test inden afgang", at:

"Jernbanevirksomheden skal fastsætte, hvilke kontroller og test der skal foretages for at sikre, at afgangens foregår på en sikker måde (f.eks. døre, last og bremsler)."

Det fremgår endvidere af bilaget til TSI OPE, afsnit 4.2.3.3.2., "Information til infrastrukturforvalteren om togets driftsstatus", at jernbanevirksomheden har pligt til at orientere Banedanmark som infrastrukturforvalter om enhver unormal tilstand, der vil kunne påvirke togekørslen:

"Jernbanevirksomheden skal orientere infrastrukturforvalteren om, at et tog er klar til at få adgang til nettet."

Jernbanevirksomheden skal både før togets afgang og undervejs orientere infrastrukturforvalteren om enhver unormal tilstand, der vil kunne påvirke togekørslen."

Kravene til jernbanevirksomhederne, herunder kravene om at sikre det rullende materiels egnethed til at køre på infrastrukturen, kravene til at sikre fastspændelse af gods og kravene til at informere infrastrukturforvalteren om driftsstatus, gælder parallelt med kravene til andre delsystemer, herunder krav til bl.a. Banedanmark i medfør af TSI INF, jf. nedenfor.

2.4 Infrastrukturforvalterens ansvar

Banedanmark er som infrastrukturforvalter ansvarlig for infrastrukturen, bl.a. efter reglerne i fastsat i TSI INF¹². TSI INF finder anvendelse på delsystemet Infrastruktur på al ny, opgraderet eller fornyet infrastruktur, jf. TSI INF-artikel 1 og artikel 2, stk. 1.

Delsystemet Infrastruktur er efter interoperabilitetsdirektivet bilag II, punkt 2.1. defineret til at omfatte følgende:

"Spor, sporskifter, niveauoverkørsler, bygværker (broer, tunneler mv.), de banegårdselementer, der er knyttet til togtrafikken (f.eks. indgange, perroner, adgangsområder, serviceområder, toiletter og informationssystemer samt disse elementers tilgængelighed for personer med handicap og personer med nedsat mobilitet), og sikkerheds- og beskyttelsesudstyr."

TSI INF stiller krav om, at Banedanmark som infrastrukturforvalter implementerer de nødvendige procedurer vedrørende forvaltning af sikkerheden i overensstemmelse med kravene i TSI INF i Banedanmarks sikkerhedsledelsessystem, jf. TSI INF, afsnit 2.5. "Relation til sikkerhedsledelsessystemet".

TSI INF fastsætter krav om interoperabilitet i relation til sidevind, idet det fremgår af pkt. 4.2.10.2.:

"4.2.10.2. Effekter af sidevinde

- 1) *En strækning er interoperabel med hensyn til sidevind, hvis det er sikkert for et referencetog at køre ad strækningen under de mest kritiske driftsforhold.*
- 2) *Reglerne for dokumentation af overensstemmelse skal tage højde for referencetogenes karakteristiske vindkurver som fastsat i TSI'en om lokomotiver og passagertog.*
- 3) *Hvis der enten pga. geografiske forhold eller andre særlige træk ved strækningen ikke kan skabes sikkerhed uden brug af dæmpningsforanstaltninger, skal infrastrukturforvalteren træffe de nødvendige foranstaltninger for at opretholde sikkerheden, f.eks. ved:*
 - *lokalt at reducere toghastigheder, eventuelt midlertidigt i perioder med risiko for storm*
 - *at installere udstyr, der beskytter den pågældende sporstrækning mod sidevinde, eller*
 - *at træffe andre passende foranstaltninger.*
- 4) *Det skal dokumenteres, at foranstaltningerne har skabt sikkerhed."*

¹² Kommissionens forordning (EU) nr. 1299/2014 af 18. november 2014 om de tekniske specifikationer for interoperabilitet gældende for delsystemet Infrastruktur i EU's jernbanesystem.

Der er for lokomotiver og passagertog fastsat regler for, hvornår et referencetog anses at opfylde sidevindskravene. Disse regler fremgår af TSI LOC&PAS¹³, jf. TSI'en fra 2008.

"4.2.6.3 Sidevinde

Et tog anses for at opfylde sidevindskravene, hvis dets karakteristiske vindkurver (CWC: som defineret i bilag G) i togets mest vindfølsomme vogn er større eller mindst lig med et sæt karakteristiske referencevindkurver (CRWC).

CRWC-sættet, der skal bruges til overensstemmelsesvurderingen af det rullende materiel, angives i tabel 11, 12, 13 og 14 for klasse 1-vogne, for hvilke de karakteristiske vindkurver (CWC) skal beregnes i henhold til den metode, der er beskrevet i bilag G.

Grænseværdier og tilhørende metoder for klasse 1-tog med kurvestyring og klasse 2-vogne er et udestående punkt.

Figur 3 TSI LOC&PAS

Tabel 11

Karakteristiske referencevindhastigheder til vinklen $\beta_w=90^\circ$ (vogn på lige spor med en lateral, ukompenseret acceleration: $a_q = 0 \text{ m/s}^2$).

Togets hastighed	Karakteristisk referencevindhastighed til eksemplet med flad jord (uden ballast og skinner) i m/s	Karakteristisk referencevindhastighed til eksemplet med dæmninger i m/s
120 km/h	38,0	34,1
160 km/h	36,4	31,3
200 km/h	34,8	28,5
250 km/h	32,8	25,0
trin på 50 km/h op til $v_{tr,max}$	se strækninger nedenfor	se strækninger nedenfor

Af det omtalte bilag G fremgår det:

"Den kritiske hændelse i denne henseende er, at toget vælter. Interoperable tog skal have et grundlæggende sikkerhedsniveau i forhold til denne kritiske hændelse. Togets bidrag til sikkerhedsniveauet er defineret af et sæt karakteristiske referencevindkurver (Characteristic Reference Wind Curves (CRWC)).

Et tog kan betragtes som interoperabelt, for så vidt angår sidevind, hvis de karakteristiske vindkurver (CWC) er mindst lige så gode som CRWC. Et givet tog defineres af den mest kritiske vogn. Sædvanligvis er denne vogn togets forreste eller bageste vogn. Hvis en anden vogn i toget anses

¹³ Kommissionens forordning (EU) nr. 1302/2014 af 18. november 2014 om en teknisk specifikation for interoperabilitet gældende for lokomotiver og rullende materiel til passagertog i delsystemet Rullende materiel til jernbanesystemet i Den Europæiske Union (herefter: TSI LOC&PAS"). TSI LOC&PAS henviser i afsnit 7.1.1.7. til TSI'en fra 2008 omhandlende højhastighedstog (Kommissionens beslutning af 21. februar 2008 om en teknisk specifikation for interoperabilitet for delsystemet »rullende materiel« i det transeuropæiske jernbanesystem for højhastighedstog) TSI'en fra 2008 er ikke længere gældende, men afsnit 4.2.6.3, Sidevinde, finder fortsat anvendelse, jf. forordning nr. 1302/2014 § 11, stk. 2.

for at være mere vindfølsom (f.eks. meget høj eller let), skal der tages højde for dette. Valget af den mest følsomme vogn skal begrundes fuldt ud."

Det følger således af EU-reglerne, at infrastrukturforvalterens fastsættelse af sidevind skal ske under hensyntagen til, hvornår et tog vil vælte og ikke til, hvornår eksempelvis gods blæser af vognen.

Da den højeste tilladte hastighed på broen er 180 km/t for passagertog, er den referenceværdi, som Banedanmark - ifølge tabellen ovenfor fra TSI LOC&PAS - skal iagttage ved fastsættelse af regler for kørsel under sidevind, 34,8 m/s og 200 km/t, jf. TSI INF 4.2.10.2. Effekter af sidevinde, pkt. b.

Ansvarsfordelingen mellem Banedanmarks og jernbanevirksomhederne er således, at Banedanmark skal sikre, at trafikken indstilles, inden der nås vindhastigheder på 34,8 m/s, mens det er jernbanevirksomhedernes ansvar, at deres materiel er sikkert fastspændt ved denne vindhastighed.

Referenceværdien på 34,8 m/s ved 200 km/t er, som ovenfor nævnt, på Storebælt yderligere omsat til konkrete instrukser i SIN-L og SR SSB, hvor Banedanmark har opstillet lokale begrænsninger for kørsel ved sidevind, sådan at al kørsel indstilles ved 25 m/s. Derudover gælder det, at kørsel med godstog indstilles ved 20 m/s, og hastigheden reduceres til 80 km/t ved 15 m/s, jf. SIN-L og SR SSB.

Der er ikke fastsat tilsvarende referenceværdier for sidevinde, der gælder for godsvogne, i eksempelvis TSI WAG. Godsvogne må maksimalt køre 120 km/t, hvor passagertog må køre op til 180 km/t. Godsvogne regnes på grund af den lavere kørselshastighed generelt for mindre vindfølsomme end passagertog. Det kan således rimeligvis forudsættes, at når grænseværdierne for sidevind i TSI LOC&PAS gældende for passagertog er opfyldt, vil dette også være tilfældet for godsvogne. Derudover har Banedanmark gennem Banedanmarks trafikale regler indført, at al kørsel med godsvogne indstilles ved 20 m/s på Storebælt, og at hastigheden nedsættes til 80 km/t allerede ved vindhastigheder på 15 m/s, jf. SR SSB. Det fratager dog ikke jernbanevirksomhederne for deres ansvar for at deres rullende materiel er egnet til at køre på den infrastruktur, som det skal køre på, jf. ovenfor.

3 Analysedesign

Havarikommisionen konkluderede i sin rapport efter ulykken på Storebælt, at en trailer på denne type lommevogn med den konkrete låsetype ikke kunne være blæst af ved de vindgrænser, der var gældende dengang, hvis den havde været vedligeholdt efter leverandørens forventninger, og dermed kunne låse som låsen var designet til.

I samme rapport kom DTU frem til, at en tom ikke-forsvarligt fastgjort trailer kan blæse af ved en vindpåvirkning på 21,8 m/s. På tidspunktet for ulykken var vindgrænsen, hvor broen lukkedes, 25 m/s. Der var således forventeligt, at en tom ikke-forsvarligt fastgjort trailer kunne blæse af. Siden er vindgrænsen sat ned til 20 m/s. Det er imidlertid en værdi, der måles som et gennemsnit over ti minutter, så der vil være kraftigere vindstød. Desuden er der påvirkninger af rystelser fra underlag og ophæng samt påvirkning fra fartvinden. Endeligt tager det også tid at tømme broen, efter den fastsatte grænseværdi er nået. Da en ikke-forsvarligt fastspændt trailer blæste ud af læsseprofilet den 13. januar 2021, var det således ikke uventet, at det kunne være konsekvensen, hvis godset ikke af jernbanevirksomheden var forsvarligt fastgjort.

Ansvarsfordelingen på jernbanen fastlægges i europæisk og dansk lovgivning. Denne analyse tager udgangspunkt i den aktuelle ansvarsfordeling på jernbanen, jf. afsnit 2-4 ovenfor, og beregner, hvor vindgrænsen bør ligge jf. denne ansvarsfordeling (angivet som V1 nedenfor). Analysen beregner ligeledes, hvor vindgrænsen skulle ligge såfremt ansvarsfordelingen ændres, således at infrastrukturforvalteren skulle fastlægge vindgrænser, der skulle tage højde for, at gods ikke nødvendigvis skulle være forsvarligt fastgjort af jernbanevirksomhederne (angivet som V2 nedenfor). Beregningen tager udgangspunkt i de niveauer, hvor henholdsvis en forsvarlig fastgjort trailer og en ikke-forsvarligt fastgjort trailer blæser ud af læsseprofilet alene på grund af vindens påvirkning (værdien A), og så regner den de øvrige faktorer ind, der bidrager til at påvirke togets stabilitet (faktorerne B, C, D og E).

V1: Vindgrænse, hvis vi kan regne med at trailer er forsvarligt fastgjort

V2: Vindgrænse, hvis vi ikke kan regne med at trailer er forsvarligt fastgjort

$$A * B * C * D = V$$

A: vindhastighed hvor en trailer kan skubbes ud af profil, målt i m/s (her beregnes en A1 og en A2)

B: gennemsnitsvindhastighed over 10 minutter/maksimal vindhastighed af vindstød (værdi mellem 0-1)

C: (sideværts påvirkning af rystelser) $\frac{1}{(C1)_{\text{sporbeliggenhed}}}$ * (C2)hjul + ophæng * (C3)hastighed (værdi mellem 0-1)

D: Usikkerhed ved vindmålinger (værdi mellem 0-1)

A-, B-, C- og D-værdierne giver tilsammen den vindgrænse man forsvarligt kan fastlægge, hvis en trailer henholdsvis er forsvarligt fastgjort eller ikke-forsvarligt fastgjort, V1 og V2. Den tager imidlertid udgangspunkt i de værdier, der er målt og har således ikke en værdi for den variation, der vil være i vinden, i den tid det tager fra en alarm er gået, til broen er tømt. Denne teoretiske værdi vil korrelere med B-værdien, så det er vanskeligt at fastlægge den uden at regne den samme variation med to gange. Endvidere vil store, hurtige ændringer i vinden i forbindelse med kraftig vind ofte være forbundet med stærke storme, som under alle omstændigheder håndteres via DMI's varsler og Banedanmarks "beredskabsplan storm". Ikke desto mindre bør den faktiske vindgrænse lægges lidt lavere end den udregnede V-værdi. Dette gælder i særlig grad for den lave værdi, V2, da denne ligger så lavt at vinde af denne styrke, ikke vil give anledning til stormvarsling fra DMI.

Inden selve analysen, gennemgås målinger af vind, herunder hvorvidt der er noget særligt ved jernbaneinfrastrukturen på Storebælt, i forhold til hvad der kan forventes af jernbaneinfrastruktur.

Efter fastlæggelsen af de to vindgrænser for henholdsvis forsvarligt fastspændt gods og ikke-forsvarligt fastgjort gods, gennemgås de trafikale konsekvenser af at fastlægge vindgrænser efter, at gods ikke skal være forsvarligt fastgjort. Derefter gennemgås, hvad der kendes af tilsvarende hændelser på den europæiske jernbaneinfrastruktur, hvad der er af muligheder for at opstille tekniske barrierer, og hvordan vind håndteres beredskabsmæssigt.

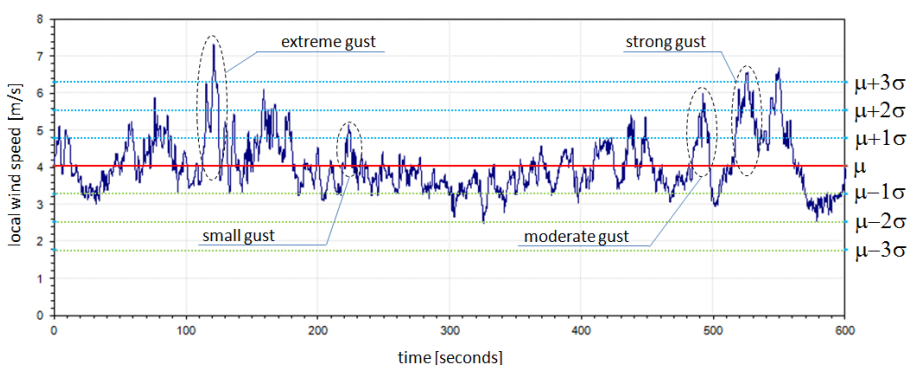
4 Måling af vind

4.1 Måling og beskrivelse af vind

Vindklimaet ved et bestemt sted bliver som regel beskrevet gennem variationen af vindens hastighed og hyppigheden af den retning, som vinden kommer fra. Den tids-rumlige variation af vindhastigheder betegnes ofte turbulens og mærkes som vindstød af forskellig styrke og beskaffenhed. Variationen af vindhastigheden sker på grund af forskellige forhold i atmosfæren og afhænger af det lokale terræns beskaffenhed. Vindhastigheden ændrer sig som funktion af højden af observationspunktet over terrænet, og generelt kan man sige, at jo mere fladt terrænet er, jo mindre er variationen af vindhastigheden. Her over vand vil der således som hovedregel være mindre variation end på land.

Selve variationens karakteristik kan matematisk beskrives som en kombination af bølger med forskellige bølgelængder og amplitude (styrke). Figur 4 viser et typisk forløb af vindhastigheden over et tidsrum på 10 minutter. Ved at forestille sig kurven som en kombination af forskellige bølger, kan tidsforløbet på Fig. 4 deles op i faser med en udpræget langbølget variation og andre faser karakteriseret med meget kortvarige svingninger. Et yderlige kendetegn af variationerne er amplituden af de forskellige bølger. En varierende proces kan statistisk beskrives gennem dens gennemsnitsværdi (μ), standardafvigelse (σ) eller variation (σ^2), og fordelingsformen af de enkelte værdier omkring en middelværdi (histogram).

Figur 4 Eksempel på variation af vindhastighed i løbet af et 10 minutters tidsrum.



I forhold til middelvinden betragtes afvigelser af de øjeblikkelige hastigheder fra middel- eller gennemsnitsværdien som et resultat af turbulensen i atmosfæren. Når størrelsen af variationen overstiger et vist niveau, er der tale om vindstød, mens småforstyrrelser betragtes som baggrundsturbulens. Kraftige vindstød er oftest associeret med relativt kortvarige variationer. I Fig.4 er vindstød af forskellige styrke illustreret med standardafvigelsen σ , hvor et lille vindstød afviger med omkring 1σ fra middelværdien, mens ekstreme vindstød afviger med mere end 3σ . Som det ses på Fig. 4, taler man om små, moderate, stærke og ekstreme vindstød.

Vindhastighedens rumlige og tidslige variation er karakteristisk for et bestemt sted. Et eksempel på dette er turbulensintensiteten, defineret som forholdet mellem standardafvigelsen og middelværdien af vindhastighed ($I_u = \sigma/\mu$), som vokser med terrænets ruhed. Når man kigger på turbulensintensitet i 10 meters højde (meteorologisk standardhøjde for målinger), er det lavt over vandområder og størst over bebyggede områder (for eksempel bycentre). Også fordelingen af de bølger, som variationen beskrives med, har et unikt fingeraftryk på et bestemt sted. Bidrag fra hver eneste bølge med dens specifikke bølgelængde (eller omvendt dens frekvens) og tilhørende amplitude er illustreret i et såkaldt vindhastighedsspektrum. Generelt opfatter man frekvenser (eller bølgelængder) som udtryk for vindstødets geometriske størrelse. Størrelsen er dog ikke entydigt lig med styrke, og derfor er det tit små vindstød eller hvirvler, som kan give store, men kortvarige belastninger.

