

Vindtunnel undersøgelse af togulykke på Storebælt d. 2. januar 2019

Måling på vestbro (HAV-Id nr.: 10669)

DTU Vindenergi E Rapport 2019

Jens Nørkær Sørensen, Robert Fl. Mikkelsen & Holger Koss

November 2019

DTU Vindenergi
Institut for Vindenergi



Vindtunnel undersøgelse af togulykke på Storebælt d. 2. januar 2019

Måling på vestbro (HAV-Id nr.: 10669)

Dato: 21. nov, 2019

Udarbejdet af Jens N. Sørensen, Robert Mikkelsen og Holger Koss, DTU

I forbindelse med togulykken d. 2 januar 2019 søges de kraftige vindforhold på vestbroen undersøgt omkring ulykkestidspunktet. Tre forhold ønskes undersøgt:

- Undersøgelsen af de repræsentative vindmålingers validitet for vindforholdene på togbroen omkring ulykkestidspunktet
- Bestemmelse af vindlaster på trailer i tog-bro konfiguration
- Visualisering af strømningsforhold på tog og vejbro

Sammenfatning: Modelskala vindtunnel målinger på vestbroen med tog og trailer

Der er opmålt vindhastighedsprofiler på nord og sydsiden af vestbroen, midt på brofag og ud for pille. Det er her fundet at differencen mellem vindprofilet målt på den nordlige togside og syd for vejbanen ikke er signifikant ved 0° og 15° , hverken ved bropille eller midt på brofag. Det vurderes at sonic-anemometer aflæsninger placeret i 4.5m højde syd for vejbanen er repræsentative for vindforhold på togsiden med en differens på mindre end 5% ved 0° og 15° .

Endvidere er der målt aerodynamiske laster/kræfter på en trailer i lommevogn. De aerodynamiske sideværts- og liftkraft koefficienter er kortlagt for en trailer på en lommevogn i et bredt indfaldsvinkel område, $0-90^{\circ}$. Med de aerodynamiske sideværts koefficienter er den kritiske vindhastighed bestemt i middel til 19.5-20m/s som værende tilstrækkelig til at opnå en sideværtskraft svarende til 3200kg målt i fuldskala trækforsøg. Vindstøds-laster kortlagt fra målinger sænker den kritiske hastighed til 17.5m/s ækvivalent med 18.4m/s for anemometer aflæsning. Sonic aflæsning d. 2. jan. ved pille 41 omkring kl. 7.26-7.30 angiver middel vindhastigheder på 17-19.5m/s og i vindstød 19-21m/s. Det findes anskueliggjort, at der på ulykkestidspunktet har været tilstrækkeligt med middelvind og vindstød til at opnå en sideværtskraft svarende til 3200kg. Der er endvidere målt betydelige løftekræfter på trailer, op til 1700kg ved 20m/s sidevind og 120km/t kørsel. Med en tom trailer dødvægt på ca. 6.5t er dette ikke tilstrækkeligt til at løfte trailer af lommevogn, men dog et last bidrag i retning af at vælte traileren af lommevognen. Løftekræften tillægges ikke afgørende betydning i ulykkesøjeblikket.

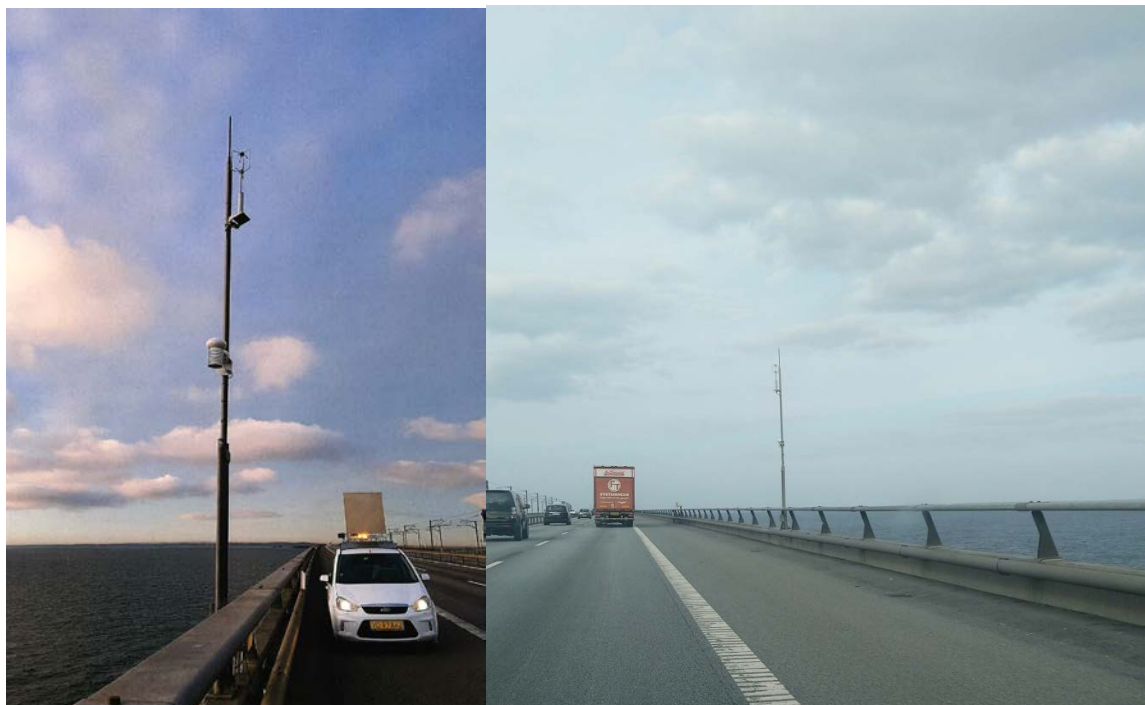
Endelig er der gennemført flowvisualiseringer med røg omkring vestbroen, undersøgt for 0° , 15° og 45° midt på brofag og pille. For 0° og 15° ses den frie vind at passere henover tog- og vejbro uden separation. Vindaflæsning med en cobra-vindhastigheds-probe ses værende i overensstemmelse med en u-separeret strømning hen over broen, hvormed anemometer positionen findes at angive repræsentative vindmåling med vinden i nord.

1. Registrerede vindforhold omkring ulykkestidspunktet

Vinddata med reference til Nyborg fra DMI's arkiv, tilgængeligt som 10 minutters opløsning for max, min og middel vind, er samlet i app. **A1** DMI dataene angiver 15.8m/s middelvind med stød op til 22m/s fra nord, 349.7°. På vestbroen er der placeret et sonic anemometer ved pille 41 og pille 20. Dataene fra disse er angivet i app. **A2** med 1 min. tidsopløsning. Sonic målerne er begge 3-komponent WG/WR 500 3D ultrasonics vindmålere, produceret af Boschung Mecatronics AG, som måler alle 3 hastighedskomponenter, dvs. også vindretning, i området 0 - 65 m/s. Ved sammenligning mellem de to sonic vindmålere (app A2), ses en relativt god korrelation af den absolutte vindhastighed; Mens der er store forskelle i de målte vindretninger. Det er her tydeligt, at der er et problem med den østlige vindmåler ved pille 20, som viser urealistisk store og pludselige ændringer i vindretningen. Til gengæld viser den vestlige vindmåler ved pille 41 en stort set konstant vindretning fra nord i perioden mellem midnat og middag d. 2. januar. Med hensyn til de maximale vindhastigheder, blev der kl. 07:28 og 07:29 målt maximale vindhastigheder på 21.6 m/s ved pille 20, og kl. 07:20 og 07:21 maximale vindhastigheder på 21.2 m/s og kl. 07:28 en maximal vindhastighed på 20.2 m/s ved pille 41. Der er således en god overensstemmelse mellem DMI data og sonic data fra pille 41 mht. retning og middel, mens retning fra måling ved pille 20 indikerer, at der kunne være fejl på denne sensor, eller at strømningen på broen er speciel (separeret strømning) på dagen for ulykken. Endvidere er middelvind, samt max og min vind, tilgængelig fra de 7 vindmøller fra Sprogø havvindmøllepark placeret lidt nord for vestbroen, app **A3**, med 10min tidsopløsning, men ingen retning. Det aflæste niveau for middelvinden er på ca. 18-20m/s med max vind på ca. 22-26m/s ved kollisionstidspunktet. Det skal bemærkes at vindsensorer på møllerne er placeret på nacellen og dermed væsentligt højere, ~80m, end sensorerne på broen. Dog angiver aflæsningerne af middelvinden hastigheder svarende til sonic målingerne.