Måling af vind foregår i Danmark traditionelt ved en måling over ti minutters gennemsnit. Dette er DMI's standard (se J. Cappelen: 'Danmarks Klima 2018', DMI Rapport 19-01). Man kunne i princippet lægge et hvilket som helst tidsinterval ind som gennemsnit. Ligegyldigt hvilket tidsinterval man benytter, vil det imidlertid være nødvendigt at forholde sig til det lokale vindklima, for at få et præcist billede af variationen fra gennemsnittet. Fordelen ved at benytte DMI's standard er, at det skaber en sammenlignelighed i forhold til DMI's prognoser og målinger på tværs af landet, og at det mindsker risikoen for fejl.

Der findes en række instrumenter til bestemmelse af vindhastigheder. På Storebælt benyttes et ultrasonisk anemometer, som både måler vindhastighed og vindretning. Ultrasoniske anemometre kan tage målinger med meget fin tidsopløsning, 20 Hz eller bedre, hvilket gør dem velegnede til turbulensmålinger. Manglen på bevægelige dele gør dem egnede til langvarig brug i udsatte automatiserede vejrstationer, hvor nøjagtigheden og pålideligheden af traditionelle kop- og vinge-anemometre påvirkes negativt af salt luft eller støv. Deres største ulempe er forvrængning af luftstrømmen af strukturen, der understøtter transducerne, hvilket kræver en korrektion baseret på vindtunnelmålinger for at minimere effekten. Til kalibrering benyttes en standardiseret testmetode (ISO 16622:2002). Usikkerheden for det aktuelle anemometer på Storebæltsbroen indgår direkte i det udviklede formeludtryk for de reviderede vindgrænser, og vil blive behandlet i afsnit 6.3.

I denne analyse benyttes vindklimaet for Storebælt til at beregne de nødvendige vindgrænser. Værdierne i analysen sættes konservativt, således at de nødvendige tolerancer, der sætter grænsen for hvornår togtrafikken indstilles, ikke sættes for højt. Banedanmark, DTU og A/S Storebælt fortsætter imidlertid sammen om at samle så detaljerede vinddata for Storebælt, således at vindklimaet kan beskrives i endnu større detaljeringsgrad.

4.2 Håndtering af vind/storm generelt på infrastrukturen

Banedanmark Infrastruktur Forst (herefter "Forst") ejer stormberedskabet, der er en del af Banedanmarks Ledelsessystem. Når Forst vurderer, at der skal oprettes et beredskab, kontaktes Driftscenter Danmark. Omvendt skal Driftscenter Danmark kontakte Forst, hvis det vurderes at der bør oprettes et beredskab. Banedanmarks Driftscenter modtager varsel fra DMI. Ud fra DMI's varsel underrettes berørte fjernstyringscentraler og jernbanevirksomhederne om kommende ændret beredskabsniveau. Jernbanevirksomhederne, som ikke er fysisk til stede, underrettes pr. mail eller telefon. I en situation hvor DMI varsler storm med en højere middelvind end 21 m/s og med vindstød op til 32 m/s, indkalder vagthavende trafikleder alle relevante parter til orienterende strategimøde. På strategimødet deltager bl.a. vagthavende DMI og vagthavende fra A/S Storebælt. Strategimødet har til formål at fastlægge en trafikal strategi, der håndterer DMI's varsel om storm.

4.3 Sådan måles vind og reageres på vind på Storebælt

Måleudstyret til måling af vind på Storebæltsforbindelsen ejes af A/S Storebælt. Udstyrets funktionalitet og målingerne overvåges af A/S Storebælts Teknisk Overvågning. På tidspunktet for ulykken i 2019 var opsat 2 målestationer på henholdsvis

- Vestbroen bropille 20 (Sydsiden)
- Vestbroen bropille 44 (Sydsiden).

I forlængelse af ulykken blev der opsat yderligere en vindmåler på

- Sprogø (spr- vejstation)

De 2 vindmålere på Vestbroen er placeret på sydsiden af vejbroen. Alle 3 vindmålere er placeret i samme højde og de indgår alle i Storebælts anlæg for målinger af vind ift. jernbanetrafik på Vestbroen. Der er efterfølgende suppleret med yderligere vindmålere placeret således:

- På hver tunnelportalbygning
- Vestbroen bropille 21 (Nordsiden)
- Vestbroen bropille 41 (Nordsiden)

Disse vindmålere vil efter kalibrering indgå i målingerne.

Det er altid den højeste målte værdi af vejrstationernes vindmålinger, som indgår i 10 min. middelvind i m/s, som sætter alarmerne for "kraftig vind". Denne alarm optræder i delanlæg TTO (TogTrafikalOvervågning), som er placeret hos Banedanmark i fjernstyringscentralen i Roskilde. Den 10 min. middelværdi fremkommer som rullende 1 minuts middelværdi i m/s.

Ved de fastsatte værdier på 15 m/s, 20 m/s og 25 m/s gives en alarm. Ud fra den givne alarm iværksætter fjernstyringslederen trafikale restriktioner jf. bestemmelserne i SIN-L og SSB 129-2020.

Ud fra DMI's varslings og i dialog med Teknisk Overvågning hos A/S Storebælt planlægges iværksættelse af trafikale tiltag så tidligt som muligt under opbygning af et kraftigt blæsevejr. Første step er at nedsætte hastigheden for godstog til 80 km/t. Efterfølgende indstilles godstrafikken. Med en hastighed på 80 km/t tager det et godstog ca. 20 minutter at køre fra Korsør til Nyborg og ca. 10 minutter fra Nyborg til Sprogø. I værst tænkelige situation vil der være en reaktionstid på 20 minutter inden broen er rømmet for godstog. Godstog parkeres efterfølgende på de begrænsede muligheder infrastrukturen har. Det er vigtigt at der i god tid inden togstop gives besked til jernbanevirksomhederne at godstog skal tilbageholdes på terminalerne samt i Sverige og Tyskland.

4.4 Vindmålingen på ulykkestidspunktet i 2019

DTU konkluderede i de vindtunnelforsøg, som DTU udførte i forbindelse med Havarikommissionens undersøgelse efter ulykken i 2019, at vinddata fra vindmålerne var retvisende i forhold til den frie luftstrøm foran broen. Friktionen og evt. turbulens dannet ved vindens bevægelse tværs over brodækket havde ingen signifikant betydning for vindmålingen. Dette resultat er siden draget i tvivl af DB Systemtechnik, der i sin rapport vedr. vindmålingernes kvalitet¹⁴ kom frem til, at vindmålingerne ikke er retvisende.

DB Systemtechniks rapport bygger på en computersimuleret model af vind hen over lavbroen. DB Systemtechnik omtaler selv modellen som en forenklet simulering, hvor der er foretaget forenklinger af broens geometri og egenskaber ved vind, bølger og overfladers egenskaber. På baggrund af modellen foretager DB Systemtechnik simuleringer af vindens hastighed foran broen (nord), og der hvor vindmålerne står på sydsiden af broen. DB Systemtechnik når frem til, at den faktiske vindhastighed foran broen kun kan beregnes ud fra måleværdierne med en usikkerhed på omkring 30 %.

DB Systemtechniks resultater adskiller sig fra de konklusioner, som DTU er kommet frem til i Havarikommissionens rapport. DTU's konklusioner i Havarikommissionens rapport er fremkommet på baggrund af forsøg med konkrete vindmålinger udført af DTU med en skalamodel af fem brofag udført i Force Technologys atmosfæriske grænselags vindtunnel med en standard søprofil (Eurocode kategori 0).

Der er fordele og ulemper ved computersimulering såvel som ved vindtunnelforsøg. En del af forklaringen på de forskellige resultater kan ligge i de antagelser og forenklinger, der er lagt ind i computersimuleringen, men der er naturligvis også forskel på virkeligheden og det resultat, der fås ved et vindtunnelforsøg.

¹⁴ 19-58066-TT.TVE34(2)-AP2.3

DTU påpeger endvidere, at der er en række unøjagtigheder i DB Systemtechniks rapport bl.a., at DB Systemtechniks beregninger er ikke konvergeret, og at DB Systemtechnik benytter tidsafhængigheden i deres ikke-konvergerede løsning som mål for faktiske vindhastigheder. Det kan man ifølge DTU ikke, da der ikke er noget belæg for dette. I stedet bør der ifølge DTU benyttes en tidsinstationær beregningsmetode, som er noget mere beregningstung, men meget mere korrekt.

DB Systemtechnik refererer endvidere i rapporten til 'kop-anemometre', som ikke benyttes på Storebæltsbroen. På Storebæltsbroen anvendes såkaldte 'sonics', som benytter ultralyd til at bestemme vindhastigheden. Sonics måler alle hastighedskomponenter, og har derfor ikke problemet med kun at måle den vandrette hastighed. Det monitor-punkt, som benyttes i CFD-beregningerne sidder derudover ca. ½ meter for lavt i forhold til den faktiske placering af anemometret. I rapporten er det angivet til at være 4 meter over brodækket, mens det reelt sidder 4.5 meter over dette. Da der er store gradienter i dette område, er validiteten af konklusionerne fra beregningerne vedrørende placeringens indflydelse på målingerne tvivlsom.

Siden Storebæltsulykken er der først sat yderligere en vindmåler op på Sprogø og siden to yderligere vindmålere op på lavbroens nordside.

Der vil altid være vindfænomener, der har en meget lokal karakter. Der kan således være forskelle mellem den målte værdi og den værdi, et tog udsættes for nogle få hundrede meter væk. Banedanmark vurderer dog, at vindmålerne var retvisende før ulykken og med de ekstra opsatte vindmålere, er målingerne endnu mere præcise i dag.

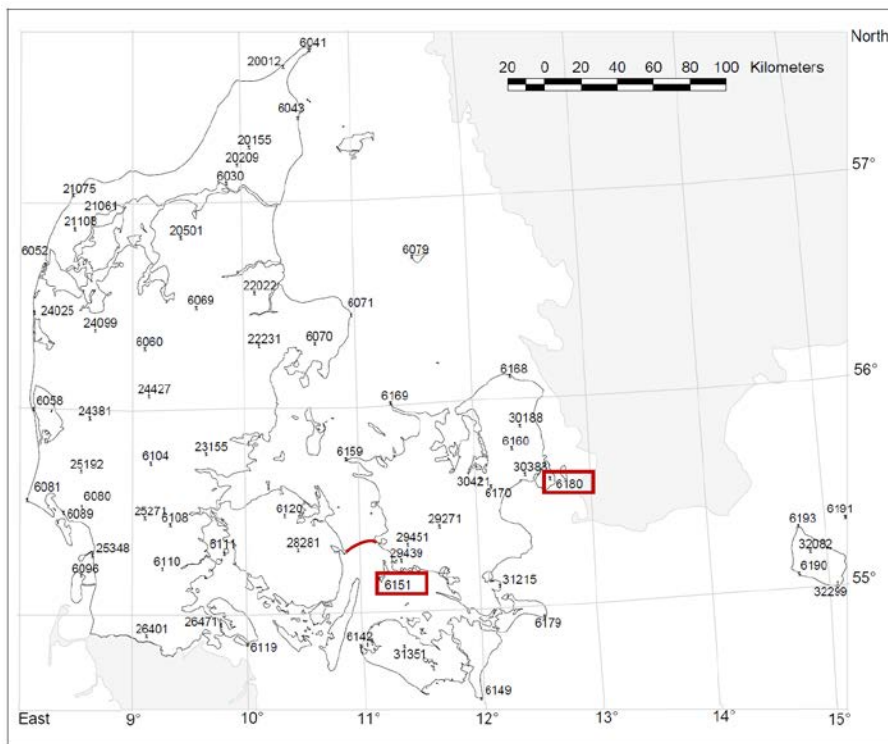
5 Er Storebælt en særlig case?

5.1 Vindklimaet på Storebælt i forhold til andre steder

Det lokale vindklima karakteriseres generelt ved analyse af vindens turbulente indhold, som er karakteristisk for vindforholdene tæt ved jordens overflade. Denne karakteristik er typisk beskrevet over et tidsvindue på 10 minutter (se afsnit 4.1). Men karakteristikken rækker længere ud end 10 minutter. Man vil typisk samle fortløbende data som 10 minutters gennemsnitsværdier og hermed beskrive vindens forløb over lange perioder, såsom årtider eller over flere årtier. Jo længere observationerne rækker tilbage i tiden, jo mere nøjagtigt kan et lokalt vindklima bestemmes. Der findes desværre ikke præcise målinger over lang tid på Storebæltsbroen. I nærværende analyse interesserer vi os for, om der er særlige vindforhold – uforudsigelighed eller mere turbulens – og om der er kraftigere vind på Storebælt end andre steder.

For at undersøge om vindklimaet ved Storebæltsbroen er specielt set i forhold til vindstyrker oplevet af køretøjer, som krydser broen, kan man sammenligne klimaet ved broen med andre lokale vindklimaer, hvor man kunne forvente en naturlig eksponeret karakteristik. Når der er tale om oplevelsen af vinden, spiller de faktiske forhold, hvor vinden opleves, en stor rolle. På Vestbroen er kørebaner og togskiner omkring 26m over havoverfladen, hvilket giver en betydelig eksponering til vinden. Over havet er vindhastigheden i 26m ca. 12% højere end den, der måles i 10 meters højde (standardhøjde for vindmålinger). For vindens virkning på køretøjer betyder det, at kraftpåvirkningen stiger med 25% i 26m.

Figur 5 Kort over DMIs målestationer (Cappelen og Jørgensen, 1999).¹⁵ Vindforhold i Storebælt er repræsenteret ved station 6151 Omø Fyr og sammenlignet med 6180 Kastrup Lufthavn.



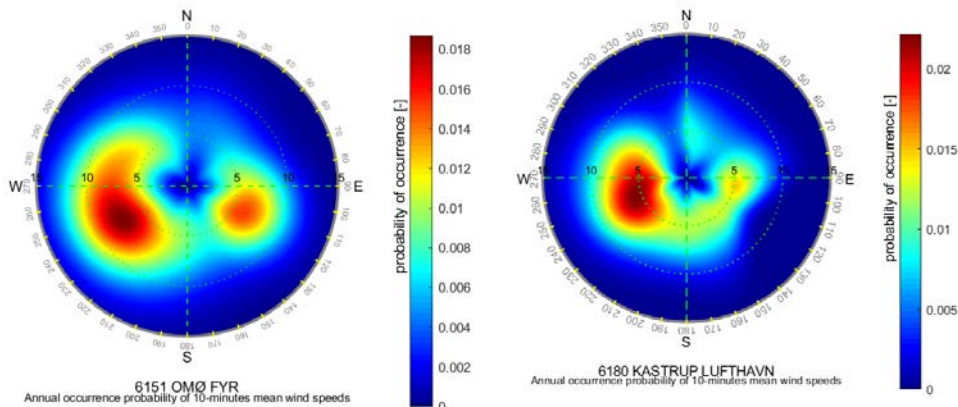
I Cappelen og Jørgensen (1999) findes statistisk information om vindklima ved officielle målestationer af Danmarks Meteorologisk Institut (DMI). Dataene er ikke korrigeret for målehøjden. Sammenligning af vindforhold i Storebælt med andre områder baseres derfor på stationer med lignende forhold. Udgangspunktet er station 6151 Omø Fyr, som er repræsentativ for Storebælt. Målemasten ligger tæt ved stranden med åbent hav mod syd, vest og nord og fladt land mod øst. Lignende forhold findes ved station 6180 Kastrup Lufthavn, som er et eksempel på landbaserede målinger nær en jernbane og en anden stor ikonisk bro med togtrafik, som angivet i Fig. 5. For begge stationer er vindhastighederne for alle vindretningssektorer målt året rundt over en periode af 20 år.

Plottene er interessante i og med, at de er baseret på et meget omfattende datagrundlag, og fordi Omø Fyr ligger så tæt på Storebæltsbroen, at den kan fungere som proxy for måling på broen. Vindklimaet ved Kastrup Lufthavn ligner i mange henseender klimaet ved Omø Fyr. Hovedforskellen er at vindhastighederne generelt er mindre, hvilket er forventeligt når målestationen ligger på land. Der kan således opleves de samme vindhastigheder ved Kastrup Lufthavn som på Storebælt, men det vil ske sjældnere.

¹⁵ Cappelen, J., Jørgensen, B., 1999. „Observed Wind Speed and Direction in Denmark – with Climatological Standard Normals, 1961-90“ Danish Meteorological Institute (DMI), Ministry of Transport, Technical Report 99-13, ISSN 0906-897X (printed version), ISSN 1399-1388 (online version)

De resulterende sandsynligheder for størrelse og retning af vinden er vist i polaragrammet, Fig. 6, hvor vindhastigheden er givet på radialaksen og sandsynlighedsværdier er indikeret i farveskala. I diagrammet ses samtidigt både hyppigste vindretninger og de hyppigste vindhastigheder. Ved direkte sammenligning af stationerne ved Kastrup Lufthavn og Omø Fyr, er de mulige forskelle og ligheder tydeligt observerbare.

Figur 6 Sammenligning af det årlige vindklima ved station 6151 Omø Fyr, som reference til Storebælt, og station 6180 Kastrup Lufthavn



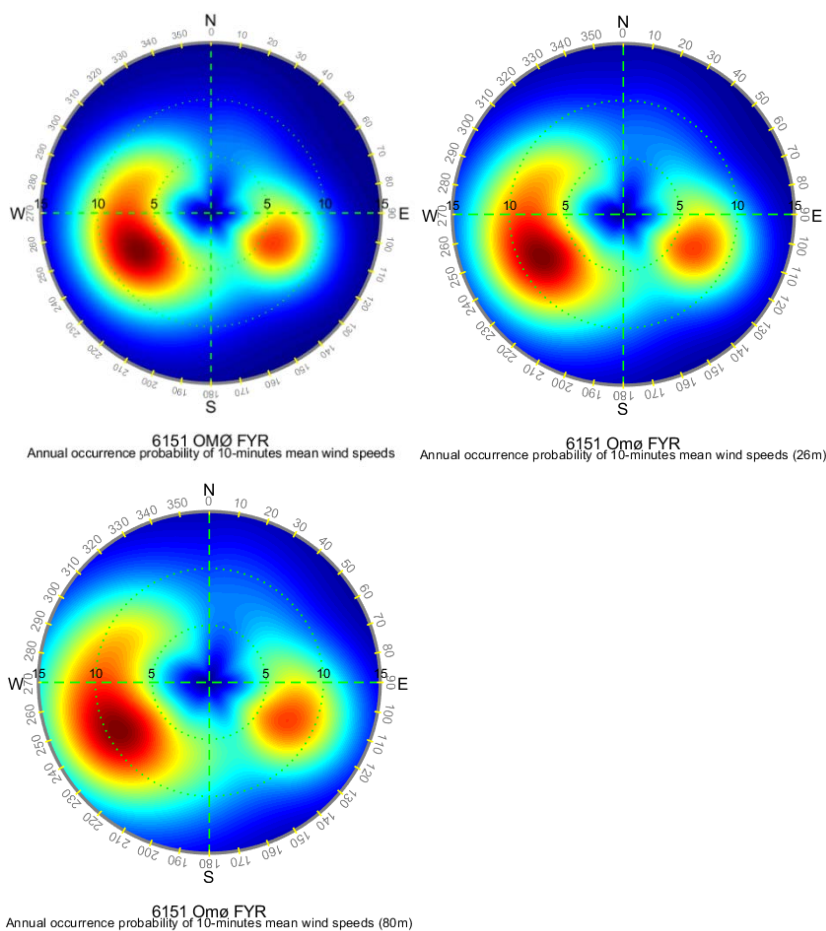
Den hyppigste vindhastighed ved Omø Fyr er omkring 7.5m/s fra 245° (mærkerøde "hotspots" i polarrafen). Den hyppigste vindhastighed ved Kastrup Lufthavn kommer fra samme retning, men er med 5.8m/s ca. 23% lavere end ved Omø Fyr. For begge lokaliteter ses at nordlige vindretninger er sjældne. For Omø Fyr er sektorsandsynligheden for sektoren 315° - 345°, som er vindretningen vinkelret på Vestbroen, 6.7%. Fra plottene er det klart, at den gennemsnitlige vindhastighed er større ved Storebælt end ved Kastrup Lufthavn. Data fra målestationer ved Kastrup Lufthavn viser imidlertid, at det også kan blæse kraftigt over land, men med mindre hyppighed.

Vinddata fra Kastrup Lufthavn et repræsentativt eksempel for hovedparten af infrastrukturen, hvor kraftig vind sjældnere er et problem end på Storebælt, men dog forekommer. Derfor vil en eventuel løsning, hvor man ikke kan tage udgangspunkt i, at trailere er forsvarligt fastgjort på lommevogne, indebære, at man skal sikre, at de lavere vindgrænser man fastsætter også håndhæves på land. Endvidere vil man skulle tage højde for den større turbulens, der findes i land og evt. tage højde for lokale forhold vedr. turbulens i bestemte vindretninger.

Mere end indflydelsen af de lokale terrænforhold er højden over terrænoverfladen bestemmende for den oplevede vindstyrke. Hvis det antages, at vinddataene fra Omø Fyr, som er målt i 10 meters højde, er karakteristiske for Storebælt, og transformerer hyppighedsfordelingen til kørebanehøjder på vest- og østbroen, ses effekten af den stigende vindhastighed meget tydeligt. I Figur 7 er vindklimaet samme sted (Omø Fyr) omregnet til tre højder: 10m som standard- eller udgangshøjde, 26m, svarende til højden af vestbroen Vestbroens kørebaner, og 80m, som er

østbroens højeste punkt på kørebanen. Den hyppigste vindhastighed stiger her fra 7m/s til henholdsvis 8m/s og 9m/s. I samme takt bliver vindforholdene også mere voldsomme, idet ekstreme, men også mere sjældne, vindhændelser skaleres op. Derfor kan man godt konkludere, at en stor, hvis ikke den største, indflydelse på det lokale vindklima, under sammenlignelige forhold, er højden den opleves i.

Figur 7 Ændring af vindklima i forhold til højden over havoverfladen. Fra venstre til højre: 10m som standardhøjde til meteorologiske målinger, 26m ved kørebaner til bil og togtrafik på Vestbroen, 80m ved højeste punkt til biltrafik på østbroen.



Samlet set kan det konkluderes, at vindforholdene på jernbaneinfrastrukturen på Storebæltsbroen er kendetegnet ved, at vinden generelt er kraftigere end på jernbaneinfrastrukturer på land. Til gengæld er der mindre variation og turbulens ved broen end på land. Langt den største indflydelse på det lokale vindklima er dog højden den opleves i. Ud over dette, er der ikke andre vindklimamæssige forhold, der gør vinden på Storebælt til noget særligt i forhold til andre steder i infrastrukturen. Endvidere udgør hyppigere kraftig vind i sig selv ikke noget problem, da de gældende varslingsystemer er baseret på faktiske målte vindhastigheder.

5.2 Sporene på Storebælt i forhold til andre steder

Sporene på Storebælts vestbro opfylder krav der er fastsat i banenorm BN1-38-6. Ved at sammenligne måleresultaterne for Vestbroen med opgørelsen fra 2020 for hele landet, ses det, at den overordnede kvalitet af sporet på Vestbroen er bedre end landsgennemsnittet og hovedstrækningen København -Fredericia (TIB 1) som helhed.

Storebæltsforbindelsen er en del af strækningen København – Nyborg (TIB 1) og er jævnfør banenorm BN1 38-6 klassificeret som en Rød-bane, hvor der anvendes følgende indgrebsgrænser:

- Kl4-fejl. Maksimalt 0,5 fejl pr. km
- Max-fejl. Maksimalt 1,5 fejl pr. 100 km
- Standardafvigelse. Mindst 80 % af alle sporafsnit à 200 m skal opfylde kravene vedrørende standardafvigelse i både højde- og sideretning. Sporet på Storebælts vestbro skal overholde kravene til kvalitetsklasse A ($160 < V \leq 200$ km/t). Krav til standardafvigelsen for højderetningen (σ_H) = 1,2 mm for kvkl A. Krav til standardafvigelsen for sideretningen (σ_S) = 0,8 mm for kvkl A.

Figur 8 Måling november 2020

Parameter	Krav	Landsgennemsnit (røde baner)	Gennemsnit TIB1	Vestbroen
KL4 fejl	0,5 fejl / km	0,11 fejl / km	0,09 fejl /km	0,06 fejl /km
Max-fejl	1,5 fejl / 100 km	0,3 fejl / 100 km	0,5 fejl / 100 km	0 / 100 km
Standardafvigelse	80 %	92,7 %	≈90 %	95,2 %

Sporets beliggenhed på Storebæltsforbindelsen skal jf. BN1-38-6 måles fire gange årligt.

Ovenstående viser, at sporene på Storebæltsforbindelsen med hensyn til sporets beliggenhed er af en høj kvalitet. Der er således ikke noget ved sporets beliggenhed, der indikerer, at der er særlige forhold ved Storebæltsbroen, der skulle udgøre en risiko for togtrafik.

5.3 Andre forhold på Storebæltsbroen som adskiller sig fra anden infrastruktur

Togkørsel på tværs af Storebælt foregår dels gennem en tunnel fra Halskov til Sprogø og dels over Vestbroen, som forbinder Sprogø med Fyn. I dette

afsnit belyses, om der er forhold som potentielt vil kunne give broen status som en speciel infrastruktur i forhold til andre broer med togkørsel.

Ved udkørsel af tunnelen fra Sprogø møder toget den frie vind for første gang. Terrænet ligger her relativt dybt under havniveau og er bevokset med træer til begge sider. Som fotoet på Fig. 9 viser, er toget ved udkørslen skærmet godt af for vinden. Udkørslen af tunnelen vurderes derfor ikke at udgøre nogen speciel risiko med hensyn til pludselige og kraftige vindstød.

I forbindelse med udkørsel fra tunnelen optræder der kortvarigt en trykpåvirkning af toget. Denne påvirkning er imidlertid begrænset både i kraft og tidsmæssig udstrækning i sammenligning med vinden. Der er således ikke noget ved tunnelmundingen, som gør infrastrukturen på Storebæltsbroen til noget særligt. Trykpåvirkningen i forbindelse med udkørsel fra tunnelen er i øvrigt et forhold som Storebæltsforbindelsen har til fælles med andre tunneller.

Figur 9 Tunneludløb ved Sprogø, som er meget lig indkørslen ved Halskov. Terrænet ligger relativt dybt under havniveau og er således skærmet godt af for vinden generelt. Det vurderes umiddelbart ikke, som et område, hvor der er mulighed for særligt høje vindhastigheder.



Efter tunnelen fortsætter toget op på en dæmning (Fig. 10), som forbinder togbanen på Sprogø med vestbroen (Fig. 10 og 11). Dæmningsformationen er kendt fra litteraturen, som en zone med øget middelhastighed. I forbindelse med etableringen af broen i 1990'erne foretog Danish Maritime Institute på vegne af Storebæltsforbindelsen A/S en række vindtunnelforsøg til belysning af vindforholdene over dæmningen¹⁶. Der er her rapporteret, at dæmningsens 'speed-up' virkning kan forøge middelvindhastigheden på toppen med 2% for en 2m høj dæmning, 10% for en 15.9m høj dæmning, og med 14% for en 24.9m høj dæmning. Til sammenligning viser målinger af det

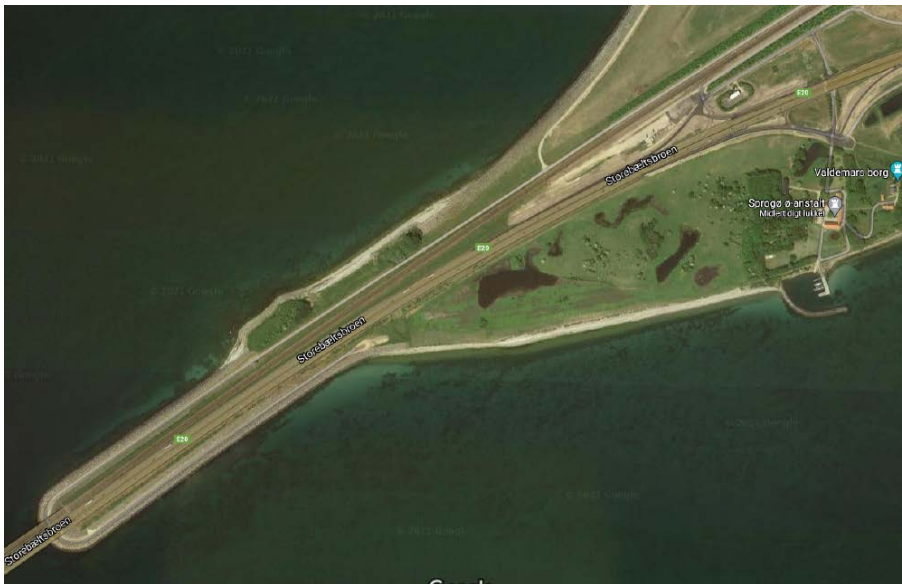
¹⁶ DMI 89145 Report no. 2 'Wind-tunnel tests with the western bridge across the Great Belt'

uforstyrrede hastighedsprofil ved broen en hastighedsøgning på omkring 12% fra 10m til 29m. Da den faktiske højde maximalt er 14,3 m, vurderes speed-up effekten at være sammenlignelig med den øgning, der naturligt eksisterer i det atmosfæriske grænselag over vand, således at det er inkluderet i det generelle varslingsystem, som bl.a. inkluderer en målemast på Sprogø i 27 meters højde. Der er siden lavet en forstærkning af diget i forbindelse med kystsikring (se Fig. 10). Baseret på en visuel inspektion af medarbejdere fra Danmarks Tekniske Universitet, er det blevet vurderet at dette ikke at give anledning til en øget vindhastighed eller yderligere turbulensdannelse over dæmningen.

Efter tunnelen fortsætter toget op på en dæmning (Fig. 10), som forbinder togbanen på Sprogø med Vestbroen.

I forbindelse med etableringen af broen blev en række forhold undersøgt i vindtunnel (samme ref). Dette inkluderede bl.a. måling af vindhastighedsprofiler over forskellige brosektioner og kritiske kræfter og momenter på passerende køretøjer.

Figur 10 Overgangen fra dæmningen på Sprogø til Vestbroen.



Figur 11 Overkørsel fra tunnel til dæmning.



Figur 12 Indkørsel fra dæmning til Vestbroen.



6 Vindgrænser i forhold til fastgørelse

6.1 Fastlæggelse af A-værdien – trailer blæser ud af profil ved vindens påvirkning

Vindhastighedsgrænsen for kørsel med trailer på lommevogn over Vestbroen på Storebælt skal bestemmes i forhold til de aerodynamiske laster, der virker på traileren. Kritiske værdier for vindhastigheden opnås, når de aerodynamiske kræfter er så store, at de kan rykke/vælte traileren af lommevognen. De aerodynamiske laster er en kombination af kræfter og momenter på traileren, hvor de resulterende kræfter kan bestemmes ved at udføre repræsentative trækforsøg.

Efter ulykken den 2. januar 2019 blev der til bestemmelse af disse gennemført trækforsøg med en trailer på en lommevogn under forskellige forhold. Traileren er udstyret med en hovedbolt også kaldet kongetap, som låses i en på vognen monteret skammel. Nærmere beskrivelse af hovedbolt/kongetap fremgår af Havarikommissionens undersøgelsesrapport fra ulykken den 2. januar 2019.¹⁷

Der blev udført forsøg for fire forskellige scenarier: låst kongetap, ulåst kongetap i saddelpunkt, ulåst kongetap foran sadde, og ulåst kongetap bag ved sadde. For flere detaljer henvises til Havarikommissionens rapport.¹⁸ De målte laster/trækkkræfter kan relateres direkte til den nødvendige middelvind, der som minimum kræves til at rykke/blæse traileren af lommevognen. Den resulterende aerodynamiske kraft kan med god nøjagtighed antages at virke midt på trailerens sidedug, hvorfor forsøget blev udført med et træk virkende midt på siden af traileren (se figur 14). Figur 13 viser de målte trækkkræfter for de fire scenarier.

Figur 13 Laster fra trækforsøg

Trækforsøg	Målt trækkraft	Note
Kongetap låst	>4000kg	Ingen bevægelse, forsøg stoppet ved 4000 kg
Kongetap ulåst	~3200kg	Kongetap springer ud af lås
Kongetap bagved sadde	~2200kg	Trailer skrider/glider sideværts
Kongetap foran sadde	~3400-2200kg	Kongetap fanger et beslag der giver en høj last til start, men giver slip ved 3400 kg og skrider derefter.

¹⁷ Havarikommissionen, Undersøgelsesrapport Lyntog L 210 kollideret med sættevognstrailer fra godstog G 9233 på Storebæltsbroen (Vestbroen) 01.02.2019

¹⁸ Havarikommissionen, Undersøgelsesrapport Lyntog L 210 kollideret med sættevognstrailer fra godstog G 9233 på Storebæltsbroen (Vestbroen) 01.02.2019

Figur 14 Trækforsøg af trailer på lommevogn.

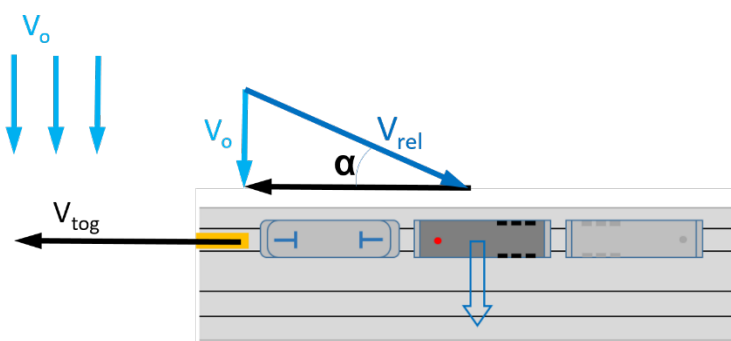


Den aerodynamiske kraft på traileren vil afhænge af en række faktorer, hvoraf de væsentligste er givet nedenfor

- Middelvindhastigheden
- Vindstød
- Togets hastighed og vinkel i forhold til middelvind
- Trailereens aerodynamiske karakteristika (modstand, løft), som måles på model i vindtunnel
- Vægt af trailer

Hastigheder og kraftvektorer er angivet på nedenstående skitse (figur 15), hvor V_o er vindhastigheden og V_{rel} er den relative hastighed i forhold til toget. Den relative hastighed er givet som den vektorielle sum af vindhastighed og toghastighed.

Figur 15 Hastigheds og kraftvektorer. Kraftvektoren sideværts er angivet på trailer placeret lige bag ved lokomotiv. Den relative vind, der virker på traileren, er givet som vektorsummen af toghastigheden og sidevindhastigheden med en indbyrdes vinkel α . De resulterende kræfter afhænger af vinklen α og kan bestemmes ved separate vind tunnelmålinger.



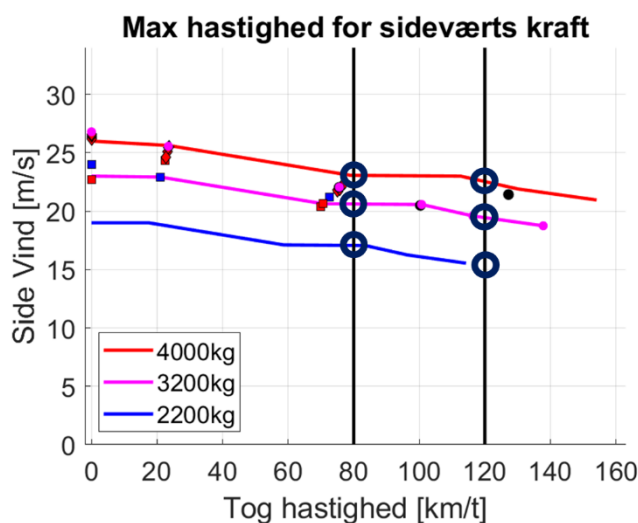
De aerodynamiske kræfter kan opdeles i sideværts- og løfte-kræfter (F_D , F_L), som bestemmes ud fra formlen,

$$F_D = \frac{1}{2} \rho A_r V_o^2 C_D \quad [\text{N}] \quad (1)$$

$$F_L = \frac{1}{2} \rho A_t V_o^2 C_L \quad [\text{N}] \quad (2)$$

hvor ρ er luftens massefylde og $V_{rel}^2 = V_o^2 + V_{tog}^2$ er den relative hastighed i forhold til toget, dvs. summen af vindhastigheden og togets egen-hastighed. Endvidere indgår sidearealet, A_r , og top/loft arealet, A_t , af traileren, samt de dimensionsløse aerodynamiske koefficienter, C_L og C_D . Strømningsvinklen α angiver vinklen mellem togets bevægelsesretning og retningen af den relative vind, og beregnes som $\alpha = \tan^{-1} \frac{V_{tog}}{V_o}$. De aerodynamiske koefficienter afhænger af strømningsvinklen, $C_L=C_L(\alpha)$ og $C_D=C_D(\alpha)$, og er tidligere målt i vindtunnel (se Havarikommissionens rapport). Ved kombinere kræfterne fundet i trækforsøget med de målte aerodynamiske koefficienter, kan de kritiske hastigheder bestemmes fra lign. (1). Figur 16 viser de samlede maximale hastigheder for middelvind med værdier for trækforsøg indsat som kritiske laster.

Figur 16 kritiske vind grænser



Figuren viser den kritiske sidevind (y-aksen) som funktion af togets egen-hastighed (x-aksen). Markering for toghastighederne 80 km/t og 120 km/t er overført til tabel 2, hvor de 2200 kg henfører til en kørsel med kongetap helt ude af sadel, 3200 kg refererer til kraften for at trække kongetappen ud af en ulåst sadel, og de 4000 kg, angiver den øvre trækraft, som traileren blev trukket med under forsøget. Det skal anføres, at de kritiske værdier af vindhastigheden for 4000 kg træk reelt er højere med kongetab låst.