1.1. Undersøgelsen af de repræsentative vindmålingers validitet

Med vind hovedsageligt fra nord og sonic vindmålere placeret på den sydlige side af vejbroen, skal vinden passere tog og vejbro, i alt ca. 40m fra nordsiden af togbroen til placeringen af sonics på sydsiden, se Figur 1. Der er ikke placeret vindmålere på nordsiden af togbroen. Dette forhold har medført tvivl om hvor repræsentativt vindmålingerne er for en nordligt dominerede



Figur 1 Sonic vindmåler placeret på sydsiden af vejbro

vindretning, idet en vis grænselagsvækst fra nord til syd kan forventes og dermed en egenindflydelse af broen selv på vindmålingerne. Det mistænkes således, at en vindmåling på nordsiden kan afvige signifikant fra en måling på sydsiden med vinden fra nord. En kvalificeret vurdering af vindmålingernes validitet kan evalueres med numeriske beregninger eller eksperimentelle forsøg i passende modelskala. Vestbroens komplekse geometri vil umiddelbart tilsige, at det bedst undersøges med modelskala forsøg i vindtunnel.

1.2 Vindtunnel setup

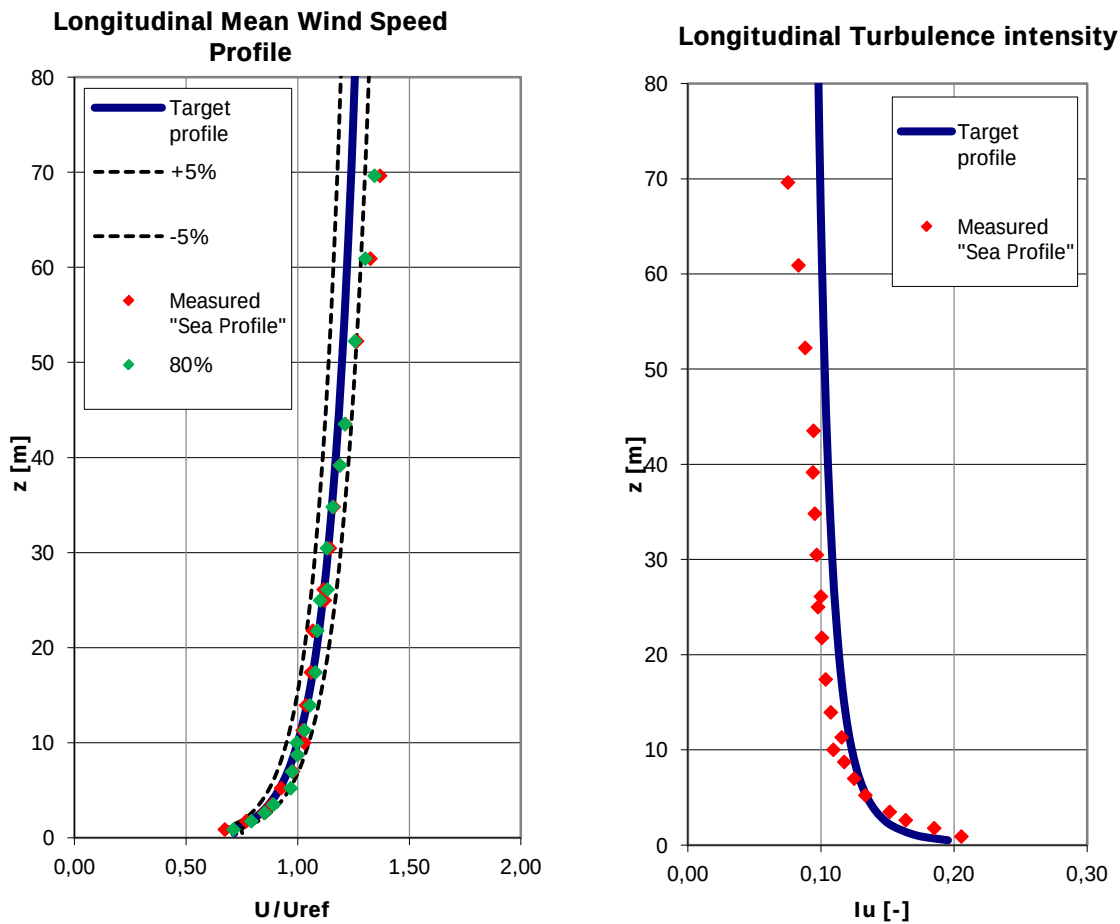
Et modelforsøg tilpasset Force Technologys atmosfæriske grænselags vindtunnel er sat op til besvarelse af de tre ovennævnte forhold. Modeltog for undersøgelse af vindlaster er som standard tilgængelig, H0 togskala 1:87. Denne skala er også passende for en bromodel til vindtunnelens størrelse. En CAD model af vestbroen (tog og vej) er tegnet og fremstillet med 5 brofag for minimering af ende-effekter, se CAD app. **B1**. Målingerne foretages kun på det midterste ud af 5 fag. Det endelige vind tunnel set-up ses af Figur 2, med de 5 fremstillede brofag og modeltog påsat.



Figur 2 Vindtunnel setup, vestbro med 5 brofag og H0 modeltog, skala 1:87

1.3 Vindforhold

De nordlige vindforhold på ulykkesdagen kan i middel- og turbulensniveau sættes som indstrømningsbetingelse til broen. Det atmosfæriske grænselag og vindprofil styres ved indløbet opstrøms for bromodellen. Vindprofilet er her valgt til en Eurokode kategori 0 standard sø-profil i overensstemmelse med forhold for åbent hav, svarende til at den nordlige vindretning er uforstyrret af landområder meget langt opstrøms. Det opmålte atmosfæriske vindprofil for den tomme vindtunnel er vist på Figur 3 med nul hastighed ved hav overfladen og stigende med højde, se foto. Den atmosfæriske vindtunnel måler 7m i bredden og 1.75m i højden. Vindhastigheden kan sættes til maksimalt ca. 12-13m/s ved 100%, ca. 10m/s ved 80% og ca. 7m/s ved 60% blæserbelastning, app. **B5**.

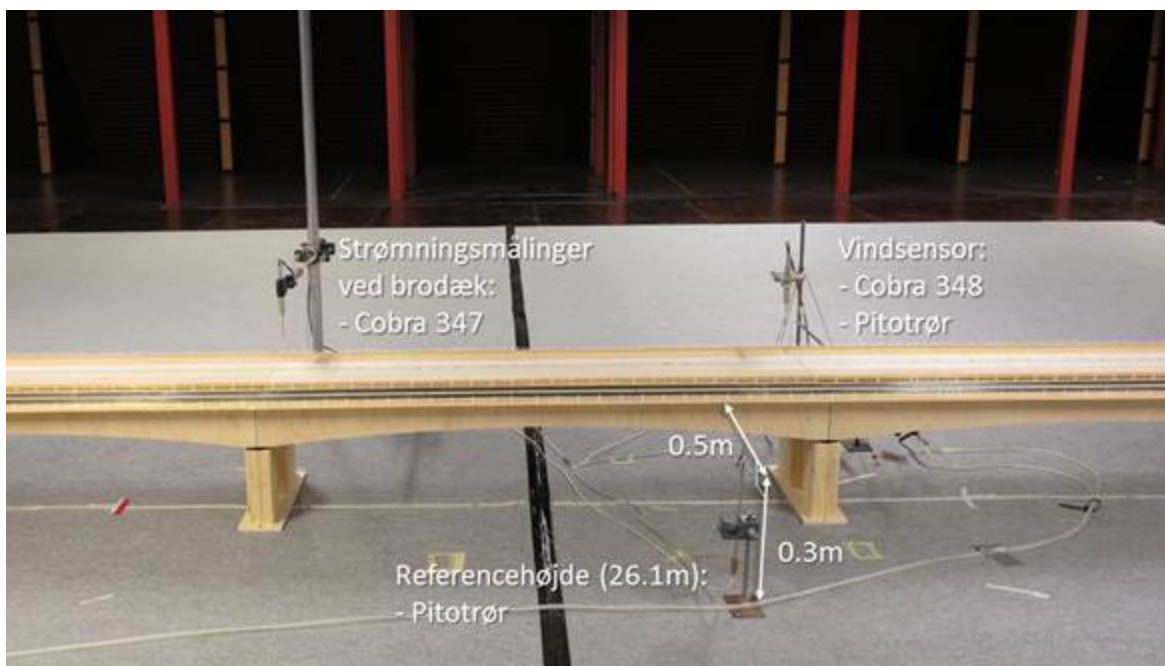


Figur 3 Normeret vindprofil u/U_{ref} , Eurocode kategori 0, sø-profil, turbulens profil

Vindprofilet ses at variere fint med højden med en afvigelse under 5% i forhold til det ønskede vindprofil. Referencen er målt i 10m højde. Turbulensprofilet passer tilsvarende fint for alle 3 komponenter, kun strømvise komponent er vist her. Højden for tog og vejbro varierer fra ca. 17m ved land til 26.1m på midten i middel over havniveau. I dette højdeområde er hastighedsprofilet i al væsentlighed fladt med en variation i vindhastigheden på mindre end 5% ved de to højder. Bromodellen er skaleret for 26.1m i højden.

1.4 Måling af hastighedsprofiler ved bro

Der opmåles hastighedsprofiler ved 4 positioner omkring center brofag for kortlægning af variation med højden over tog og vejbane. Figur 4 viser positioner af cobra-probe (særlig 5 huls pitot type probe) for hastigheds målinger.



Figur 4 Placering af pitot og cobra probe for hastighedsmålinger.

Cobra-proben måler den 3 dimensionale hastighedsvektor og traverseres i step fra lidt under brofag og opefter til fristrøms hastigheden findes. Der opmåles i 4 positioner, hvilket skønnes at dække broens strømningsforhold generelt:

1. ud for bropile i vejsiden svarende til sydlig (den egentlige) position af vindmåler (nedstrøms)
2. ud for tog-bro og bropile (opstrøms)
3. midt på brofag i vejside (nedstrøms)
4. midt på brofag ud for tog-bro (opstrøms)

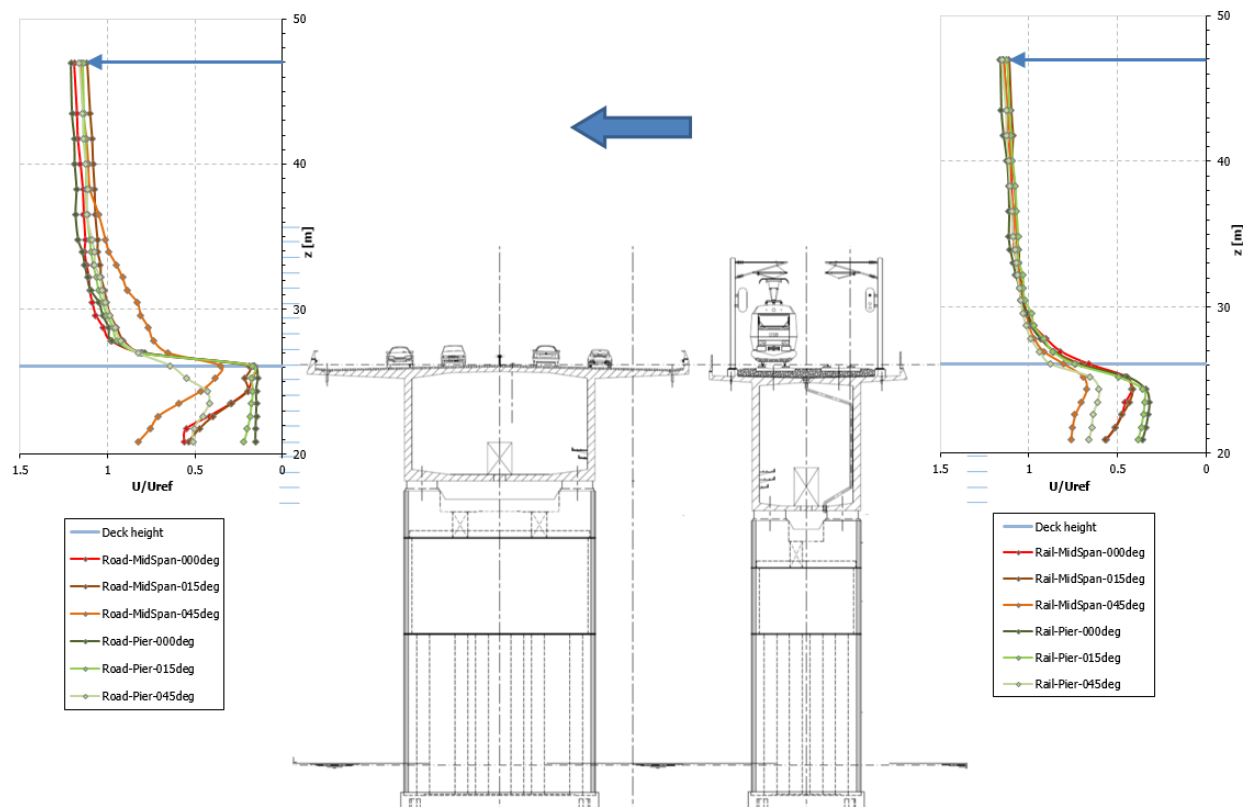
Der måles 300s (5min) i hvert målepunkt for statistisk konvergeret måledata samt til evaluering af spektrum og turbulens. Endvidere måles der for 3 brovinkler i forhold til indstrømning dvs. broen drejes med

1. vind fra 0^0 , vinkelret på bro
2. vind fra 15^0 , mod vest
3. vind fra 45^0 , mod vest

Strømningsvinklen ved 0^0 passer bedst med sonic data fra pille 41 og skønnes at være mest repræsentativ for vindforhold på kollisionstidspunktet, mens den mindre vinkeldrejning på 15^0 af vinden vil repræsentere afvigelser fra denne, f.eks. i vindstød. Vinklen på 45^0 er ikke repræsentativ for strømningen henover broen ved kollisionstidspunktet, men vil til en vis grad emulere vindlasten på det kørende tog, selv om toget i vindtunnellens set-up er fikseret. Lastmålinger på et kørende tog skønnes umiddelbart ikke at være nødvendige og er ikke del af nærværende projekt.

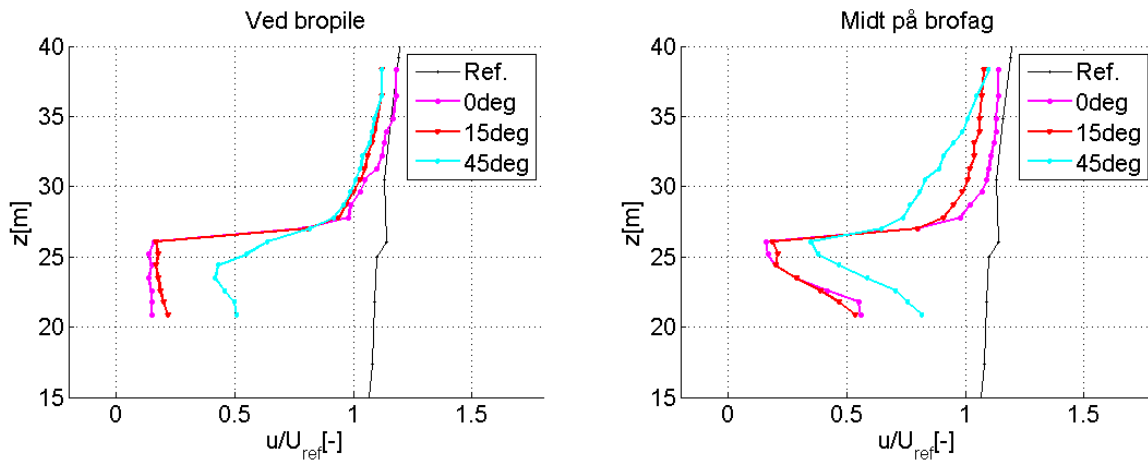
Opmålte hastighedsprofiler:

Figur 5 viser de opmålte middel-vindhastigheds profiler placeret ind i forhold til tog og vejbro ved bropilen og midt på brofag. Vinden kommer fra togsiden.



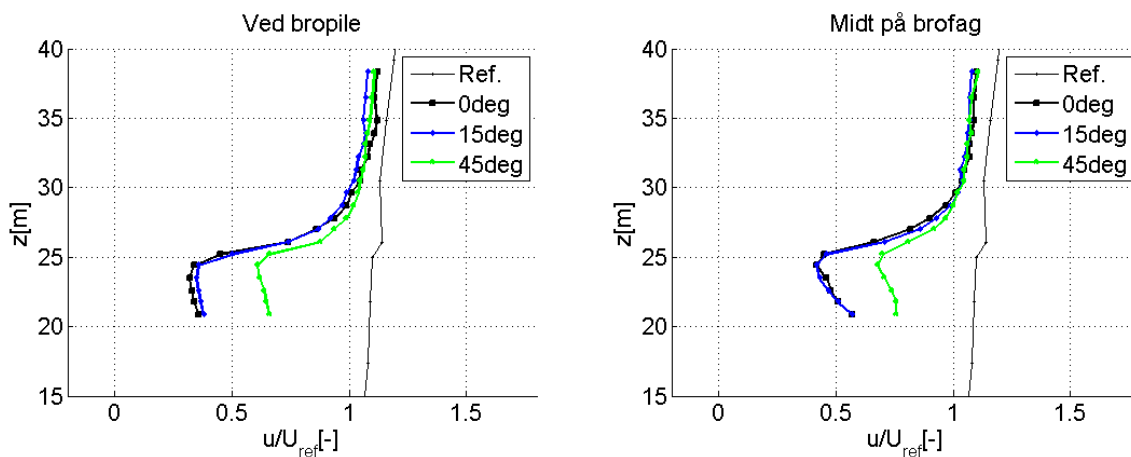
Figur 5 Hastighedsvariation med højden ved pile. Venstre profil: måling ved sydligt anemometer; Højre profil: Måling ved nordligt anemometer.