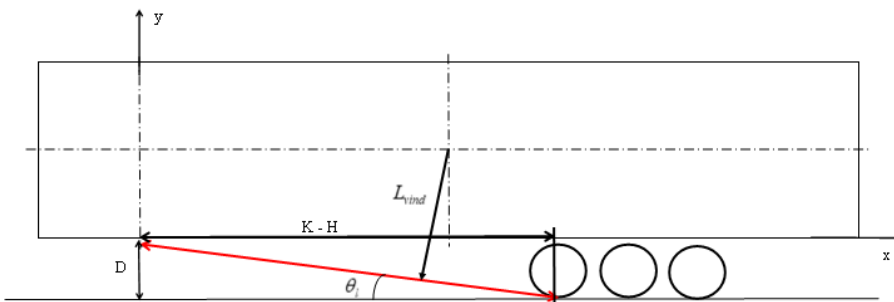
Figur 17 Kritisk sidevind på trailer.

	80 km/t	120km/t
2200kg ~ 22kN	17m/s	15m/s
3200kg ~ 32kN	21m/s	19m/s
4000kg ~ 40kN	>23m/s	>22m/s

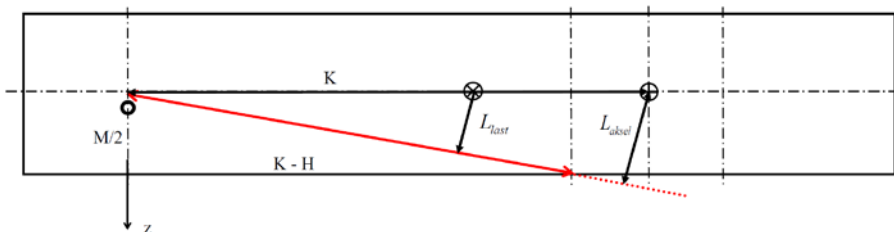
Ovenstående analyse er baseret på en middelvindhastighed uden vindstød. I afsnit 6.2 i nærværende rapport er vindstødenes indflydelse behandlet. Indflydelsen af vindstødene er relateret til lokale turbulensforhold på Storebæltsbroen, og vil medvirke til at reducere de kritiske værdier af middelvindhastigheden.

Til bestemmelse af vægten af trailerens indflydelse på de kritiske vindhastigheder, er der udviklet en simpel matematisk model. Udgangspunktet for modellen er, at kongetappen er ulåst og placeret på sadlen, således at det antages, at traileren under indflydelse af vinden vil vælte over en linje fra saddelpunktet til et af hjulene på det første af de tre bagerste hjulpar (se figur 18 og 19).

Figur 18 Skitse af trailer set fra siden. Den røde linje angiver den linje, som traileren antages at vælte over. De tre cirkler angiver de tre bagerste hjulpar og L_{vind} er den vinkelrette afstand mellem de aerodynamiske kræfters virkepunkt (midtpunktet af trailerdugen) og væltelinjen.



Figur 19 Skitse af trailer set fra oven. L_{last} og L_{aksel} angiver henholdsvis den vinkelrette afstand fra væltelinjen til lastens massemidtpunkt og til bagerste akslers masseindtpunkt.



Ved at sætte en momentbalance op for de resulterede kræfters virkning over væltelinjen fås følgende ligning

$$F_D \cos \theta_h L_{vind} + F_L \cos \theta_l L_{last} = g \cos \theta_l [m_{aksel} L_{aksel} + m_{last} L_{last}] \quad (3)$$

hvor modstandskraften F_D antages at virke midt på trailerdugen og løftekraften F_L antages at virke midt i traileren i det samme punkt som massemidtpunktet. I ligningen angiver g tyngdeaccelerationen, θ_h er vinklen mellem væltelinjen og trailerens midtlinje, θ_l er vinklen mellem væltelinjen og horisontalen, L_{vind} , L_{last} og L_{aksel} angiver henholdsvis den vinkelrette afstand fra væltelinjen til dugens midtpunkt, til lastens massemidtpunkt og til de bagerste akslers masseindtpunkt (se Figur 18 og 19), og m_{aksel} og m_{last} angiver henholdsvis massen af de tre bagerste hjulpar og af last (inklusive vægt af trailerkasse). Det antages her, at massemidtpunktet for de tre hjulpar ligger i centrum af det miderste hjulpar

og massemidtpunktet af lasten ligger midt i traileren. Fra geometrisk analyse af traileren se figur 18 og 19 fås følgende værdier:

$$\cos \theta_h = 0.98; \quad \cos \theta_l = 0.987; \quad L_{vind} = 2.28 \text{ m}; \quad L_{aksel} = 1.5 \text{ m}; \quad L_{last} = 1.02 \text{ m};$$

$$m_{aksel} = 5060 \text{ kg}; \quad m_{kasse} = 1440 \text{ kg}.$$

Disse værdier er gældende for en fuldstændig stiv konstruktion. Under trækforsøget var det dog klart, at kassen på traileren drejes under påvirkning under kraften (se Fig.18). Ved at analysere videofilmen fra forsøget, er kassen blevet fundet til at rotere ca. 10 grader omkring de hjulsæt, der vender væk fra den flade, hvorpå kraften virker. Men en kassebredde på 2.25 meter, giver dette en øgning af højden på vindkraftens momentarm på ca 42 cm og en formindskelse af afstanden fra massemidtpunkt til vætelinje på ca 2 cm, således at de resulterende momentarme bliver til $L_{vind} = 2.7$ og $L_{last} = 1.0$ m. Til at validere lign. (3) sættes F_L lig med nul og F_D beregnes og sammenlignes med værdien fra trækforsøget. Ved at indsætte de geometriske værdier og værdierne for masserne i lign. (3) bestemmes trækraften til $F_D = 3300$ N, hvilket ligger indenfor 3% af de 3200 N, der blev målt i forsøget (se figur 17).

Dette bekræfter gyldigheden af den teoretiske model, som i det følgende vil blive benyttet til at bestemme kritiske vindhastigheder for forskellige toghastigheder.

Ved at kombinere lign. (3) med lign. (1), fås følgende udtryk til bestemmelse af den kritiske vindhastighed som funktion af toghastighed og masse af last

$$V_0 = \sqrt{\frac{2g \cos \theta_l (m_{last} L_{last} + m_{aksel} L_{aksel})}{\rho (A_r \cos \theta_h L_{vind} C_D + A_l \cos \theta_l L_{last} C_L)}} \quad (4)$$

I ovenstående udtryk afhænger modstandskoefficienten C_D afhænger af strømningvinklen

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{V_{tog}}{V_0}. \text{ Fra vindtunnelmålingerne er der fundet følgende værdier:}$$

$$\alpha = \pi / 6: (C_D, C_L) = (2.4, 0.6); \quad \alpha = \pi / 4: (C_D, C_L) = (2.8, 1.1); \quad \alpha = \pi / 3: (C_D, C_L) = (3.2, 1.8).$$

Ved lineær interpolation fås flg. approksimative udtryk til bestemmelse af modstands- og løfte-koefficienten:

$$C_D = 2.8 + \frac{4}{\pi} \left(\alpha - \frac{\pi}{4} \right) \quad (5a)$$

$$C_L = 0.2 + \frac{4}{\pi} \alpha \quad (5b)$$

Ved iterativt at løse lign. (4) og (5), bestemmes de kritiske vindhastigheder som funktion af toghastighed. For en ulåst tom trailer (vægt=6500 kg) fås de kritiske værdier, som vist i Tabel 3.

Til at analysere den kritiske vindhastighed for en låst trailer, antages traileren at være spændt så fast på lommevognen, at lommevogn med trailer vil vælte under trailerens påvirkning af sidevinden. Herved vil momentarmen for trailer og lommevogn svare til den halve sporvidde. Med en sporvidde $D = 1435$ mm, fås således en momentarm $L = 0.715$ m. Den totale vægt af lommevogn plus trailer antages at være ca. 35 tons. Med disse værdier indsat fås de kritiske vindhastigheder for en låst trailer, som vist i figur 20.

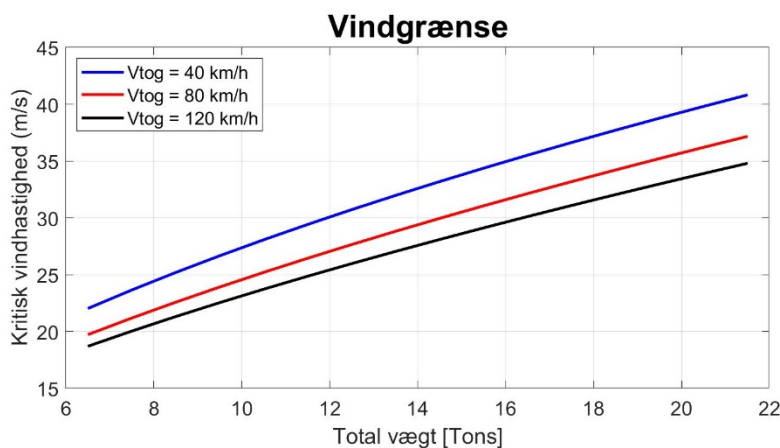
Figur 20 Kritisk sidevind på tom trailer fra lign. (4)

Tog hastighed	40 km/t	80 km/t	120 km/t
Ulåst trailer	22.2 m/s	20.0 m/s	19.0 m/s
Låst trailer	40.3 m/s	37.1 m/s	34.9 m/s

I henhold til modellen for beregning af kritiske vindhastigheder svarer ovenstående værdier til A1 19.0 m/s og A2 34.9 m/s.

Til at bestemme den kritiske vindhastighed for en lastet trailer med ulåst kongetap, benyttes lign. (4) med værdier indsat for forskellige laster. Den totale vægt af traileren er defineret som summen af trailerens og lastens vægt. Ved at inkludere lasten i analysen, beregnes vindgrænserne som vist på Fig. 21, der angiver de kritiske vindgrænser som funktion af trailerens totalvægt ved toghastighederne 40 km/h, 80 km/h og 120 km/h.

Figur 21 Den kritiske vindhastighed for lastet trailer med ulåst kongetap som funktion af total vægt ved forskellige toghastigheder.



6.2 Fastlæggelse af B og C værdi, forholdet mellem middelvind og maksimale vindstød og køredynamik

Analysen er baseret på data fra vindtunnelforsøg på toget med trailer, feltmåling af den vandrette kraft, som det kræves for at trække trailerens kongetap fra låsen på lommevogn, vindmålinger i naturen på Vestbroen, dokumentation af trailerens og lommevognens konstruktion, samt indikative data vedrørende køredynamikken af tog på Vestbroen. På hvilken måde, og i hvilket omfang, ovennævnte information indgår i risikovurderingen af om en

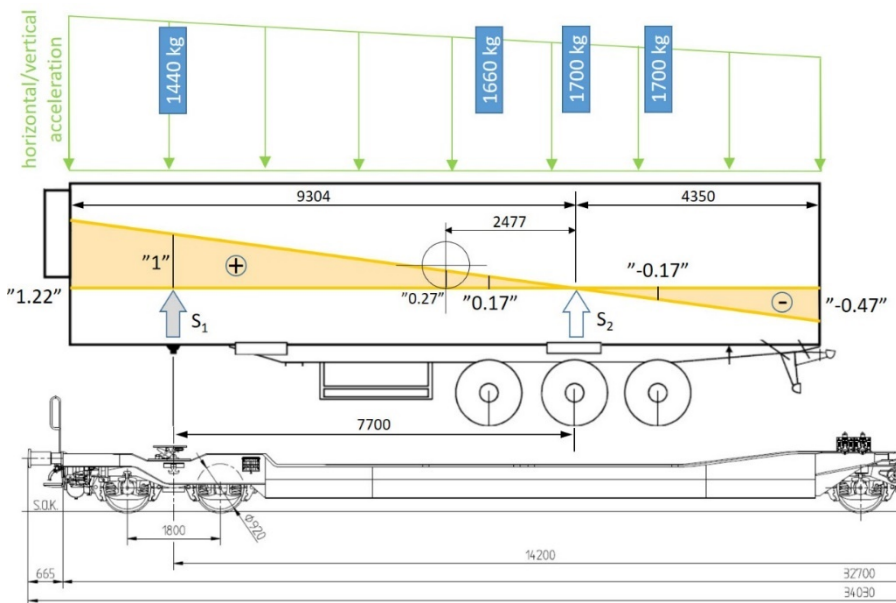
trailer kan blæses af toget under kørsel over Vestbroen, er afhængig af en modellering af selve dislokationsprocessen. Det er afgørende for kvaliteten af modelleringen, at de aerodynamiske og køredynamiske kræfter, som virker på traileren og kongetappen i låsemekanismen, er beskrevet nøjagtigt. For aspekter, hvor der ikke foreligger måledata eller andre dokumenterede information, skal der træffes antagelser på basis af strømning- og strukturmekaniske principper. Disse antagelser skal i forhold til usikkerheden reflektere konservative, men plausible scenarier. For at beregne, hvilken 10-minutters gennemsnitlig vindhastighed, der skal sættes som grænseværdi til sikker godstogtrafik med tomme sættevogntrailere, skal følgende delaspekter beskrives nøjagtigt:

- Lastfordeling
- Dislokationsproces
- Respons- og belastningstid
- Vindstød på kørende tog
- Indflydelse af kørselsdynamik
- Korrelation af aerodynamiske vandrette og lodrette kræfter
- Vindstødfaktor på broen

Lastfordeling

Et vindtunnelstudie i reduceret skalaforhold med tog- og sættevognstrailer på Vestbroen fra 2019 har givet detaljerede information om de aerodynamiske belastninger på selve traileren. Ud over vindforhold på broen er trailerens belastning beskrevet som en tværvirkende horisontale kraft (aerodynamisk drag) og en lodret opadvirkende kræft (aerodynamisk lift). Til simplificeret modellering af belastningsprocessen er det antaget, at begge kræfter angriber i det geometriske midtpunkt af trailerens øvre struktur. Dette belastningscentrum er markeret på tegningen i figur 22. Med en lineær indflydelseslinje kan kræfter, som virker på et punkt langs traileren, omregnes til den andel, som kommer til at virke i støttekraften S_1 ved kongetappen. Kræfter i midtpunktet fordeler sig med 27% til kongetappen og med 73% til understøtningspunkt S_2 i centrum af baghjulene.

Figur 22 Overordnet mål af sættevognstraileren og markering af hovedmassefordeling af trailerstruktur og indflydelseslinje af belastninger på støttekræften S1 ved kongetappen



Dislokationsproces

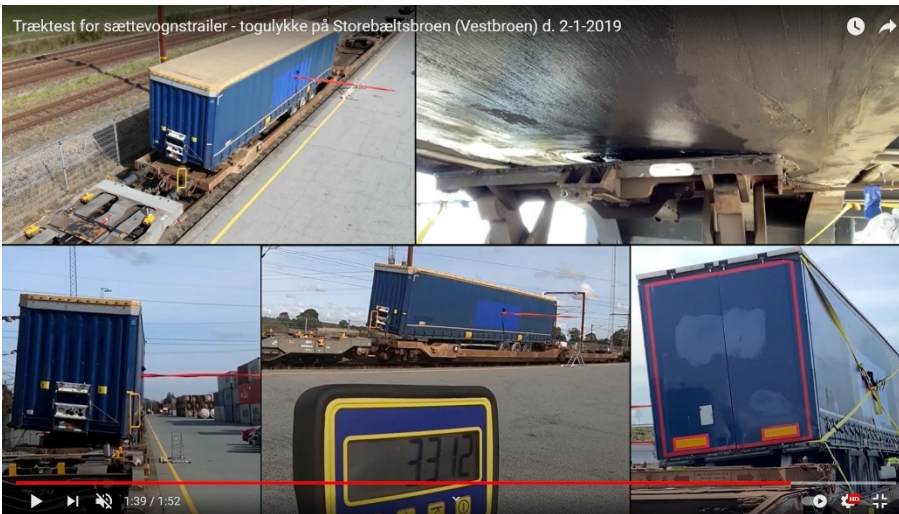
Dislokationsprocessen, hvor traileren bliver trukket ud af koblingen på sættevognen (kongetap-lås) og skubbet sidelæns ud af godstogets eget køreprofil ind i den modgående trafiks køreprofil, kan deles op i fire faser:

1. Udtræk af kongetappen fra låsen i skamlen på sættevogn.
2. Traileren bliver drejet videre til siden hvor kongetappen glider over skamlen.
3. Kongetappen kommer fri fra skamlen, og traileren drejer videre til/ud over godstogets køreprofil.
4. Traileren drejer ind i modtrafikkens køreprofil.

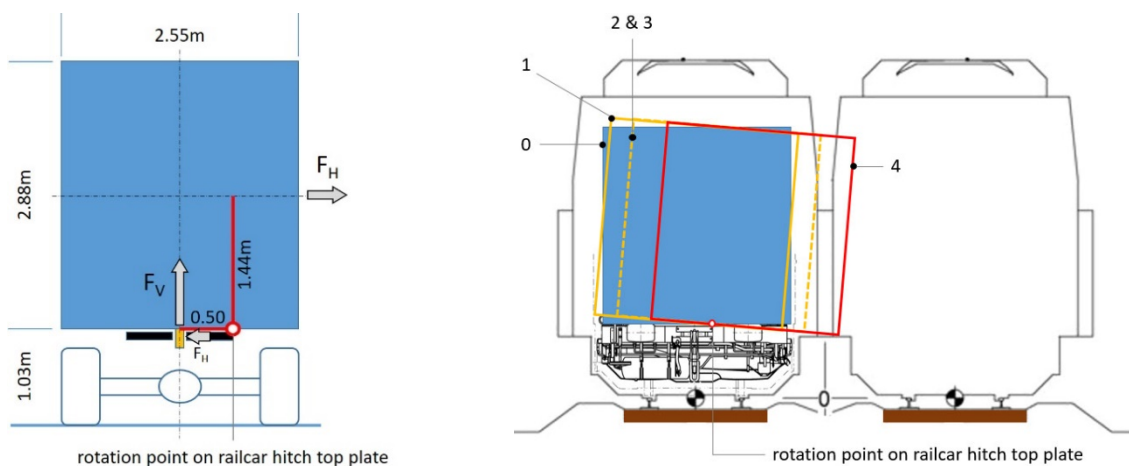
Figur 23 giver et øjeblikbillede af trækforsøget, lige før kongetappen bliver hevet ud af den ulåste kobling. Undersiden af traileren viser en betydelig krængning, før kongetappen bliver trukket fri (fase 1). De efterfølgende faser af hele dislokationsprocessen er illustreret til højre i figur 24. I forhold til kongetappen angriber vindkraften vandret i midtpunktet af trailerens sideareal (presenning) med ca. 1,44m lodret afstand til skamlen. Krængning eller rotationen af traileren forgår omkring den yderste kant af skamlen. Med en vurderet skammelbredde på 1m er armen til kongetappen ca. 0,5m. Med en momentarm-model (figur 24 til venstre), virker den horisontale vindkraft F_H med en faktor $1,44/0,5 = 2,9$ på kongetappen som en lodret trækraft F_V . Som ligevægt bliver kongetappen presset mod koblingens hulrand med samme kraft F_H , da friktionen mellem trailerens underside og skamlens overside, og dermed ved rotationspunktet, kan negligeres på grund af glidefedt på begge sider. Momentarmen kan i momentmodellen variere for forskellige skammel- og trailerfabrikater. I hvilken omfang alle fire faser danner en kontinuerlig proces indenfor et enkelt vindstød, eller om processen foregår trinvist, vil afhænge af trailerens responstid.