Med Sonic-vindmåleren placeret 4.5m over vejbanen, svarede til at hastigheden er målt i en 30.6m absolut højde. De målte middelhastigheder viser umiddelbart samme vindhastighed over vejbanen i denne højde ved bropilen for 0° og 15° . Ved 45° ses en 5% underestimering af vindhastigheden ved bropilen. Variationen midt på brofag er større med en 5% stigning i hastighed for 0° , ca. 3% fald ved 15° og ved 45° ses et 20% fald i hastighed midt på broen. Et forstørret billede af hastigheder ses af Figur 6 og Figur 7 ved bropile og midt på brofag for de 3 vinkler. Af de tilhørende profiler for turbulens intensiteten, TI, samlet i app. **D1**, ses en forøgelse af TI ved sonics fra 10% til 12-14% midt på brofag og 16-18% ved pile for 0° og 15° , umiddelbart en begrænset stigning der samlet ikke indikerer signifikant separeret strømning på broen ved sonics. Visualisering af flow vil yderligere afklare dette forhold.



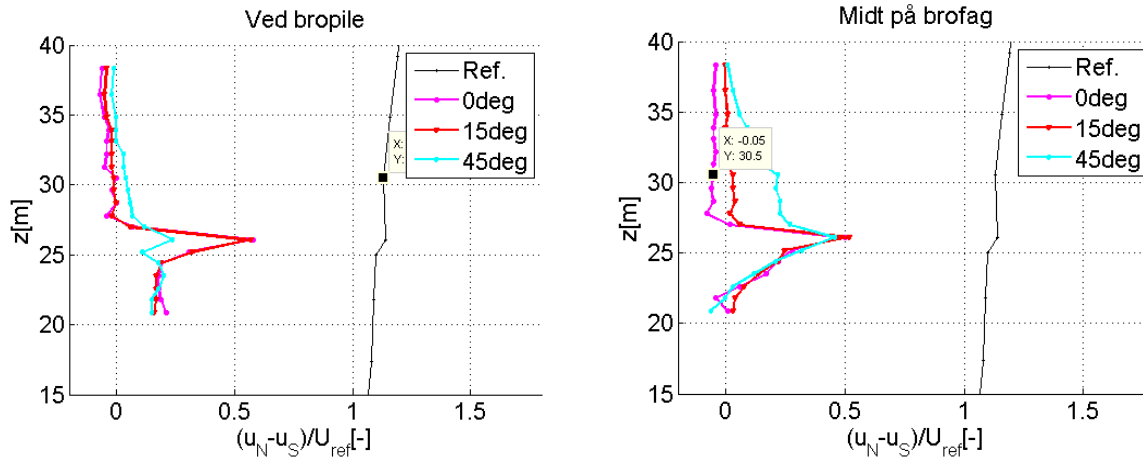
Figur 6 Hastighed ved vejbro (syd)

For vindprofiler på togsiden er den umiddelbare indflydelse af broen selv forventeligt meget begrænset og ses i højden med sonics, 30.6m, at være meget ens. For 45° ved bropillen ses en lille forøget hastighed, mens der midt på broen er et sammenfald for alle 3 vinkler.



Figur 7 Hastighed ved togbro (Nord)

Ses der på differensen mellem det der måles opstrøms på den nordlige togside og nedstrøms syd for vejbanen for hastighedsprofilerne ved bropillen, Figur 8, er der kun mindre forskel i ca. 28m højde eller ca. 2m over vejbanen og opefter. Den tilsvarende difference midt på brofaget viser en mindre 'speed up' effekt ved 0°, ca. 5%, mens der ved 15° ses en svag nedgang på ca. 3% i højden for sonic anemometeret. For tilfældet med større nedgang i hastighed ved de 45° på ca. 20%, vil anstrømningen være skæv og mere kompliceret, idet der er længere vej for luften henover broen og dermed en større grænselagsvækst (luftlag influeret af broen).



Figur 8 Hastigheds difference mellem nordsiden og sydsiden

For de opmålte vindhastigheds profiler kan følgende opsummeres:

- Differencen mellem vindprofilet målt på den nordlige togside og syd for vejbanen er ikke signifikant ved 0^0 og 15^0 , hverken ved bropile eller midt på brofag.
- Det vurderes at sonics placeret i 4.5m højde syd for vejbanen er repræsentative for vindforhold på togsiden med en differens på mindre end 5% ved 0^0 og 15^0 .
- Ved 45^0 underestimeres med 20% i forhold til togsiden.

2. Vindpåvirkning – Middellaster

Vindlasten på traileren består af kræfter og momenter, men primært kræfter er interessant for om vindlasten er tilstrækkelig til at blæse trailerne af lommevognen. Laster på trailer vil variere med turbulens og vindstød, men undersøges først i forhold til den tids-midlede vindpåvirkning uden stød. App. B3 viser detaljer for referencehøjder og placering af prober i forhold til bro og tog i vindtunnel. I vindtunnel opsætningen er der fremstillet en kraftgauge med en følsomhed der passer til en groft estimeret max last på en H0 modelskala lommevogn. Gagen er instrumenteret (med straingauges) for måling af sideværts kraft på trailer og lift kraft som er et mål for vindens evne til at løfte trailerne opad. Den samlede kraft antages at virke i midtpunktet af trailerrigget dvs. midt på sidedug og midt på bredden. Sideværts og lift kraft (F_D , F_L) bestemmes ud fra formlen

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

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

hvor $\rho = 1.286 \text{ kg/m}^3$,¹ er luftens massefylde, $V_{rel}^2 = V_o^2 + V_{tog}^2$ er den relative hastighed toget ser dvs. en sum af vindhastigheden og togets egen hastighed. Traileren er også udsat for denne

¹ Fra DMI arkiv er atmosfære tryk og temperatur i Nyborg, d.2 Jan kl.7.30 fundet til: $p_{atm}=1024 \text{ hPa}$, $T=3.5^\circ \text{C}$. Densitet af luft er bestemt for en højde på 25m over hav via ideal gas ligning: $\rho = p_{atm}/RT$, $R=287 [\text{J/kgK}]$ for luft, $T=273+3.5=276.5 [\text{K}]$

hastighed bag ved lokomotivet. Kræfterne skalerer med side og top/loft-arealet af traileren hvor side-arealet, app. **F1**, måler

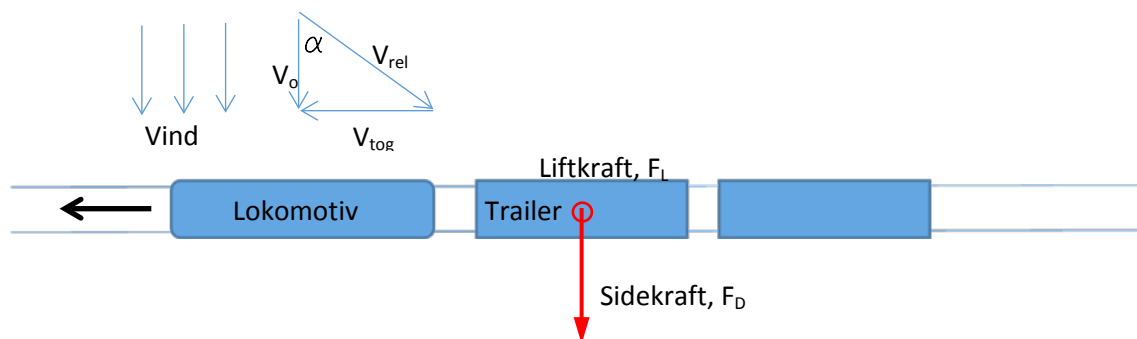
$$A_r = (N - D) \cdot A = (3.911 - 1.034) \cdot 14.040 = 40.4\text{m}^2$$

og top/loft arealet måler

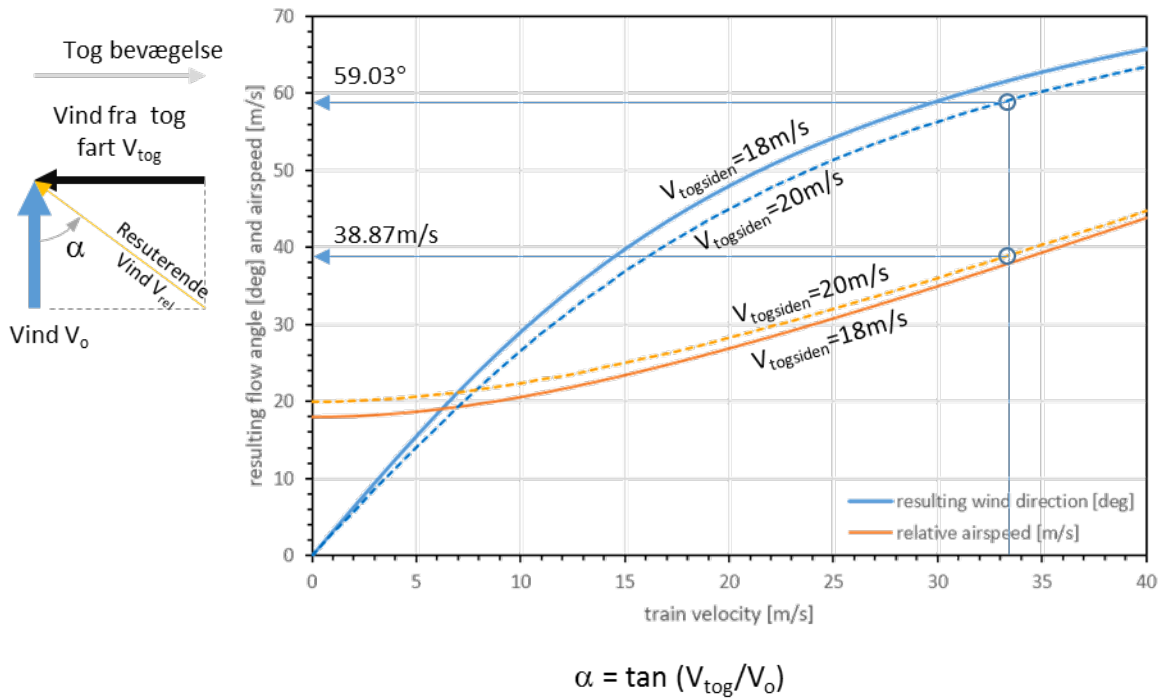
$$A_t = M \cdot A = 2.550 \cdot 14.040 = 35.8\text{m}^2$$

Endvidere er der en flowvinkel at tage hensyn til beregnet via retningen for tog- og vindhastighed som $\alpha = \tan^{-1} \frac{V_{tog}}{V_o}$, i det de aerodynamiske koefficienter afhænger af denne vinkel, $C_L = C_L(\alpha)$ og $C_D = C_D(\alpha)$. Togets hastighed er bestemt til 120km/t eller ca. 33.3m/s ved ulykkestidspunkt. Fra sonics er vindhastighed vinkelret på broen fundet til at ligge i et spænd omkring 18-22m/s i stød hvilket giver en flowvinkelen omkring 56-62deg.

Figuren nedenfor viser kræfter og hastigheder for tog og vind set oppefra



Flowvinkel er således en vigtig parameter som findes i samspil mellem toghastighed og vindhastighed. På Figur 9 er vist hvorledes flowvinkel og relativ hastighed afhænger



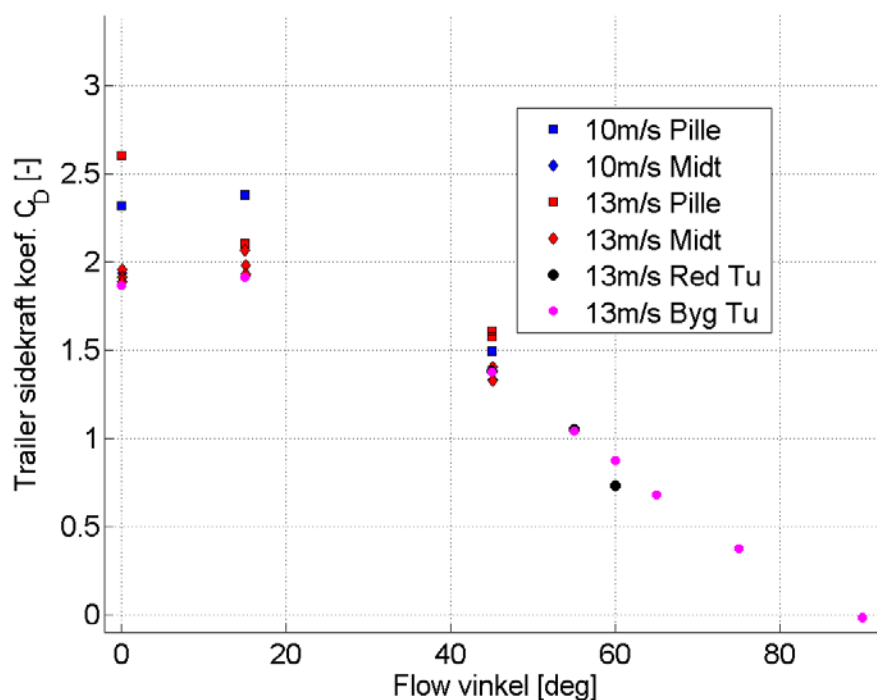
Figur 9 Flowvinkel på kørende tog ved 18-20m/s

hvis det antages at det blæser med 18-20 m/s målt i tog siden af broen. Flowvinkel er her fundet til 59° for toghastigheden 120km/t eller 33.3m/s ved 20m/s vind. Til bestemmelse af de reelle laster på det kørende tog bestemmes de aerodynamiske koefficienter ved vinkler i området med nul vinkel til 60° . Umiddelbart vil måling af laster på tog i en opsætning med broen drejet 60° dårligt repræsentere det reelle last billede, da broens egen indflydelse vil være for langt fra de nordlige 0° vindforhold og dermed ikke emulere kørsel i tværvind. Måling på bro og tog begrænses til vinkler 0° , 15° og 45° med supplerende målinger på tog alene i mindre vindtunnel setups, se app. **C1-C2**. ved højere vinkler $55-90^\circ$. De aerodynamiske koefficienter bestemmes fra lastmåling af (F_D, F_L) og omskrivning af ligning (1-2)

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 A_r} = \frac{F_D}{P_{ref} A_r}$$

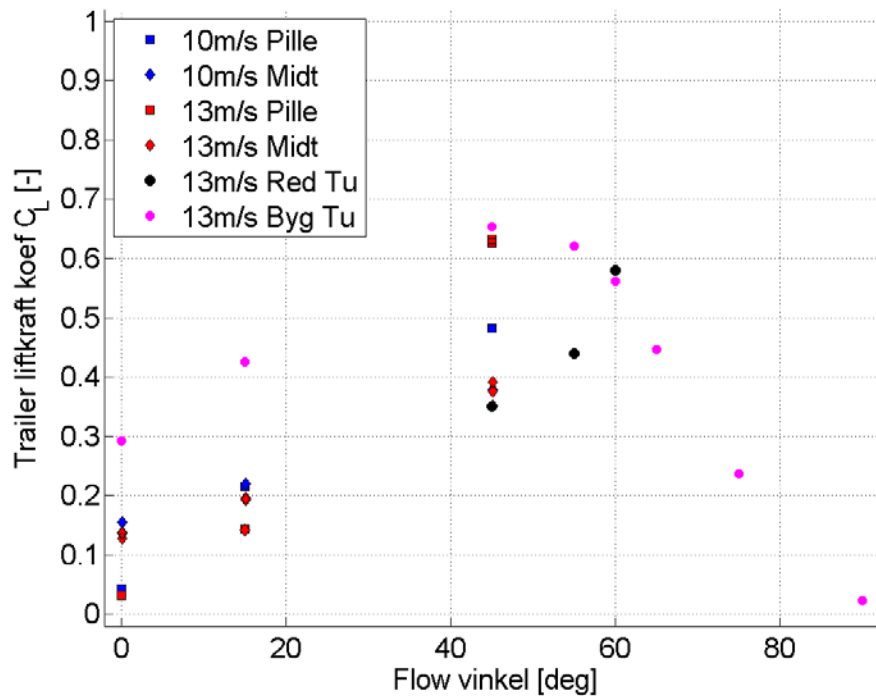
$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 A_t} = \frac{F_L}{P_{ref} A_t}$$

Den relative hastighed bestemmes via det dynamiske reference tryk P_{ref} målt foran broen i højden for sonics. Variationen af reference tryk P_{ref} for alle måle serier kan ses af app. **B4**. ved 60, 80 og 100% blæser belastning. For lastmålinger er der målt 1min med 450hz til bestemmelse af middellast, standardafvigelse, etc. Af Figur 10 ses de tidsmidlede værdier for



Figur 10 Kraft koefficeint for sidevæerts retning C_D

sidevæerts kraft koefficienten C_D målt ved de to højeste hastigheder, ved pille og midt på brofag, samt i rød tunnel på DTU ved 13m/s. Flowvinkler er varieret fra 0-60° med overlap ved 45° for rød vindtunnel måling (lav turbulens, $TI < 0.1\%$) og ved 0-90° i DTU Byg vindtunnel med en turbulens intensitet, $TI = 15\%$. Den aftagende trend mod højere vinkler vil i grænsen med fuldt parallelt flow i 90° give nul sideværtskraft og max omkring 0°. I parallel med Figur 10, kan data også angives som i app. **E2** med reference til den frie vindhastighed. Måledata angivet for bro-tog konfiguration viser nogen spredning med hastighed (Reynolds tal), dog ses umiddelbart signifikant højere koefficienter ved placeringen ud for en pille sammenlignet med placering midt på brofag. Spredningen er størst for målinger ud for pille, og mindst midt på brofag hvor der også er et godt sammenfald ved 45° for måling på tog alene. De tilsvarende målinger for lift kraften er vist nedenfor, igen med nogen spredning i data.