Figur 23 Skærbillede fra Havarikommissionens videodokumentation af trækforsøg på sætvegntrailereren lige før øjeblikket, hvor traileren bliver hevet ud af forankringen (ulåst

kongetappen). Øverst til højre kan man se den skrå position af traileren i forhold til skamlen.



Figur 24 Illustration af momentarmsmodel til beregning af trækraft på kongetappen på grund af vindpåvirkning og faserne i dislokationsprocessen.



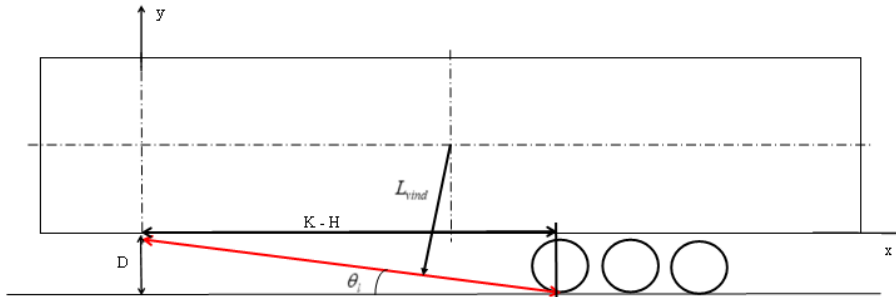
Momentarmmodel for horisontal vindkraft F_H og trækraft på kongetappen F_V .

Dislokationsproces i fire faser relativt til køreprofilen af godstoget og profilen af den modkørende togtrafik.

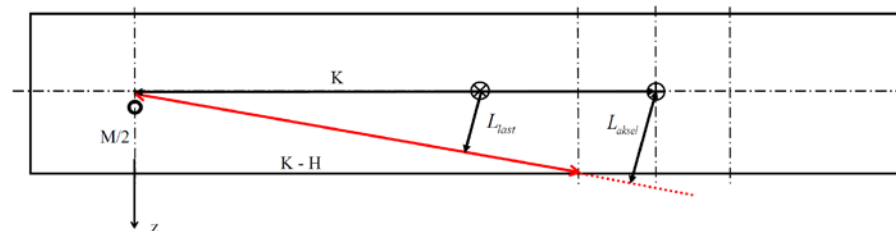
Respons- og Belastningstid

Afgørende for bestemmelse af grænsevindhastigheden er en vurdering af, hvor hurtigt traileren reagerer på et vindstød, og dermed hvor længe vindstødet (mindst) skal vare, for at dislokationsprocessen kan udløses og gennemføres. Det er rimeligt at antage, at kraften, som skal ydes for at hive kongetappen ud af koblingen (låst og ulåst) i fase 1, er langt højere end kraften for at skubbe traileren over skamlen ind i modetrafikken køreprofil. Den følgende analyse baserer sig på overvejelser angående respons- eller reaktionstid efter, at kongetappen er frigjort. I responsmodellen betragter vi en rotationsakse eller vælteakse, som strækker sig fra kongetappen til kontaktpunktet af det første baghjul på læsiden af traileren med sættevogn, som illustreret på Figur 25 og 26.

Figur 25 Skitse af trailer set fra siden. Den røde linje angiver den linje, som traileren antages at vælte over. De tre cirkler angiver de tre bagerste hjulpar og L_{vind} er den vinkelrette afstand mellem de aerodynamiske kræfters virkepunkt (midtpunktet af trailerdugen) og væltelinjen.



Figur 26 Skitse af trailer set fra oven. L_{last} og L_{aksel} angiver henholdsvis den vinkelrette afstand fra væltelinjen til lastens massemidtpunkt og til bagerste akslers massemidtpunkt.



Under påvirkning af en tilstrækkelig kraftig vind, vil traileren begynde at krænge (rottere) som vist på Figur 23 og 24. Det antages, at traileren kan rotere yderligere, efter kongetappen er kommet fri af koblingen hen mod et væltepunkt (væltekrængning). Denne rotationsproces er ikke identisk med hele dislokationsprocessen, men muliggør at modellere momentet af trailerens massefordeling i forhold til en virkende kraft, som vil accelerere traileren hen mod statisk instabilitet, som betegner det tidspunkt hvor traileren af sig selv vil fortsætte med at vælte. Tiden til instabilitetspunktet indikerer responstiden af traileren. Figur 27 viser responstid som funktion af vindhastighed. Baseret på kraftkoefficienter fra vindtunnelforsøget viser beregningen, at det vil tage ca. 3 sekunder, før traileren opnår væltepunktet ved en vindhastighed på 20m/s, svarende til vindsituation den 2. januar 2019 ved ulykkestidspunktet.

Figur 27 Væltetid af traileren from funktion af horisontalt vindpåvirkning. Ifølge Eurocode 1 er 3 sekunder en typisk tidsskala til bestemmelse af spidsevindbelastninger på statiske konstruktioner. Som modellen viser, kan dette åbenbart overføres til responsberegning af traileren. Dermed kan vindbelastningsanalysen baseres på en 3-sekunders gennemsnitlig vindstødhastighed, i analogi til lastmodellen i Eurocode.



Vindstød på kørende tog

Beregning af et vindstødhastigheden, som et gennemsnit over tre sekunder, skal fortages under betragtning af, at toget bevæger sig med en fart på 120km/h, eller 33.3m/s. Distancen, som toget bevæger sig i løbet af de tre sekunder, er 100m, og den rummelige størrelse af vindstødet i togets bevægelsesretning, dvs. langs broen eller på tværs af vindens retning, skal dække denne distance. Et vindstød er et udtryk for vindens turbulens, som kulminerer til en ekstrem event inden for en bestemt tidsramme, for eksempel 10 minutter. Derudover bliver turbulens betragtet som et system af forstyrrelser/hvirvler af forskellig størrelse i luften, som følger vindens overordnede (gennemsnitlige) bevægelse. Disse forstyrrelser dannes i atmosfæren og ved terrænoverfladen, hvor de blander sig sammen med hinanden, og transporteres og splittes op i mindre forstyrrelser, indtil de forsvinder og opløses grund af luftens viskositet. I et øjebliksbillede af en turbulent strømning kan en hvirvel eller en isoleret forstyrrelse betragtes som en rumlig repræsentation af et vindstød. De mest karakteristiske dimensioner af en turbulent strømning betegnes de integrale længdeskalaer. Ifølge litteraturen varierer dimensionen af længden i strømningsretningen i 26m højde over havet mellem 160m og 300m. Den tilsvarende karakteristiske dimension på tværs af vindretningen er mellem 20 og 50% af denne, altså mellem 32m og 150m. Dette indikerer, som en konservativ antagelse, at et stærkt eller ekstremt 3-sekunder vindstød kunne strække sig over 100m langs broen og opretholde en høj gennemsnitlig vindhastighed på et tog, som bevæger sig med 120km/h over broen.

Indflydelse af kørselsdynamik

Rystelser af trailer og sættevogn, som stammer fra togets bevægelse over skinnesystemet, er afhængige af en række faktorer såsom:

- Udformning af kontaktpunkt mellem hjul og skinne.
- Nedslidning af hjulet.
- Om skinnen er tør eller våd.
- Krumning af sporet i kurven.
- Dynamisk kobling og interaktion mellem drejestel og sættevogns rammekonstruktion med traileren.

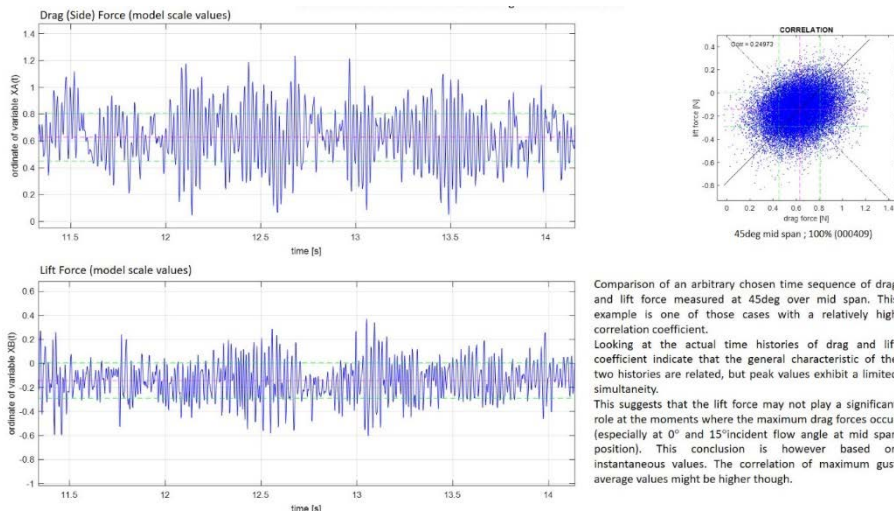
- Vridning i drejestel.
- Særeelementer i sporet såsom skinneudtræk.

For at vurdere effekten af køredynamikken på kræfterne ved kongetappen og dermed indflydelsen på dislokationsprocessen, benyttes data fra målinger på et persontog over Vestbroen som en indikativ hovedkarakteristik af togets reaktion på skinnesystemet. Da den dynamiske opførelse af persontog og godstog er meget forskellig, er vurderingen meget konservativ og skal helst erstattes med målinger på tilsvarende testkørsel med sættevogn og trailer. Vandrette og lodrette spidsacceleration er groft vurderet til at have værdien 1m/s^2 . Antages massen ved kongetappen at være 1440kg (Figur 22), svarer det til $1,44\text{kN}$, som virker kortvarigt, og ved forskellige tidspunkter både vandret og lodret på kongetappen. Køredynamiske spidskræfter overstiger dermed ikke trailerens lodrette vægtekraft på kongetappen (ca. $14,1\text{kN}$), eller den horisontale statiske støttekraft i låsen, hvor kongetappen bliver trukket ud af ulåst kobling i trækforsøg, $F_H = 0,27 \cdot 32\text{kN} = 8,64\text{kN}$. Kræfter fra køredynamikken reducerer friktionskræfterne mellem traileren og skamlen, kongetappen og låsen, men ophæver dem ikke, når traileren bliver påvirket af et ekstremt vindstød. En meget konservativ antagelse af den samlede effekt af køredynamikken er, at friktionseffekten i låsen kan negligeres og at kraften der kræves for at trække traileren ud af låsen reduceres med ca. 6% ($32\text{kN} \cdot 0,06 = 2\text{kN}$).

Korrelation af aerodynamiske vandrette og lodrette kræfter

Vindpåvirkning på traileren er beskrevet gennem den vandrette kraft på siden af traileren (aerodynamisk drag) og en lodret opadgående kraft (aerodynamisk løft) på trailerens topline. Begge kræfter er et resultat af samme strømningsproces, men manifesterer sig på forskellige måde, afhængig af broens og togets geometri og den relative vindretning på toget. Det antages, at begge kræfter virker i midtpunktet af trailerens side- og toplinearealer (skitseret i figur 26). Ligesom den vertikale acceleration fra køredynamikken, vil løfte-kraften reducere den nødvendige sidekraft for at hive kongetappen ud af låsen. I forhold til beregning af en grænseværdi for vindhastigheden, skal der vurderes i hvilken grad den maksimale sidekraft optræder samtidigt med den maksimale løftekraft.

Figur 28 Sammenligning af tidsforløb af den aerodynamiske side- og vertikal-kraft (drag og løft). Korrelationskoefficienten giver en indikation af samtidighed af ekstremer i begge kræfter.

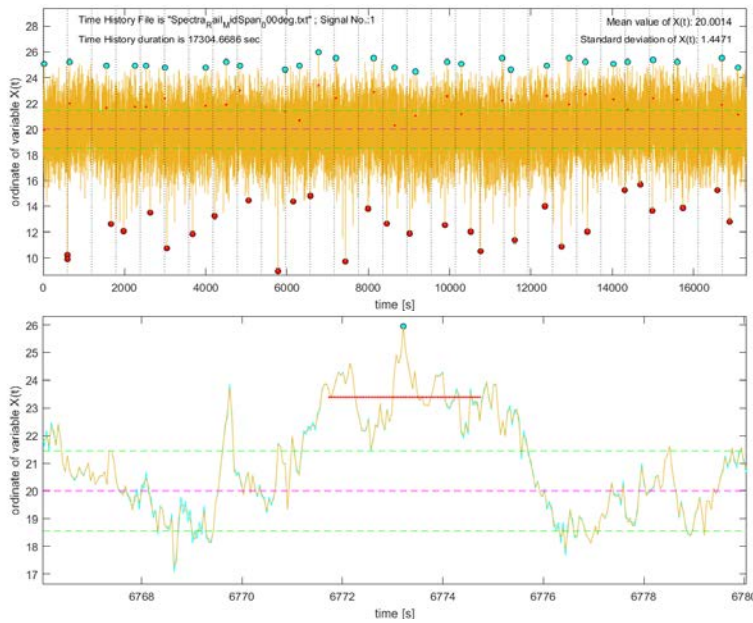


Figur 28 illustrer tidsforløb og korrelation mellem den vandrette sidekraft og den lodrette løftekraft målt i vindtunnelforsøget. Eksemplet viser, at den største sammenhæng mellem de to kræfter resulterer i en korrelationskoefficient på 0,25 (0 = uafhængige processer; 1 = processer følger fuldstændig hinanden). Løftekraften kan være op til 67% af sidekraften, hvilket svarer til omkring 20% af den vertikale trækraft F_V på kongetappen. Med den relativt lave tidsmæssige korrelation kan 50% af løftekraften regnes for at have en samtidig virkning med den maksimale sidekraft, hvorved kraften for at trække traileren ud af låsen reduceres med 10% ($32\text{kN} \cdot 0,1 = 3,2\text{kN}$). Dermed ligger reduktionen af udtrækskraften på kongetappen samlet set på 16% (køredynamik og aerodynamisk korrelation), hvilket i sig selv udgør 27% af den samlede vandrette kraft på traileren i trækforsøg. Det vil sige at den overordnede reduktion er $0,84 \cdot 0,27 + 0,73 = 0,96$ på vindkraften og 0,97 på den tilsvarende vindhastighed.

Vindstødfaktor på broen

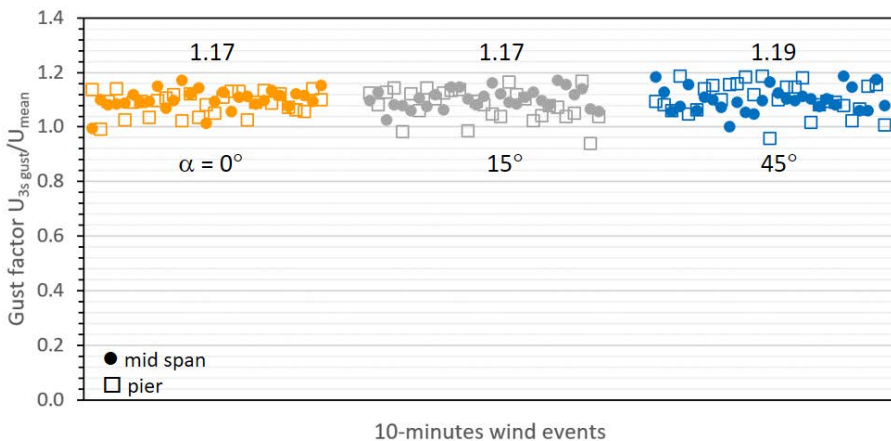
I afsnittet om trailerens reaktionstid på vindstød, blev det konstateret, at tre sekunder er en realistisk antagelse på responstid. Denne tid er tolket som vindstødet længde, og den effektive vindhastighed bliver derfor beregnet som en gennemsnitsværdi over de tre sekunder. Figur 30 viser variationen af vindhastigheden ved broens referencehøjde, baseret på vindtunnelmålinger skaleret til naturlig størrelse. Hele tidsserien er opdelt i 10-minutters afsnit, hvor der i hvert afsnit bliver beregnet den ekstreme 3-sekunders gennemsnitlige vindstødshastighed (nederste billede i figur 8). Forholdet mellem vindstødshastighed og den overordnede 10-minutters gennemsnitshastighed er vindstødfaktoren.

Figur 29 Beregning af 3-sekunders gennemsnitshastighed (vindstødshastighed) som ekstremværdi for 10-minutter vindevents.



Figur 30 viser alle vindstødfaktorer beregnet fra vindtunnelmålinger for forskellige relative vindretninger og positioner på broen. Et overordnet konservativt estimat er 1,2 for alle konfigurationer. Dermed skal en vindstødshastighed, som opnår udtrækskraften af kongetappen fra låsen, **reduceres med $1/1,2 = 0,83$** for at give den tilsvarende 10-minutters gennemsnitlige vindhastighed.

Figur 30 Vindstødfaktorer for forskellige relative vindretninger og positioner på broen målt i vindtunnelstudie. Et konservativt estimat er 1,2 for alle konfigurationer.



Samlede reduktionsfaktorer på vindhastigheden:

0,97 på grund af køredynamik og kombinationen af drag og lift kræfter

0,83 på grund af turbulens (forhold mellem vindstød- og 10-minutters gennemsnitshastighed)

0,80 i kombination (= 0,97 * 0,83)

6.3 Fastlæggelse af D-værdien, usikkerhed ved vindmålinger

D-værdien i denne model beskriver den usikkerhed, der knytter sig til målingerne af vind på infrastrukturen på Storebæltsbroen. Det gælder både den usikkerhed, der knytter sig til vindmålerens nøjagtighed og den usikkerhed, der knytter sig til, at der kan være lokale vindfænomener, andre steder på broen end der, hvor vindmålerne står. En beskrivelse af den samlede fordeling af opsatte vindmålere på Vestbroen, både ældre og nyligt opsatte, er samlet i tabellen nedenfor

Figur 31 Oversigt over placering af vindmålere

	Kote	Over vejplan/spor	10min	10Hz Juli 2021	Sonic
P44 - syd	30m	5.23m			3D ²
P20 - syd	29m	5.23m			3D ²
Sprog Ø	27m	18m			2D ¹
P41 – nord	34,6m	8.9m	✓ 2020		2D ¹
P20 – nord	33,1m	8.9m	✓ 2020		2D ¹
Sprog Ø - ny	10,5	3,0m	✓ 2021		2D ¹

1. FT6742-DM50: <https://fttechnologies.com/wind-sensors/ft7-series/direct-mount-dm50/>
2. Borschung Mecatronic sensoren er en ca kopi af en Gill WindMaster Pro
<http://www.gillinstruments.com/products/anemometer/windmaster-pro.html>

Op til hændelsen d. 13. januar 2021 har målte data været tilgængelig fra de 3 førstnævnte som 10 minutters middelvind med et "løbende" tids-vindue på 10 minutter. Data for vindstød er således ikke tilgængelig. Estimer for kvaliteten af vindmålingerne for de anvendte vindmålere er vurderet i forhold til følgende usikkerheder:

- Apparatnøjagtighed
- Lokal placering af vindmåler på bro
- Rumlig repræsentation af vindforhold på bro

Informationer om apparatkvaliteter er tilgængelig via fabrikantdata, og kan findes af specs-oplysning for vindmålerne, som vist nedenfor:

FT6742-DM50

Måleområde 0-75m/s

Opløsning 0.1m/s

Nøjagtighed $\pm 0.3\text{m/s}$ (0-16m/s)
 $\pm 2\%$ (16-40m/s)
 $\pm 4\%$ (40-75m/s)

Vind retning:

Måleområde 0 to 360°
Opløsning 1°
Nøjagtighed 4° RMS

Boschung Mecatronic WG/WR 500 3D 3-axis Ultrasonic Wind Speed

Måleområde 0-65m/s
Opløsning 0.01m/s
Nøjagtighed <1.5%RMS ved 12m/s

Vind retning:

Måleområde 0 to 360°
Opløsning 0.1°
Nøjagtighed 2° ved 12m/s

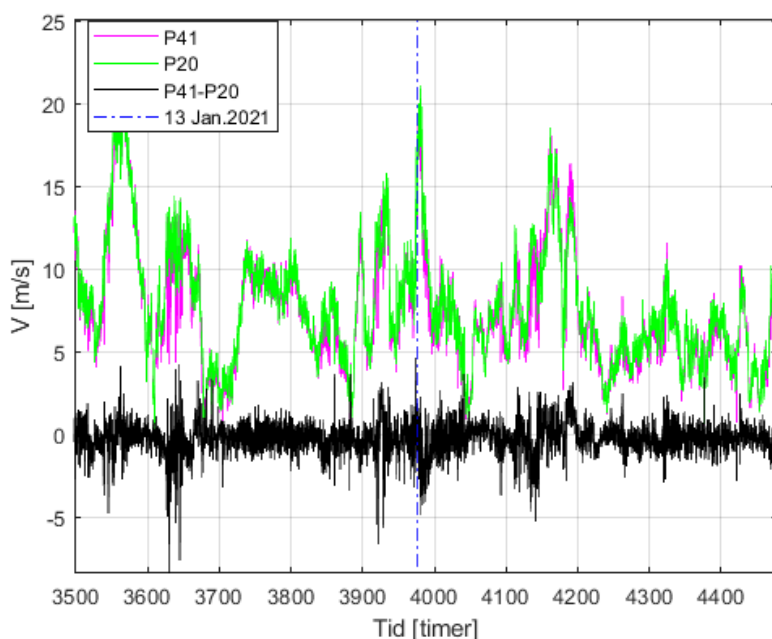
Yderligere specs er givet ved link.

Endvidere er der DTU-erfaring med denne type vindmålere i forbindelse med målinger relateret til vindmøller. En potentiel fejl på alle sonics ligger i nulpunktskalibreringen, som derfor kalibreres i et laboratorium. For nye sensorer er dette dog sjældent et problem. Systematiske fejl relateret til målerens egen-forstyrrelse af vindfeltet fra dens bærende struktur (head korrektion eller flow distorsion), er normalt kalibreret i vindtunnel og er indbygget som en korrektion i selve apparatet. Der pågår dog debat om kvaliteten i forskningskredse, da der anvendes korrektioner på op til 10% ved måling af turbulente strømninger. For middelvinden ses typisk usikkerheder på 2-3%.

Vedrørende den lokale placering på broen, er placering over vej eller sporplan en kilde til fejlmåling ved for lavt placeret vindmåler. Broens egen-indflydelse på strømningen (grænselaget) over brodækket (tog og vej) er tidligere afklaret til ikke at påføre usikkerhed i forbindelse vindmåling på Vestbroen (jf. DTU's afsnit i Havarikommissionens undersøgelsesrapport s. 91).

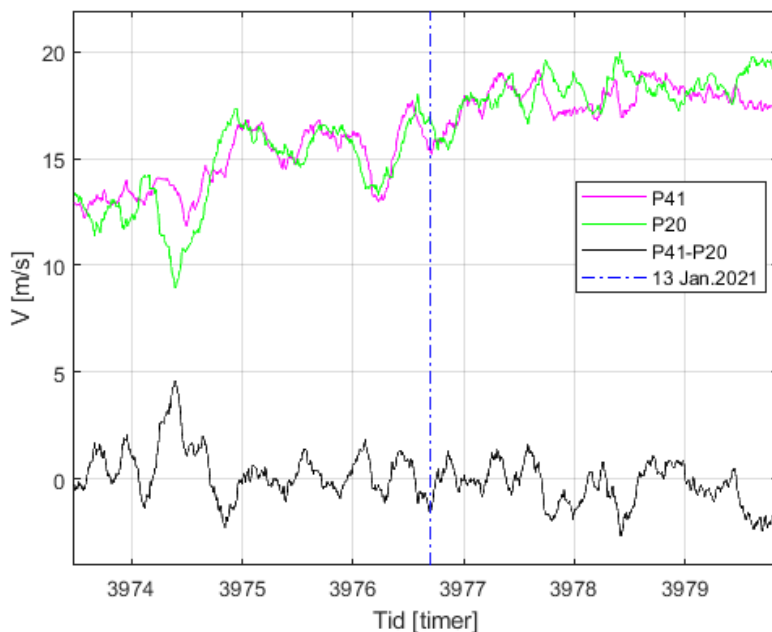
Vestbroen udstrækning på omkring 6.6 km tillader turbulente strukturer af en rumlig størrelse, som er mindre end afstanden mellem målepunkterne (ca. 2.5km). Dette medfører, at der potentielt kan optræde vindhastigheder, som er højere end de 10 minutters middelværdier, der er målt ved de opstillede vindmålere. Operationelt reguleres tilgængeligheden af trafik på broen af den højest målte vindhastighed blandt de opstillede vindmålere. Et estimat af muligheden for tilstedeværelsen af en endnu højere vindhastighed mellem målepunkterne kan relateres til korrelationen mellem de opstillede målere. Figur 32 viser omkring 1000 timers sammenholdte P20 og P41 tidserier, samt differensen mellem vindhastigheder målt omkring 13. januar 2021.

Figur 32 Vindmåling på vestbro, 10 min middel, P20 og P41 samt differensen mellem de to tidsserier. Tidsaksen i timer, svarer til ca 6 ugers målinger omkring 13. Jan.

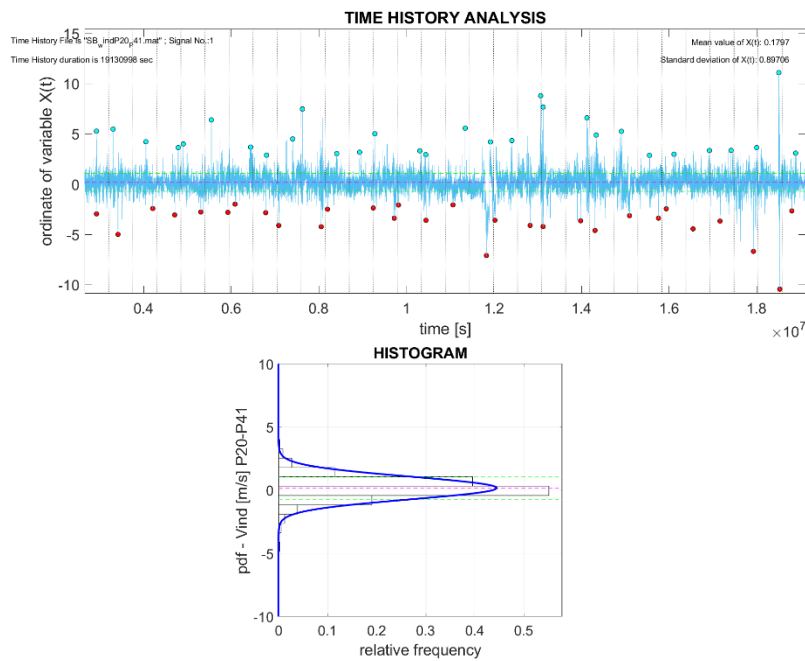


Hastighedsniveauer, hvor broen delvist er lukket, med vindhastigheder over 20 m/s, ses at være opnået i perioden. Figur 33 viser et ca. 6 timer langt udsnit, med differencer på op til 4.5 m/s.

Figur 33 Tidsligt forløb af vindmåling på ca 6 timer omkring 13. januar.

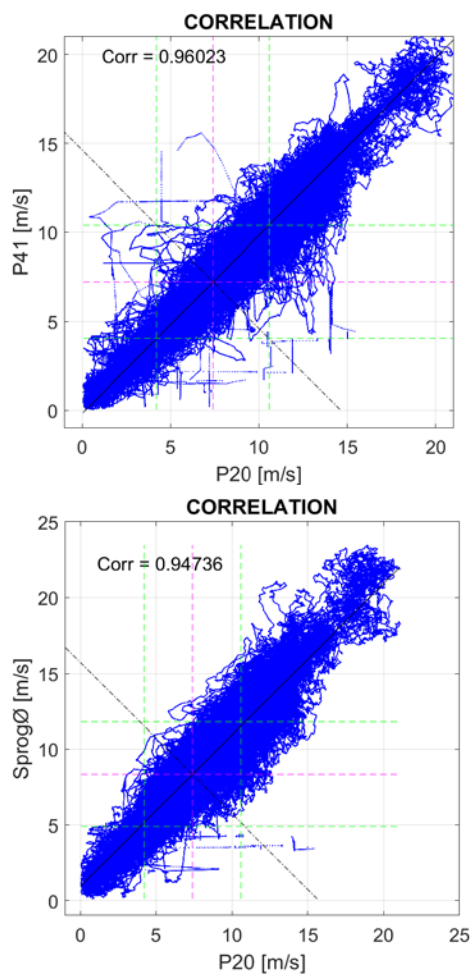


Figur 34 Tidsserie og spredning på difference mellem P20-P41



For en periode på ca. 6 måneder er spredningen for differenser angivet ved at maximal-værdier over 5m/s optræder ca.12-15 gange. Tilsvarende spredning er fundet mellem P20 og Sprogø, med et skift på ca. 1m/s højere hastighed på Sprogø. Korrelationen mellem P20-P41 og Sprogø vindmålerne er vist på figur 35.

Figur 35 Korrelation mellem måling P20-P41 (venstre) og P20-Sprogø (højre)



Korrelationen mellem de 3 målepunkter beregnes til 0.96 og 0.947, hvilket er en høj korrelation, som figur 2 og 3 også indikerer.

Det skal her nævnes, at de målte vindhastigheder på Sprogø generelt er 1-2 m/s højere end ved P20 og P41

Et mål for usikkerheden for den maximale vindhastighed på Vestbroen, med udgangspunkt i de 3 eksisterende målemaster, skønnes ud fra korrelationerne at være 5%, med en måleapparatusikkerhed på yderligere 2% for de anvendte vindmålere. Dette giver totalt en værdi på usikkerheden svarende til en D-værdi på 0.93.

https://havarikommissionen.dk/media/9501/j_2019_alvorlig-ulykke_2019-2_kollision_storebaelt.pdf

<https://amt.copernicus.org/articles/11/249/2018/>

6.4 Fastlæggelse af V-værdierne, hvor skal vindgrænserne ligge

Til bestemmelse af de endelige værdier for kritiske vindgrænser ved togkørsel over Vestbroen, anvendes der en simpel model, som tager hensyn til faktiske forhold og usikkerheder. Modellen baserer sig på at vindgrænsen bestemmes ud fra et multiplum af de forskellige bestemmende faktorer.

Modellen skrives som

$$V = A*B*C*D,$$

Hvor:

V angiver vindgrænsen,

A er den kritiske vindgrænse for en statisk vindbelastning,

B er en korrektionsfaktor for vindstød, baseret på den såkaldte 'gust-factor',

C er en korrektionsfaktor for køredynamikken, dvs. rystelser og ujævnheder i skinnesystemet, og

D er et mål for usikkerhederne ved vindmålinger med anvendelse af ultralydsanemometre.

Bestemmelsen af forskellige faktorer er i ovenstående afsnit beskrevet i detaljer. Faktoren A er baseret dels på målinger i vindtunnel, dels på trækforsøg, og dels på en statisk model af det kritiske moment og den kritiske vindhastighed. Faktoren B er bestemt ud fra vindtunnelforsøg, C er bestemt ud fra en kombination af dynamiske målinger af et passagertog, trækforsøg og en matematiskmodel til bestemmelse af tiden, det tager at vælte en trailer. Endelig er D-parameteren bestemt ud fra specifikationer af de anvendte anemometre.

Ud fra analysen er følgende parametre bestemt:

	A	B	C	D	V
Ulåst trailer	19 m/s	0.83	0.97	0.93	14.22 m/s
Låst trailer	34.9 m/s	0.83	0.97	0.93	26.1 m/s

Modellen viser således, at hvis vindgrænsen alene skulle bestemmes ud fra at sikre, at en trailer på en lommevogn ikke vælter af, så skal vindgrænsen ligge på 14,2 m/s, hvis man ikke kan regne med at traileren på lommevognen er forsvarligt fastgjort. Tilsvarende skal vindgrænsen ligge på 26,1 m/s, såfremt man kan regne med, at trailere på lommevogne er forsvarligt fastgjort.

Modellen tager imidlertid udgangspunkt i de værdier, der er målt og har således ikke en værdi for den variation, der vil være i vinden, i den tid det tager fra en alarm er gået, til broen er tømt. Denne teoretiske værdi vil korrelere med B-værdien, så det er vanskeligt at fastlægge den uden at regne den samme variation med to gange. Endvidere vil store, hurtige ændringer i vinden i forbindelse med kraftig vind ofte være forbundet med stærke storme, som under alle omstændigheder håndteres via DMI's varsler og Banedanmarks beredskabsplan storm. Ikke desto mindre bør den faktiske vindgrænse lægges lidt lavere end den udregnede V-værdi. Dette gælder i særlig grad for den lave værdi, da denne ligger så lavt at vinde af denne styrke, normalt ikke vil give anledning til stormvarsling fra DMI. Det vurderes

således, at den tidligere vindgrænse på Storebælt på 25 m/s er tilstrækkelig til, at en fastspændt trailer ikke kan blæse af.

Banedanmark fastholder de nuværende reducerede vindgrænser, hvor hastigheden sættes ned ved 15 m/s, og broen lukkes for gods ved 20 m/s. Dette er begrundet i, at de nuværende vindgrænser bidrager til sikkerheden i forhold til de oprindelige vindgrænser, og at de trafikale konsekvenser er håndterbare, jf. nedenfor.

Såfremt Banedanmark i sine vindgrænser skal tage højde for, at trailere ikke er forsvarligt fastgjort på lommevogne, vil Banedanmark fastsætte en vindgrænse et sted i spændet 11 - 13 m/s, hvor broen lukkes for gods og evt. en lavere grænse, hvor hastigheden nedsættes.

7 Trafikale restriktioner og konsekvenser

Banedanmark har regnet på konsekvenserne ved at nedsætte vindgrænserne for indførelse af trafikale restriktioner med henholdsvis 5 m/s og 10 m/s. Endvidere har Banedanmark regnet på et forslag til restriktioner, foreslået af branchen.

Først beskrives tilgængelig viden om vindhastigheder og godstrafik over Storebælt. Dernæst beskrives de forskellige scenarier for vindrestriktioner over Storebælt baseret på denne viden. Endelig sammenlignes og delkonkluderes der på konsekvenserne af scenarierne.

De tre scenarier:

- A) Skærpelse af vindrestriktionerne med 5 m/s i forhold til vindrestriktionerne, der har været gældende siden ulykken i 2019
- B) Skærpelse af vindrestriktionerne med 10 m/s i forhold til vindrestriktionerne, der har været gældende siden ulykken i 2019
- C) Branchens forslag til øvrige restriktioner

Beskrivelse af tilgængelig viden om vindhastigheder og godstrafik til brug for scenarierne

Tilgængelige vinddata

- DMI-målinger af vindhastighed (middelvind) fra Omø Fyr i Storebælt, målt hvert 10. minut 2013-2020 (begrænset til 2016-2020)
- RDS¹⁹-database over afviklede kørsler, inklusive begrundelser for forsinkelser, aflysninger mv.
- TPS²⁰-database over planlagte kørsler

Data om godstransport inden hændelsen den 13. januar 2021

- Cirka 26 godstog passerer dagligt hver vej over Storebælt
- De fleste godstog forventes at indeholde lommevogne med sættevogne
- En del godstog foretager normalt stop og skift af lokomotivførere i Nyborg eller Korsør

Vindhastigheder over Storebælt

I det følgende tages udgangspunkt i DMI's tilgængelige data over middelvind målt ved Omø Fyr i Storebælt 2016-2020. DMI's gennemsnitlige data for 5 år er således relativt robuste over for årlige udsving og baseres på ca. 259.000 observationer. Middelvinden er målt hvert 10. minut.

Nedenstående tabel viser hvor kraftig middelvinden er (inddelt i tre intervaller) og hvor lange perioder den blæser i det pågældende interval.

¹⁹ Regularitets- og Driftsstatistik System

²⁰ Train Planning System

Perioder med forskellige vindhastigheder over Storebælt 2016-2020

	Antal perioder		Tid		Længde af perioder i gennemsnit		
Intervaller	I alt	Pr. år	Antal dage pr år	I alt %	Minutter	Timer	Median* minutter
"Lav" 0-10 m/s	4.151	830	297	81%	508	8,5	30
"Mellem" 10-15 m/s	4.867	973	62	17%	91	1,5	30
"Høj" 15+ m/s	716	143	6	2%	55	0,9	20
I alt	9.734	1.947	365	100%	266	4,4	30
Tæt på:							
9-9,9 m/s				7%			
14-14,9 m/s				1%			

*) Da middelvinden er målt hvert 10. minut, er den mindste måleperiode 10 minutter. Alle perioder er derfor delelige med 10.