Figur 11 Kraft koefficient for lodret løft C_L

Der ses et overlap ved 45° mellem data målt midt på brofag og isoleret tog konfiguration ved lav turbulens og sammenfald med data ud for pille med isoleret tog og høj turbulens. For de højere vinkler aftager liftkraften mod nul ved 90° . Med de aerodynamiske koefficienter kortlagt er det muligt at bestemme de kritiske hastigheder for kørsel med trailer over broen. Ligning (1) omskrives således at den relative hastighed isoleres

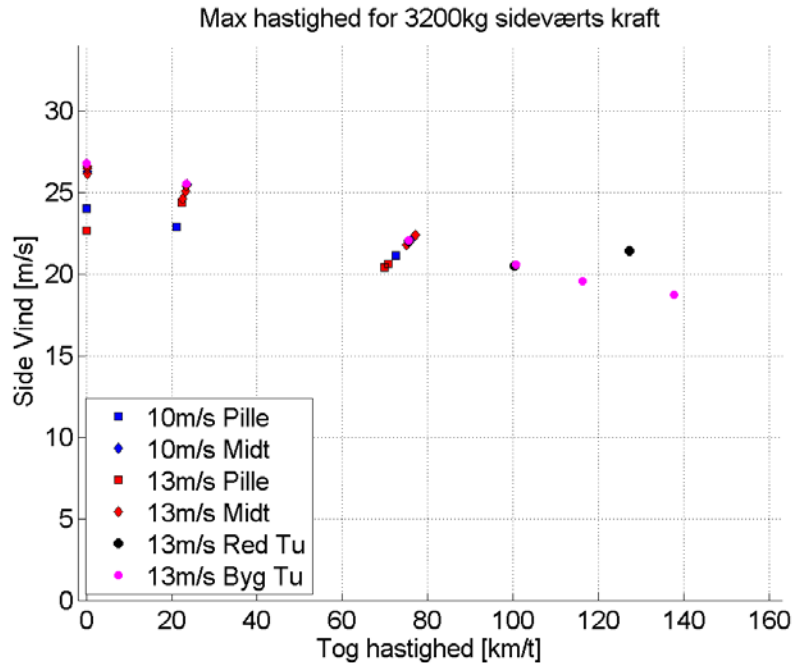
$$V_{rel}^2 = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho A_r C_D(\alpha)}$$

Relativ hastigheden kan deles i en tog- og en vindhastighed som

$$V_{tog} = V_{rel} \sin \alpha$$

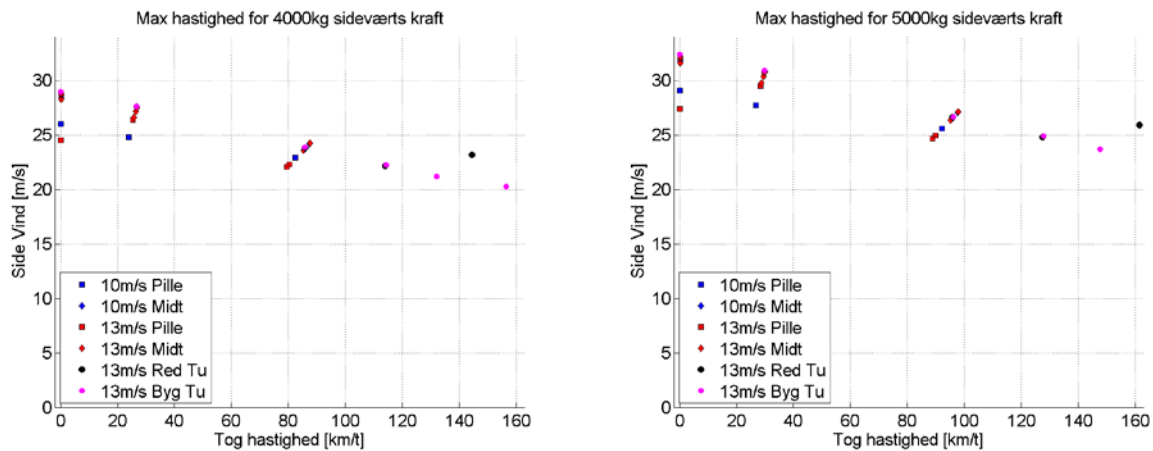
$$V_{vind} = V_o = V_{rel} \cos \alpha$$

Trækdata, app. **G1**, fra fuldskala forsøg for tilt kraften med en tom trailer på en lommevogn, blev bestemt til ca. 3200kg med angrebspunkt midt på sidedug. Indsættes denne last for F_D i ligningen fås fordelingen af punkter for kritisk vind og toghastighed på Figur 12



Figur 12 Vind og tog hastigheder hvor der kan opnås en statisk sideværtskraft på 3200kg

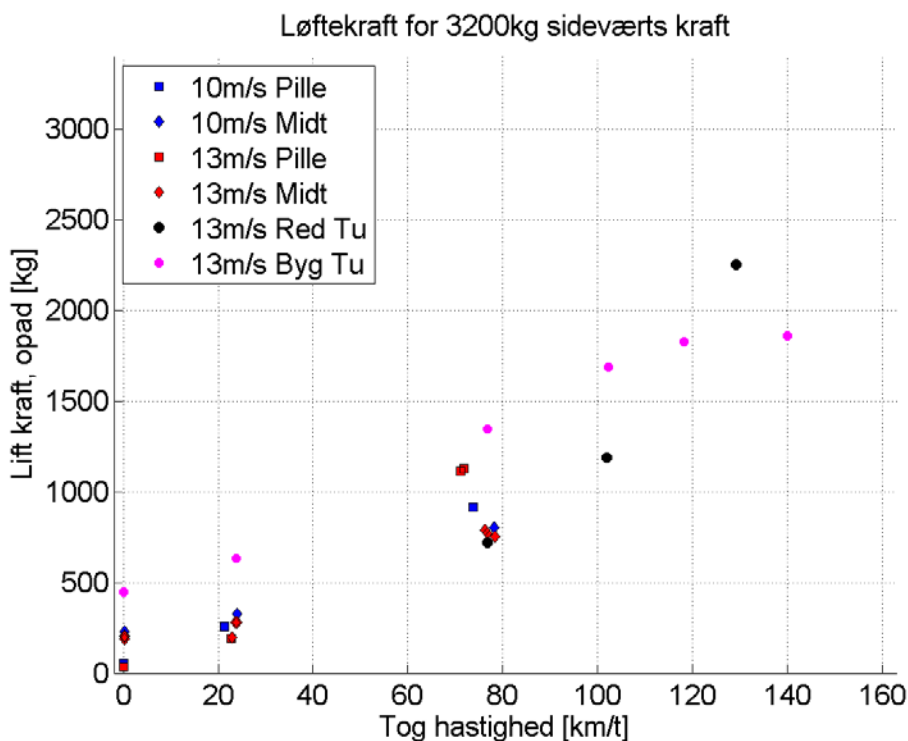
Datapunkter på figuren viser at der opnås en middelværdi på 3200kg ved en kombination af tog og vindhastighed. Ved 120km/t ses at et niveau omkring 19.5-20m/s er nok til at give 3200kg trækraft mens ved nul tog hastighed er det ca. 26m/s midt på brofag og 23-24m/s ud for en pille. Over punkt fordelingen vil trækraften være større, mens under vil der ikke være tilstrækkeligt med trækraft til at trække traileren af lommevognen. Antages en højere sideværts kraft (evt. pga. tungt lastet trailer), Figur 13,



Figur 13 Vind og toghastighed for opnåelse af 4000kg (tv) og 5000kg(th) sideværtskraft

ses at den nødvendige vind vil stige, f.eks. ved 5000kg skal der ca. 25m/s til ved 120km/t.

Med en u-lastet tom trailer er den kritiske hastighed således væsentligt lavere end for en tungt lastet trailer. Til sideværts kraften medhører også en løftekraft hidrørende fra trykfordelingen på traileren ved den skæve an-strømning.



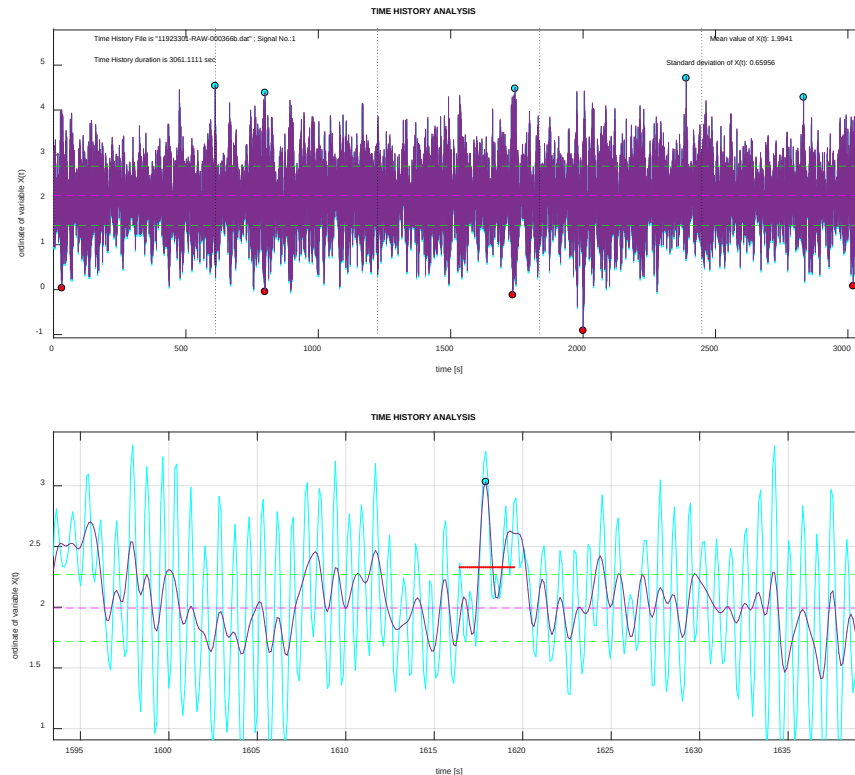
Figur 14 Løftekraften sammen med 3200kg sideværtskraft

Af Figur 14 ses nogen spredning i data, men et skøn på en løfte kraft ligger omkring 1700kg ved 120km/t som ikke i sig selv kan løfte trailerne af lommevognen. Tænkes trenden for last målingerne ud for pille at blive ekstrapoleret til højere vinkler, ses en blandet trend hvor løftekraften er stagnerende til svagt stigende. For tilfældet med en kongetap der ikke er låst, vil den aerodynamiske løftekraft dermed bidrage væsentligt til et opadrettet træk. Om dette er tilstrækkeligt til at trække kongetappen ud af låsemekanismen er der ikke baggrund for at konkludere, men kraften må anses som betydelig.

3. Påvirkning fra turbulens og vindstød

I tillæg til middellaster, vil der i vindstød være muligt med en større belastning i et kortere tidsrum. Vindhastigheder målt i vindtunnel med fristrøms turbulens er målt i 300sek eller 5min, se App. F1, hvilket i fuldskala svare til ca. 17000sek eller 4 timer og 40 min. Således indeholder vinden turbulente strukturer/hvirvler med forskellige længde skalaer som passerer broen med tidsligt varierende hastigheder, med kortere eller længerevarende vindstød. Fra bygnings aerodynamik kendes at vindstød af minimum 3sek varighed at være nødvendigt for en betydelig lastforøgelse der kan medføre en bevægelse af traileren. Det kørende tog vil passere

gennem hvirvel strukturer langs broen hvilket til dels kan kompenseres for i de stationære måledata ved at evaluere ekstremværdier for vind hastigheden svarende til et vindue for 3s kørsel. Med de 120km/t køres der 100m/3sek. Omkring ekstremlaster er der i tidserien på Figur 15 markeret 3sek middelværdien for en vindstødslast med rødt.

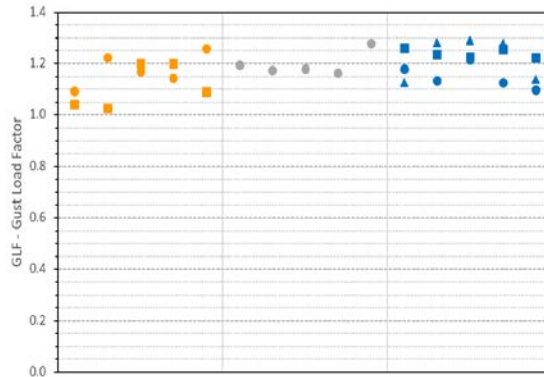


Figur 15 Tidshistorie for vindlast sideværts i modelskala (øverst) og zoom (nederst). Eks. På 3sek middel last (rød streg) over middel. Model egen-frekvensen på 61Hz, cyan, er filtreret ud med et lav-pas filter, magenta.

Forholdet mellem middelværdien for hele tidserien og de 3sek finder anvendelse i det grundlæggende koncept for "Vindstød load faktor" *GLF* (*Gust Load Factor*) introduceres som:

$$\hat{P} = GLF \cdot \bar{P}$$

hvor er $\bar{P}$ den samlede tids midlede last og $\hat{P}$ vindstøds lasten. Vindstøds last faktoren for de 3 vinkler 0° , 15° og 45° samlet i Figur 16 og ses i middel at være $GLF_{mid}=1.2$ og i max omkring $GLF_{max}=1.3$.



Figur 16 Vindstøds faktor, GLF (GustLoadFaktor), forhold mellem samlet middellast og 3sek middellast omkring lokale max belastninger i tidsserie.

For de 3 vindretninger 0° , 15° og 45° er middel og vindstøds forholdet for hver 10min del tidsserie vist, både data ved pille og midt på broen er vist for de samlede antal 10min tidsserier. Med en vind hastigheds aflæsning på Figur 12 for 120km/t på ca.20m/s og en max GLF= 1.3, kan hastigheden tilnærmet reduceres til

$$\bar{V} = \frac{\hat{V}}{\sqrt{GLF}} = 17.5m/s$$

Anemometer aflæsning i 4.5m højde ligger ca. 5% højere end denne værdi eller ca. 18.4m/s. Sonic anemometer aflæsning ved Pille 41, Figure 17, ses i niveau at stemme overens med denne hastighed omkring ulykkestidspunkt.

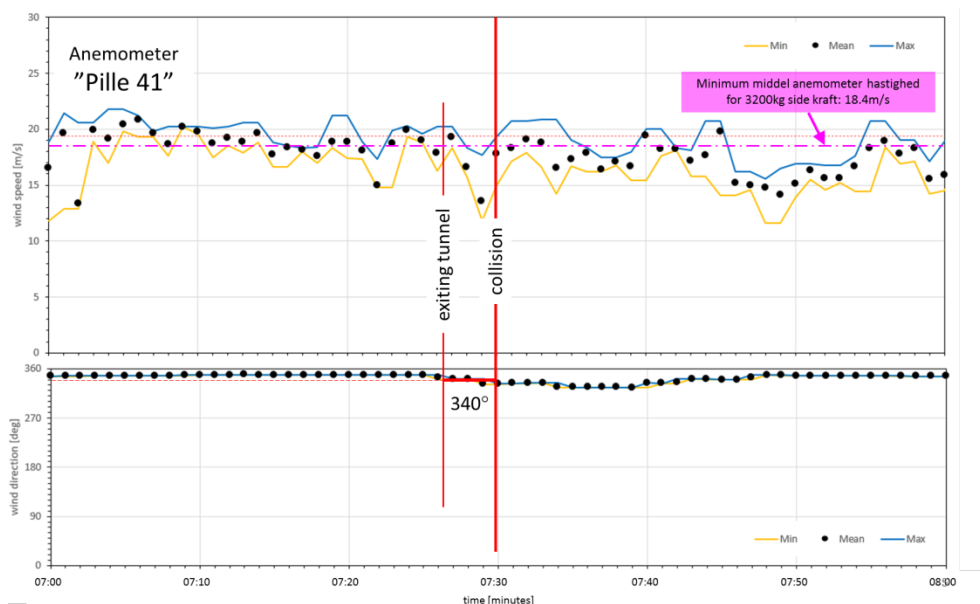


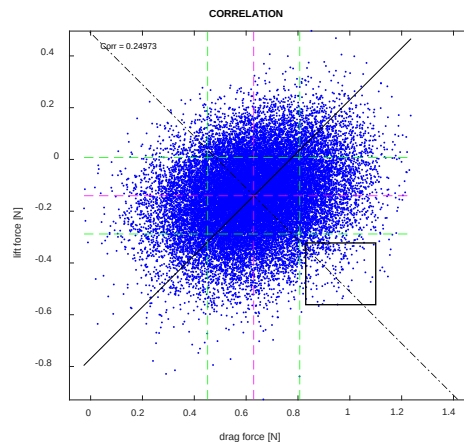
Figure 17 Sonic hastighed ved "Pille41"

Den samlede variation for vindhastigheden er i tidsrummet hvor toget er på broen i perioder både over og under et tilstrækkeligt middelniveau for at en tilstrækkelig sidekraft kan opnås.