"Mellem" middelvind (10-15 m/s) opsummeret

Den gennemsnitlige længde af vindperioderne er 91 minutter (1½ time). Medianen er 30 minutter, hvilket indikerer, at der er mange små perioder, hvor vinden kortvarigt når op på 10-15 m/s og går ned igen. Langt de fleste gange vil vinden veksle mellem 0-10 m/s og 10-15 m/s. Vindperioder med 10-15 m/s er relativt jævnt fordelt i løbet af døgnet.

"Høj" middelvind (+15 m/s) opsummeret

Den gennemsnitlige længde af vindperioderne er 55 minutter. Medianen er 20 minutter, hvilket indikerer mange små perioder, hvor vinden kortvarigt når op på +15 m/s. Langt de fleste gange vil vinden veksle mellem 10-15 m/s og +15 m/s. Vindperioder med +15 m/s er relativt ujævnt fordelt i løbet af døgnet med mest vind i dagtiden.

Sikkerhedsmargin for trafikstyring

Banedanmark, Trafikstyring Midt, der forvalter vindrestriktionerne over Storebælt, har oplyst, at når der forventes vind over tærskelværdien, så fastholdes restriktionen typisk, selvom vinden i et kortere tidsrum skulle falde til under tærskelværdien. Fortsættes denne praksis med de påtænkte lavere vindtærskler, er det derfor muligt, at en del af de korte perioder i praksis vil blive håndhævet i længere sammenhængende perioder end tallene tilsiger. Det fremgår ligeledes af tabellen, at middelvinden i 7% af tiden er 9-9,9 m/s, hvilket er tæt ved den nedre vindgrænse og i 1% af tiden er 14-14,9 m/s og dermed tæt ved den øvre vindgrænse. Det faktiske tidsrum med håndhævede restriktioner kan således blive noget større end beregnet.

Vindrestriktionerne, der har været gældende siden ulykken i 2019

Tærsklerne for vindhastigheder over Storebælt (ved middelvind) blev som følge af ulykken sat til:

- 0-15 m/s – 120 km/t for godstog
- 15-20 m/s – 80 km/t for godstog
- Over 20 m/s – Ingen kørsel for godstog

Restriktionerne over Storebælt træder i kraft ved høj middelvind, det vil sige fra 15 m/s (80 km/t), og godstrafikken indstilles helt ved +20 m/s. Som det fremgår af tabellen ovenfor, vil disse restriktioner kun berøre trafikken i ca. 2 % af tiden. Inkluderer man sikkerhedsmargin på 14-14,9 m/s, hvor vinden er tæt på tærsklen, vil restriktionerne samlet berøre trafikken i ca. 3 % af tiden.

Scenarie A – Skærpelse af vindrestriktionerne med 5 m/s i forhold til vindrestriktionerne, der har været gældende siden ulykken i 2019

Scenarie A er en skærpelse af vindrestriktionerne fastsat efter ulykken den 2. januar 2019. Tærskler for vindhastigheder over Storebælt (ved middelvind) er i scenarie A derfor sat til:

- Lav - 0-10 m/s – 120 km/t for godstog
- Mellem - 10-15 m/s – 80 km/t for godstog
- Høj - Over 15 m/s – Ingen kørsel for godstog

Scenarie A er en skærpelse af de regler, der har været gældende siden 2019. Restriktionerne over Storebælt vil i dette scenarie træde i kraft allerede ved 10 m/s (80 km/t) og godstrafikken indstilles helt ved +15 m/s. Som det fremgår af tabellen ovenfor, vil disse restriktioner berøre trafikken i 17% af tiden (80km/t) plus 2% af tiden, hvor trafikken indstilles helt, altså i alt knap 20% af tiden. Inkluderer man sikkerhedsmargin på 9-9,9 m/s (7% af tiden), vil restriktionerne kunne berøre trafikken i samlet set ca. 26% af tiden, hvoraf godstrafikken helt indstilles i 3% af tiden (når man medtager sikkerhedsmargin på 14-14,9 m/s).

Scenarie B – Skærpelse af vindrestriktionerne med 10 m/s i forhold til vindrestriktionerne, der har været gældende siden ulykken i 2019

Tærskler for vindhastigheder over Storebælt (ved middelvind) er i scenarie B sat til:

- Lav - 0-10 m/s – 80 km/t for godstog
- Mellem - Over 10 m/s – Ingen kørsel for godstog

Da vindgrænsen 5 m/s brydes hyppigt, indregnes muligheden for 120 km/t for godstog ikke i scenariet.

Scenarie B er en yderligere skærpelse af de regler, der har været gældende siden 2019. Restriktionerne over Storebælt vil i dette scenarie være konstante for 0-10 m/s (80 km/t), og godstrafikken indstilles helt ved +10 m/s. Godstrafikken over Storebælt vil således være under restriktioner 100% af tiden.

Som det fremgår af tabellen ovenfor, vil trafikken indstilles helt i 19% af tiden. Inkluderer man sikkerhedsmargin på 9-9,9 m/s (7% af tiden), vil trafikken være helt indstillet i samlet set ca. 26% af tiden.

Konsekvenser af scenarie A og B

For at estimere påvirkningerne tages der udgangspunkt i nuværende erfaringer om forsinkelser forårsaget af vejrlig på strækningen Nyborg – Korsør med følgende antagelser:

- Antagelse: at vindrestriktioner (nedsat hastighed eller indstilling af drift) medfører cirka 2 forsinkede eller aflyste godstog i timen, men at antallet kan variere betydeligt.
- Antagelse: at vindrestriktioner (nedsat hastighed eller indstilling af drift) ikke medfører forsinkelser af passagertog.

Forklaring: Ved hastighedsnedsættelse til 80 km/t forventes tidstab for godstog over broen at være ca. 2-10 minutter. I de fleste tilfælde forventes forsinkelsen ikke at påvirke andre tog. Mindre tidstab over Storebælt kan dog, i nogle tilfælde, føre til behov for at passagertog overhaler forsinkede godstog med yderligere forsinkelser til følge for disse godstog, men dette kan ikke kvantificeres. Genopretning efter eventuelle forsinkelser sker i henhold til gældende disponeringsplan.²¹

Hvis en restriktion (nedsat hastighed eller indstilling af drift) medfører 2 forsinkelser eller aflysninger af godstog i timen, kan følgende beregning opstilles:

10-15 m/s	1473 timer pr. år	2946 forsinkede eller aflyste godstog
+15 m/s	131 timer pr. år	262 forsinkede eller aflyste godstog
I alt		3208 forsinkede eller aflyste godstog

Fortsættelse af reglerne indført i 2019 vil således medføre cirka 262 forsinkede eller aflyste godstog.

Scenarie A (skærpelse af reglerne indført i 2019 med 5 m/s) vil derimod medføre cirka 3.208 *forsinkede eller aflyste* godstog. Det er skønsmæssigt ca. 9 forsinkede eller aflyste godstog i gennemsnit pr. dag med forskelle på sæson og tidspunkt på døgnet.

Scenarie B (skærpelse af reglerne indført i 2019 med 10 m/s og 80 km/t resten af tiden) vil derimod medføre cirka 3.208 *aflyste* godstog. Det er skønsmæssigt ca. 9 aflyste godstog i gennemsnit pr. dag med forskelle på sæson og tidspunkt på døgnet.

Disse er formentlig konservative skøn. Antallet af forsinkede eller aflyste tog må formentlig forventes at være højere på grund af:

- Fortsat håndhævelse af vindrestriktioner ved midlertidig nedgang i vindhastighed (sikkerhedsmargin).
- Forsinkede og opmarcherede godstogs påvirkning på punktligheden af andre tog, herunder også af passagertog.

Scenarie C – Branchens forslag til øvrige restriktioner

Banedanmark har desuden regnet på trafikale konsekvenser ved indførelse af følgende restriktioner, der er foreslået af godsbranchen:

²¹ Generelle "Principper For Afvikling" (PFA) K21

- Ingen trafik kan krydse (godstog) over Storebæltsforbindelsen
- Ingen tog i nabosporene (inkl. på Nyborg station og Korsør station)
- Godstog skal altid benytte det sydlige spor på forbindelsen.
- Godstog skal standses og inspiceres ved ankomst til Nyborg/Korsør

Det er ikke fastslået ved hvilken vindhastighed, de træder i kraft.

Til belysning af konsekvenserne ved indførelse er der opstillet en køreplan for ét døgn, der opfylder de foreslåede restriktioner og samtidig forsøger at udnytte kapaciteten fuldt ud.

- I forhold til forbud mod tog i nabosporene ved Korsør/Nyborg forudsættes i denne analyse, at der godt kan holde tog i modsat perronspor, når persontog ekspederes i spor 2 og 3 og godstog i spor 1 og 4.
- Det antages, at alle godstog indeholder sættevogne på lommevogne.

Konsekvenser ved 24 timers restriktioner:

- Kun cirka 32 af 70 passagertog vil kunne passere Storebælt pr. dag pr. retning
- Cirka 25.000 passagerer, der passerer over Storebælt, vil blive direkte berørt af aflysninger eller forsinkelser, foruden et ukendt antal passagerer i det øvrige netværk
- I myldretiden vil kun 2 passagertog og 1 godstog kunne passere pr. time pr. retning (normalt cirka 5 passagertog og 2 godstog)
- Køreplanen for landstrafikken vil skulle fastlægges efter passage over Storebælt, hvilket vil give store problemer andre steder i landet.
- Køreplanen bliver stram og sårbar over for forsinkelser
- Det vil medføre store materiel- og personalebindinger for især DSB
- Godstog skal omlægges til 24 timers drift med halve dages forsinkelser
- Alle godstog forsinkes mindst 45 minutter ved Korsør og Nyborg på grund af inspektion af lommevogne
- Godstog opmarcheres i Sverige og Tyskland og passagertog forskellige steder i Danmark
- Der opstår mangel på lokomotivførere og togpersonale som følge af forsinkelser og opmarching
- Kvaliteten af såvel passagertransport og godstransport bliver markant forringet

Konsekvenserne af ét døgn restriktioner er således meget drastiske, især for passagertrafikken, ligesom den samlede køreplan for al trafik skal omlægges og bliver sårbar. Dertil kommer, at der lægges beslag på mange personaleressourcer, der mestendels slet ikke har noget med godstransporten at gøre.

Hvis restriktionerne indføres ved høj middelvind (+15 m/s), vil det være nødvendigt at kende vindprognosen og planlægge i så tilpas lang tid i forvejen, at hele landstrafikken kan omlægges til passage af godstog over

Storebælt og personale indkaldes i de berørte organisationer. Høj middelvind optræder mange gange årligt, især i vinterhalvåret. Banedanmark vil derfor skulle vælge tilpas lange forventede perioder på forhånd. I realiteten vil de mange kortere perioder med høj middelvind derfor resultere i indstilling af (gods)trafikken, idet omlægningerne ikke kan gennemføres med kort varsel. De 2% af tiden med høj middelvind vil derfor formentlig skulle tillægges betydelige sikkerhedsmarginer baseret på vejrudsigter, der indikerer, at vinden *kan* nå grænsen. Hvis restriktionerne indføres ved en lavere vindhastighed end 15 m/s, forlænges perioderne med ovenstående konsekvenser betydeligt, ligesom sikkerhedsmargin kan forventes at blive større.

Sammenligning og delkonklusion

De tre scenarier for vindrestriktioner medfører alle i forskelligt omfang enten forsinkede eller aflyste tog. Der er imidlertid meget stor forskel på antallet af berørte tog, herunder berørte godstog, og afledte konsekvenser for passagertrafikken i øvrigt.

Konsekvenserne af de restriktioner, der har været gældende fra ulykken i 2019 til hændelsen i 2021 vurderes at være overkommelige for både godstrafikken og for den øvrige trafik.

Scenarie A, B og C vil derimod få større konsekvenser, ikke alene for den påvirkede godstransport, men i scenarie B vil der være afledte effekter på passagertrafikken og i scenarie C's øges disse påvirkninger betydeligt.

I forbindelse med indstilling af driften ved længerevarende perioder (scenarie A og B) eller kraftig reduktion i mængden af gods-kapacitet (scenarie C), vil det medføre ophobning af godstog flere steder i Danmark og derefter i Tyskland og Sverige. I Danmark er der kun begrænset kapacitet til at parkere godstog, bl.a. som følge af sporlængde. Det kan også give en afsmittende effekt for passagertrafikken på grund af begrænsede muligheder. Det ventes at have store konsekvenser for godstrafikken og endvidere påvirke passagertrafikken. Desuden kan ventetider medføre mangel på lokomotivførere og togpersonale.

Indstilling af driften eller kraftig reduktion i mængden af gods-kapacitet vil medføre, at Banedanmark kan tilbyde et ringere produkt til godsvirksomhederne som følge af:

- Omlægninger
- Midlertidig parkering for at afvente ledig plads
- Tidligt stop/reduktion for godstrafikken med parkering af godstog i Tyskland og Sverige.

På mellemlang sigt kan vindrestriktionerne eventuelt medføre:

- Nedgang i transporteret gods ad jernbane i ScanMed Korridoren²² til og fra de nordiske lande

²² Medlemslandene i EU af har forpligtet sig til at indføre en række grænseoverskridende banegodskorridorer. Jernbanestrækningen mellem Stockholm og Palermo, er én af strækningerne, der i EU-regi er udpeget som strategisk vigtig korridor for jernbanegodstrafik. Korridoren som kaldes Scandinavian-Mediterranean Rail Freight Corridor (ScanMed RFC) er af stor betydning for godstransporten mellem Nord- og Sydeuropa. ScanMed er en del af et større

- Økonomiske konsekvenser for godsjernbanevirksomhederne som følge af mindre godsmængder på jernbanen

På lang sigt kan vindrestriktionerne eventuelt medføre:

- Risiko for permanent nedgang i transporteret gods ad jernbane til og fra de nordiske lande
- Konsekvenser for grøn transport som følge af modalskift til mere forurenende transportformer
- Økonomiske og beskæftigelsesmæssige konsekvenser for jernbanegodssektoren som følge af et reduceret jernbanegodsmarked
- Evt. udfordringer med andre europæiske lande, der er afhængige af godstransport gennem Danmark
- Evt. behov for anlæg/udvidelse af opmarchområder i Danmark, Sverige og Tyskland

8 Hændelser

Banedanmark har noteret sig, at Havarikommissionen i sin rapport om ulykken på Storebæltsbroen den 2. januar 2019 har forespurgt øvrige europæiske havarikommissioner om kendskab til lignende hændelser. Havarikommissionen nævner tre ulykker i henholdsvis Norge i 2006, Tyskland i 2014 og Sverige i 2019. Havarikommissionen oplyser i sin rapport, at hvad angår ulykkerne i Norge og Tyskland blev det konstateret at sættevognstraileren ikke var korrekt læsset og hovedbolten ikke var placeret i skamlen. Der oplyses ikke yderligere om ulykken i Sverige.

Trafikstyrelsen har oplyst, at DB Cargo Scandinavia A/S har registeret i alt ni hændelser i perioden 2. januar 2019 og til en hændelse med en forskubbet trailer 13. januar 2021, som vedrører hændelser med lommevogne. Havarikommissionen har ikke afsluttet undersøgelserne af hændelsen i 2021, og der foreligger derfor ikke en undersøgelsesrapport.

I samme periode fra ulykken den 2. januar 2019 til den 13. januar 2021 har Banedanmark heraf fået indberettet 6 hændelser med trailere, som ikke har været læsset korrekt, eller hvor låsen på lommevognens skammel ikke har været låst korrekt, af DB Cargo Scandinavia A/S. Det fremgår ikke af anmeldelserne, at der skulle være identificeret irregulære sikkerhedsmæssige forhold under Banedanmarks ansvarsområde, hvilket er ensbetydende med at Banedanmark ikke har kunne følge yderligere op på hændelserne. Det bemærkes således, at sikkerhedscertificerede jernbanevirksomheders sikkerhedsmæssige ageren er et anliggende mellem de pågældende virksomheder, fx DB Cargo Scandinavia A/S, og Trafikstyrelsen. Dette gælder også indberetning af og opfølgning på hændelser med lommevogne, som ikke er Banedanmarks ansvar, men den aktuelle virksomheds som fx DB Cargo Scandinavia A/S. Banedanmark er ikke sikkerhedsmyndighed for DB Cargo Scandinavia A/S og er forpligtet til at give adgang til infrastrukturen på lige og ikke-diskriminerende vilkår. Banedanmark har således ikke mulighed for f.eks. at udelukke jernbanevirksomheder fra kørsel på den danske jernbaneinfrastruktur på baggrund af hændelser.

9 Vindskærme som barriere

Sidevindfølsomheden for tog stiger kraftigt, når hastigheden stiger. I takt med introduktionen af højhastighedstog er opmærksomheden på aerodynamik og risikoen for, at vind kan medvirke til, at tog vælter eller afsporer blevet større. På særligt udsatte positioner på det europæiske jernbanelenet og langt overvejede på højhastighedsbaner er der opsat vindskærme, som skærmer af for kraftig sidevind.

Opsætning af vindskærme er kostbart og nogle steder meget vanskeligt. Banedanmark estimerer, at det som udgangspunkt vil koste ca. 33.000 kr. per meter at opsætte vindskærme i den almindelige infrastruktur. Nogle steder vil det derudover kræve ændringer i sporets underbygning, ligesom der vil skulle findes særlige løsninger på broer. I nogle tilfælde kan det også blive nødvendigt at ekspropriere for at få plads til vindskærmen. Hvis der skal opsætte vindskærme, som en sikker barriere mod at en ikke-forsvarligt fastgjort trailer blæser af, skal skærmene opsættes på hovedparten af de danske strækninger. Det vil blive meget omkostningsfuldt og have væsentlig betydning for dyreliv og landskabet. Desuden vil der være samme problemstilling mange steder i Europa. A/S Storebælt oplyser, at såfremt ønsket er at opsætte vindskjold på Storebælt, skal der gennemføres omfattende beregninger af, at broen og eventuelle vindskærme kan holde til det ekstra vindtryk, der vil opstå i en kraftig storm. Banedanmark vil derfor ikke foreslå denne løsning. Vindskærme er heller ikke nødvendige, hvis jernbanevirksomhederne tilser, at gods er fastspændt.

Udenlandske erfaringer

Banedanmark har forespurgt en række europæiske infrastrukturforvaltere om deres eventuelle anvendelse af vindskærme. Flere af landene svarer, at de ikke anvender vindskærme. For de landes vedkommende, som anvender vindskærme, er det fælles for landene, at skærmene primært opsættes på højhastighedsbaner og på særligt udsatte lokationer. Fælles for besvarelsene er, at skærmene opsættes for at undgå afsporinger.

Frankrig: Vindskærme anvendes på særligt udsatte steder typisk på broer, hvor vinden er særlig kraftig.

Holland: Der er indtil nu opsat vindskærme på en bro. Tidligere var der vindmålinger, som var retningsgivende for, med hvilken hastighed togene kunne passere broen. Hvis dette forsøg er positivt, vil flere høje broer eller særligt udsatte steder på infrastrukturen efter det oplyste blive udstyret med vindskærme. Formålet med opsætning af vindskærme er at forhindre afsporinger og skader på køreledningsanlæg og strømaftager.

Norge: I bjergområder, hvor jernbane er særligt udsat for vind og sne, er der opsat sneskærme.

Schweiz: Der anvendes ikke vindskærme i Schweiz

Sverige: Der er endnu ikke anvendt vindskærme, men opsætning af enkelte skærme er planlagt på en ny højhastighedsbane hvor der er identificeret et

par særligt udsatte steder bl.a. broer. Formålet med vindskærme er at nedsætte risikoen for afsporing.

Tjekkiet: Der anvendes ikke vindskærme i Tjekkiet.

Tyskland: Der er etableret mere end 40 km vindskærme på højhastighedsbane på særligt udsatte steder eksempelvis broer. Der er også planlagt opsætning af vindbeskyttelse i kystområder på konventionelle hastighedslinjer. Formålet med vindskærme er at forhindre afsporing.

Østrig: Der anvendes ikke vindskærme i Østrig.

10 Profilkontrol som barriere

Et moderne profilkontrolanlæg har sensorer, der ved togets passage kontrollerer, at alt gods er indenfor læsseprofilen. Profilkontrolanlæg giver ikke garanti for, at gods ikke falder af eller forskubber sig. Anlæggene fungerer alene som kontrol af, at godset på tidspunktet for passage af anlægget ikke har forskubbet sig. For at virke skal profilkontrolanlægget nå at give en alarm, så tidligt at stationsbestyreren kan bede lokomotivføreren bremse toget, inden toget møder et modkørende tog. Problemet, som udløste alarmerne, skal efterfølgende løses, inden trafikken kan genoptages. Profilkontrolanlæg er typisk udstyret med kamera, som overfor stationsbestyreren kan visualisere, hvad der har udløst alarmerne. Anvendelse af profilkontrolanlæg vil reducere længden af den kørsel, hvor en ikke-forsvarligt fastgjort trailer er blæst ud af profilen. Hvor meget risikoen kan reduceres, afhænger af, hvor mange profilkontrolanlæg der opsættes.

Hvis man opstiller profilkontrolanlæg i hver ende af Storebæltsforbindelsen, vil man kunne væsentligt reducere risikoen for ikke-forsvarligt fastspændt gods, der er blæst ud af profil, inden det er kørt op på broen, rammer et modkørende tog på broen. Ligeledes vil risikoen for, at ikke-forsvarligt fastspændt gods, der er blæst ud af profil på Storebæltsbroen, rammer et modkørende tog kunne reduceres væsentligt, efter toget er kørt i land. Det sikrer imidlertid ikke mod ikke-forsvarligt fastspændt gods, der blæser ud af profil på broen, rammer et modkørende tog på broen. Ikke-forsvarligt fastspændt gods kan blæse ud af profilen mange steder, og der er så meget trafik på hovedstrækningen, at det relativt hurtigt vil ramme et tog, hvis det er kommet ind i det modsatte spors profil. Banedanmark vurderer, at man kun vil kunne fjerne en mindre del af risikoen for ulykker, hvor jernbanevirksomheder ikke har fastspændt godset, ved opsættelse af to profilkontrolanlæg. Det skal tilføjes, at Havarikommissionen tidligere har vurderet, at idet traileren var på plads ved passage af tunnelen ville de profilkontrolanlæg, der tidligere har været på Storebæltsbroen, ikke kunne have forhindret ulykken den 2. januar 2019.

Et profilkontrolanlæg vil medføre falske alarmer og mindre alvorlige alarmer, som vil bidrage negativt til punktligheden. Banedanmark kan ikke på nuværende tidspunkt estimere omfanget af dette. Profilkontrolanlæg har dog udviklet sig i takt med, at der er udviklet bedre sensorteknologi. Anlæggene er blevet billigere og mere pålidelige. Banedanmarks foreløbige vurdering er, at to profilkontrolanlæg, der ikke skal bygges ind i sikringsanlægget, men giver en alarm i fjernstyringscentralen vil koste ca. 12 millioner kroner. Hertil kommer løbende driftsomkostninger. Banedanmark arbejder videre med et beslutningsoplæg om profilkontrolanlæg, der yderligere belyser prisen, den forventede sikkerhedsmæssige gevinst og konsekvenser for punktlighed.

Årsagen til, at Banedanmark lægger op til at profilkontrolanlæggene – i øvrigt i lighed med de eksisterende vindmålere - ikke skal bygges ind i sikringsanlægget er, at Banedanmark vurderer, at man på forsvarlig vis kan håndtere alarmer i Trafikstyringen. En løsning, hvor en alarm i profilkontrolanlægget automatisk bringer et tog til standsning, eksisterer

ikke og vil først skulle udvikles. Først i den eksisterende teknologi og derefter i det nye signalsystem. Alene i det nye signalsystems teknologi vurderes en løsning inkl. test og godkendelser at kunne løbe op i 10 – 15 millioner kr. oven i selve profilkontrolanlægget. Dertil kommer en række usikkerheder i forhold til at foretage ændringer både i det eksisterende sikringsanlæg og det nye signalsystem midt i en kompleks udrulningsperiode. Banedanmarks foreslår derfor, at en løsning med profilkontrolanlæg i første omgang ikke bygges ind i sikringsanlægget.

Udenlandske erfaringer med profilkontrolanlæg

Banedanmark har forespurgt en række europæiske infrastrukturforvaltere om deres eventuelle anvendelse af profilkontrolanlæg. Af besvarelserne er det alene Schweiz og Østrig, som anvender moderne censorbaseret profilkontrol.

Frankrig: Der anvendes ikke profilkontrolanlæg.

Holland: Der anvendes ikke profilkontrolanlæg.

Norge: Der anvendes ikke profilkontrolanlæg.

Schweiz: I Schweiz er der opsat 6 profilkontrolanlæg på de mest trafikerede strækninger typisk på transitruer. Anlæggene er primært for at kontrollere godstog. En alarm går til fjernstyringscentralen, hvorefter toget standses for at udbedre problemet.

Sverige: Der anvendes ikke profilkontrolanlæg.

Tjekkiet: Profilkontrol sker alene ved ældre, faste anlæg inden afgang fra udgangsstationerne.

Tyskland: Der anvendes ingen tekniske midler til at opdage, om toget overskrider profilen, mens det kører.

Østrig: En større investering er i gang med henblik på opsætning af profilkontrolanlæg. Slutmålet er at have opsat 47 profilkontrolanlæg typisk foran særlige lokaliteter som broer, tunneler, terminaler og efter grænseovergange. På hovedstrækningerne vil der maksimalt være 150 km mellem anlæggene. Alarmer for profiloverskridelse modtages i fjernstyringscentralen, og alt efter problemets karakter standses toget straks eller på næste station.

11 Beredskab og vind i Banedanmark

Banedanmark, Infrastruktur Forst ejer stormberedskabet. Det indebærer, at trafikken altid indstilles senest ved en middelvind på 25 m/s, og at der i praksis ikke nås op på vindstød på de ca. 35 m/s., hvor lommevogn vælter med en forsvarligt fastspændt trailer. Sikkerheden her knytter sig til DMI's prognoser, og er således ikke en forudsigtelse på baggrund af vindmålere opstillet lige ved infrastrukturen. Logikken er således anderledes, og der regnes for eksempel ikke målesikkerhed ind.

Hvis Forst vurderer, at der skal oprettes et beredskab, kontaktes Driftscenter Danmark (DCDK). Omvendt skal DCDK ligeledes kontakte Forst, hvis DCDK vurderer, at der bør oprettes et beredskab. Forst og DCDK afstemmer herefter.

Hovedreglen for hvornår stormberedskab etableres er:

- Niveau I, sættes ved vindhastigheder på 21 m/s i middelvind og vindstød op til 32 m/s (hård kuling, med vindstød af stormende kuling). Beredskabet består af skovarbejdere i biler. Køreplanen gennemføres i fuldt omfang.
- Niveau II, sættes ved vindhastigheder mellem 21 m/s og 25 m/s i middelvind (stormende kuling) eller vindstød over 32 m/s (stormstyrke). Beredskabet består af skovarbejdere i biler, kørestrømstroljer i beredskab, 2 skovarbejdere pr trolje, samt evt. hjælpevognsberedskabet. Der indføres timedrift – (20 min`s drift på Kystbanen / Kastrupbanen), og nedsat hastighed på foruddefinerede skovstrækninger, Godstog aftales tog for tog med jernbanevirksomheden.
- Niveau III, sættes ved vindhastigheder over 25 m/s i middelvind (storm). Beredskabet består af skovarbejdere i biler, kørestrømstroljer i beredskab, 2 skovarbejdere pr trolje, tovejsmaskiner samt evt. hjælpevognsberedskabet. Trafikken indstilles på berørte strækninger. Godstog parkeres på anviste stationer. Eventuelt beslutter Banedanmark at jernbanevirksomhedernes godstog mod Danmark skal standses.

Der sker afvigelser fra hovedreglen, hvis Forst vurderer, at der er større risiko for væltede træer som følge af forskellige faktorer, som vindretning, vand, løv, naboforhold, mv. I disse tilfælde kan det vælges at sætte et beredskab efter et højere niveau eller at sætte et beredskab, før kriterierne i niveau I er opnået.

Ved forventning om kraftig vind indkalder Banedanmarks Driftscenter Danmark til strategimøde. Ved mødet deltager bl.a. DMI, jernbanevirksomhederne og Forst. På mødet vurderes det, om der skal ske indskrænkninger i trafikken, og om der skal være hastighedsnedsættelser på nogle strækninger. Det er Driftscenter Danmark der ejer strategimødet.

Nedsætning af strækningshastighed sker, hvis det vurderes, at forholdene gør, at der kan være risiko for kollision med f.eks., væltede træer. Det sker, for at bremselængden gøres kortere, så kollisionen kan undgås og evt. nødbremsninger sker med mindre voldsomhed. Hastighedsnedsættelse sker også, fordi køreledningen kan svinge så meget ud, at den svinger uden for strømaftageren, hvilket bevirker at strømaftageren, som trykker opad for at have kontakt med køreledningen, vil løfte sig. Når køreledningen derefter svinger tilbage, vil den blive revet ned.

Storebæltsforbindelsen har særlige restriktioner for vind, som er beskrevet i supplerende sikkerhedsbestemmelser SSB 129-2020. Vindgrænserne blev skærpet efter ulykken den 2. januar 2019. For nærmere detaljer se afsnit 2.3.

12 Diskussion, klimaforandringer mv.

DMI oplyser, at vi i Danmark typisk har vind mellem syd og vest. DMI oplyser, at de kun har begrænsede data fra Storebælt. DMI har dog undersøgt vinddata fra Omø Fyr. DMI har ikke i de gennemgåede data kunnet identificere nogen særlig ændring af vindretning på Storebælt over de senere år. DMI oplyser også at der har været registreret betydelige flere storme efter 1980.

Eventuelle fremtidige klimaforandringer, der medfører mere ekstremt vejr, vil forventeligt medføre flere lukkedage på Storebælt. Forudsat at de nuværende processer fungerer, med samarbejde med DMI om varslinger, vindmålere på broen og alarmer i trafikstyringen, vurderer Banedanmark, at klimaforandringer ikke på kort sigt vil få konsekvenser for jernbanesikkerheden.

Eventuelle fremtidige klimaforandringer vil ligeledes betyde, at der vil komme kraftigere vind på land, hvilket vil føre til, at stormberedskabet sættes i kraft oftere. Det kan ligeledes over tid føre til behov for ændringer i beredskabet.

13 Videre arbejde med vind i Banedanmark

Banedanmark fortsætter arbejdet med jernbanesikkerhed både generelt og på Storebæltsbroen. Herunder vil der også fremover være et fokus på vind.

Som et første skridt vil Banedanmark i august 2021 indkalde jernbanegodsbranchen til en gennemgang af nærværende rapport.

Banedanmark registrerer alle hændelser på infrastrukturen, der ligger inden for Banedanmarks ansvarsområde. Der bliver endvidere fulgt op med årsagsanalyser på væsentlige hændelser, som vedrører Banedanmarks ansvarsområde²³. Der er derudover opstillet sikkerhedsindikatorer for en række forhold i infrastrukturen. Hvert kvartal bliver der fulgt op på om der er alarmerende trends, eller gentagelsestilfælde på de samme delsystemer, samme geografier mv.

Vindmålere, der har været opstillet på Storebæltsbroen, har været indstillet til kun at rapportere og gemme middelværdier, fordi det er det, der skal bruges til at regulere trafikken. I forbindelse med dette analysearbejde bliver vindmålerne omprogrammeret, således at der rapporteres og gemmes flere vinddata. Det giver mulighed for i fremtiden at lave bedre dataunderstøttede og mere præcise analyser af vind på Storebælt. Bl.a. ville den nuværende B-værdi kunne beregnes med større præcision. Banedanmark og DTU fortsætter samarbejdet året ud, mhp. at nyttiggøre de mere detaljerede vinddata. Såfremt, de nye data mod forventning giver anledning til væsentlige ændring af de værdier, der gengives i denne rapport, udsendes et korrektiv til rapporten. Hvis der som forventet alene er tale om mindre ændringer, vil det indgå i Banedanmarks videre arbejde med sikkerhed og vind uden udsendelse af korrektiv til rapporten. Hvis der er interesserede, der ønsker indsigt i disse data, er man dog velkommen til at henvende sig til Banedanmark med henblik på at få adgang til disse.

Banedanmark har beregnet C-værdien – effekten af skinner, ophæng mv. - på baggrund af spormålinger og allerede tilgængelige data. Banedanmark forventer i løbet af efteråret 2021 i samarbejde med DB Cargo at gennemføre målekørsler med de accellerometre på lommevogne, mhp. at måle, om der er påvirkninger på broen, som vi ikke har haft opmærksomhed på. Det har således ikke været muligt at opnå en aftale om at gennemføre dette forsøg indenfor rammerne af denne rapport. Vi forventer – i overensstemmelse med de eksisterende data - at finde, at der ikke er noget særligt ved infrastrukturen. Såfremt de nye data mod forventning giver anledning til væsentlige ændring af de værdier, der gengives i denne rapport, udsendes et korrektiv til rapporten. Hvis der alene er tale om mindre ændringer, vil det indgå i Banedanmarks videre arbejde med sikkerhed og vind uden udsendelse af korrektiv til rapporten. Hvis der er interesserede, der

²³ Forhold der hører til hos en anden aktør, herunder en jernbanevirksomhed med sikkerhedsgodkendelse eller sikkerhedscertifikat skal behandles hos denne i henhold til denne virksomheds sikkerhedsledelsessystem.

Ønsker indsigt i disse data er man dog velkommen til at henvende sig til Banedanmark med henblik på at få adgang til disse.

Banedanmark kommer fremover til i netredegørelsen - der beskriver karakteristika ved infrastrukturen for jernbanevirksomhederne - at explicitere, hvilke krav der stilles til køretøjers vindfølsomhed i forhold til at køre på Banedanmarks infrastruktur.

14 Bilag 1 Havarikommissionens beskrivelse af ulykken

Nedenstående er ordret citeret fra Havarikommissionens rapport om ulykken den 2. januar 2019 s. 9 og 10:

"2.1 Beskrivelse af ulykken

Onsdag den 02.01.2019 kl. 7:29 kolliderede L 210 (Århus H-Københavns Lufthavn) med en sættevognstrailer fra det modkørende G 9233 (Høje Tåstrup-Fredericia). Kollisionen skete på Storebæltsbroen (Vestbroen) tæt ved landfæstet på Fyn i strækningens km 127,440 (markeret på billedet herunder). På kollisionstidspunktet kørte begge tog med en hastighed på ca. 120 km/t.



Figur 1 Oversigt over Vestbroen. Sprogø øverst til højre, landfæstet ved Knudshoved nederst til venstre. Kollisionsstedet (km 127,440) er markeret

Under G 9233's passage af Vestbroen, blæste en tom sættevognstrailer (gardintrailer), placeret lige op til lokomotivet, delvist af sin godsvogn (lommevogn) omkring km 126,640. Den blev hængende på vognen og blev slæbt med toget. Sættevognstraileren hang ind over nabosporet, hvor overbygningen delvist slæbte hen ad beskyttelsesskinnerne og beskadigede bl.a. sveller og skinneudtræk.

Omkring 800 meter senere mødte G 9233 det modkørende L 210 cirka i strækningens km 127,440. Sættevognstraileren fra godstoget hang da sandsynligvis med bunden opad (drejet mellem 90 og 180 grader fra den oprindelige opretstående position) - ind over lyntogets spor og ramte lyntogets front med trailerladet neden for førerrumsvinduet og trængte ind gennem førerrumsvinduet med ladets højre vange. Trailerladet trængte skråt op gennem lyntogets venstre side og ramte de passagerer, der befandt sig i denne side i togets forreste vognafdeling. 7 passagerer omkom som følge af trailerladets indtrængen i passagerafdelingen.

Sættevognstraileren standsede inde i lyntoget med forreste del op mod bagvæggen af første dørparti og var derefter kilet op mod godstogets øvrige vogne og sættevognstrailere, mens togene passerede hinanden. De ødelæggelser og løsrevne dele, der kom heraf, medførte skader på de efterfølgende vogne i lyntoget og medførte, at yderligere 1 person blev dræbt og flere personer blev kvæstet. Efter kollisionen fortsatte L 210 ca. 450 meter

med sættevognstraileren fastkilet i forreste vogn. Lyntoget standsede med fronten ud for kilometermærke 127,0.

Kort inden kollisionen observerede lyntogets lokomotivfører gnister fra godstogets venstre side og en trailer med hjul. Han farebremsede umiddelbart inden kollisionen.

Ved kollisionen blev køreledningsanlægget over begge spor ramt og beskadiget over ca. 550 meter. Kørestrømmen blev automatisk afbrudt, hvorved godstoget mistede kørestrøm.

Godstogets bremseledning blev beskadiget. Toget standsede efter cirka 1350 meters kørsel, med lokomotivet ved kilometermærke 128,8. Under passage af lyntoget med den fastkilede trailer, blev venstre side på 5 efterfølgende sættevognstrailere beskadiget.

I det sydlige spor blev der efterfølgende observeret skader og fundet dele fra en sættevognstrailer i en afstand af op til 800 meter før kollisionsstedet."

**Analyse af vindrestriktioner på
Storebæltsforbindelsen**

Version 1.0

Sagsnr.: 2020-20291

Rapportskabelon 2.0

Revideret: 29-06-2021

Revideret af: nhan

Godkendt: 29-06-2021

Godkendt af: HI

Niels Hansen

Sektionschef

Kvalitet & Sikkerhed

Hændelser og Analyser

2523 5275

nhan@bane.dk

Banedanmark

Carsten Niebuhrs Gade 43

1577 København V.