Nogen usikkerhed om det præcise kollisions tidspunkt, kan rykke det markerede tids-vindue 3-4min frem eller tilbage. I det spænd skønnes derfor ikke afgørende at et vindstød med maximal GLF har været tilstede under passagen over broen, men også middel niveauet har kunne generere nok vælte kraft.

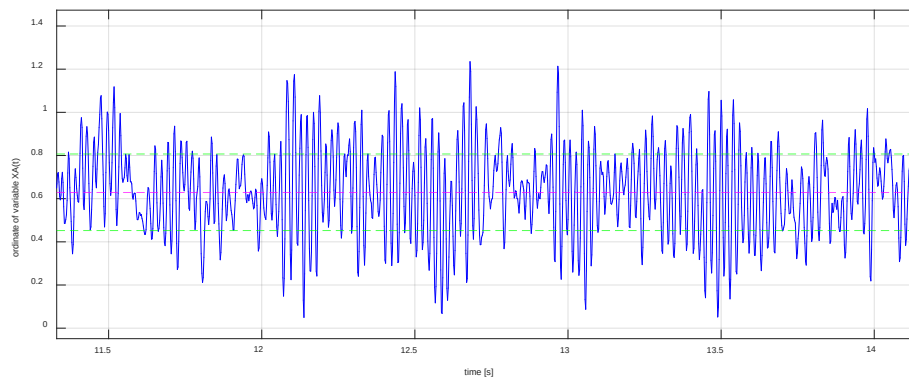
3.1 Korrelation mellem sideværts og løftekraften

De målte laster for sideværtskraft og løft kan tænkes i det ekstreme tilfælde at være høje på samme tid og dermed udøve en max last på trailer i begge retninger samtidigt. En korrelations mellem de to laster er vist på Figure 18 med i relativ høj korrelation koefficient omkring 25% for tilfældet ved 45^0 flowvinkel og midt på bro.



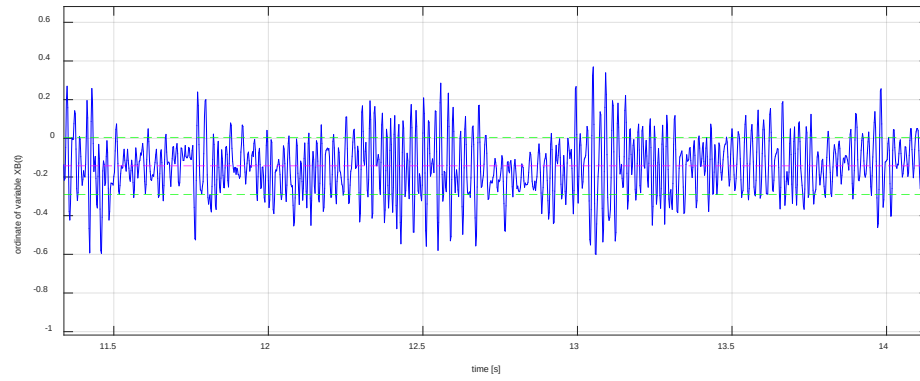
Figur 18 Korrelation for sideværts (drag) og lift kraft, punktskyen viser samtidige side- og liftkræfter (modelskala). Område med max værdier for både side og liftkraft afmærket.

Dette kunne indikere et sammenfald mellem max værdier for både side- og liftkraft. Et detaljeret kig på tidserie, Figur 19 og Figur 20, viser dog kun begrænset tidslidt sammenfald for max værdier.



Figur 19 Sidekraft variation, modelskala, 45^0 , midt på bro

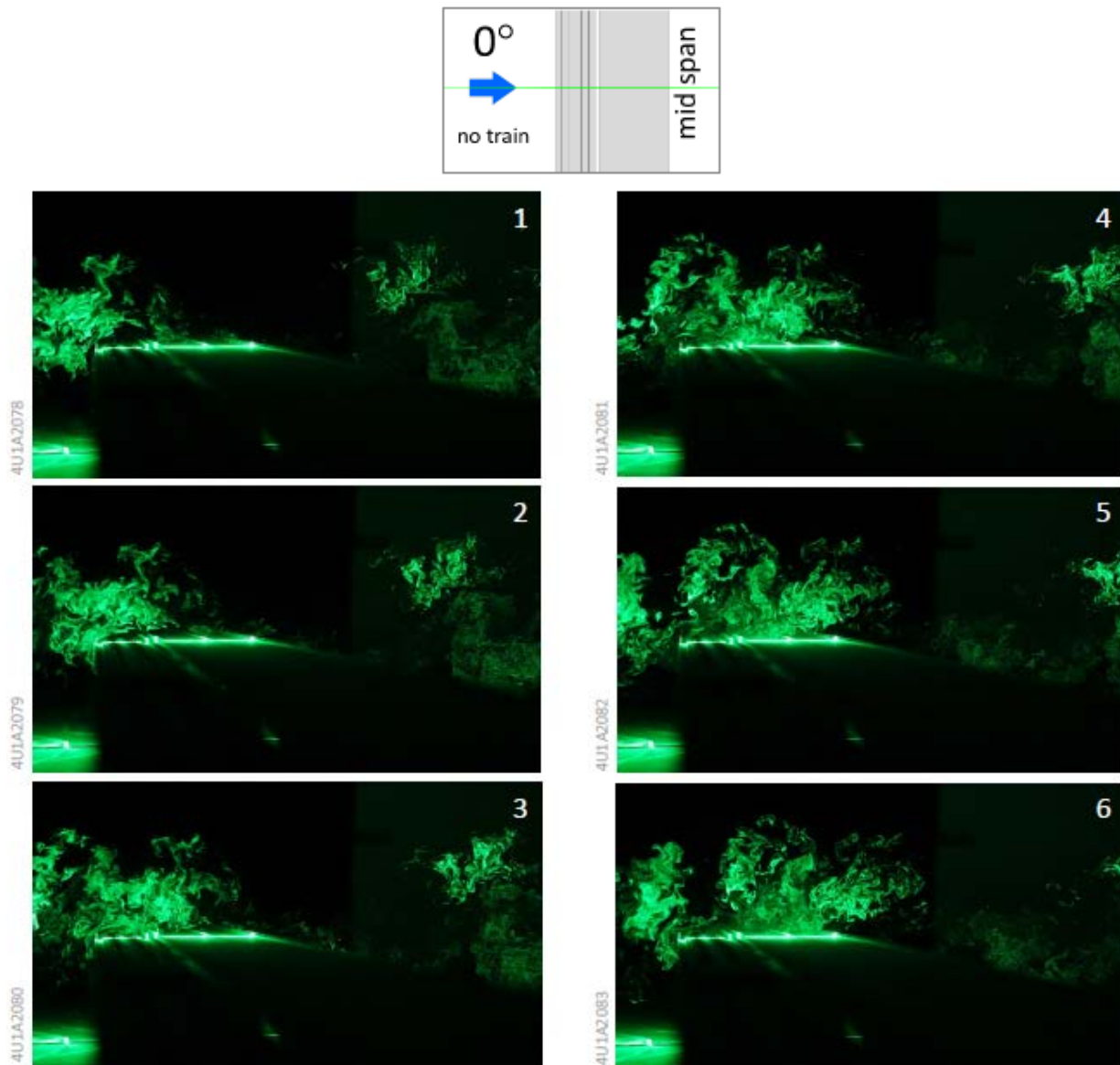
Dermed synes der ikke at være afgørende med en stor lift kraft i sammenfald med en stor sideværts kraft, i det øjeblik hvor traileren vælter af.



Figur 20 Liftkraft variation, modelskala, 45^0 , midt på bro

4. Flow visualisering af strømning

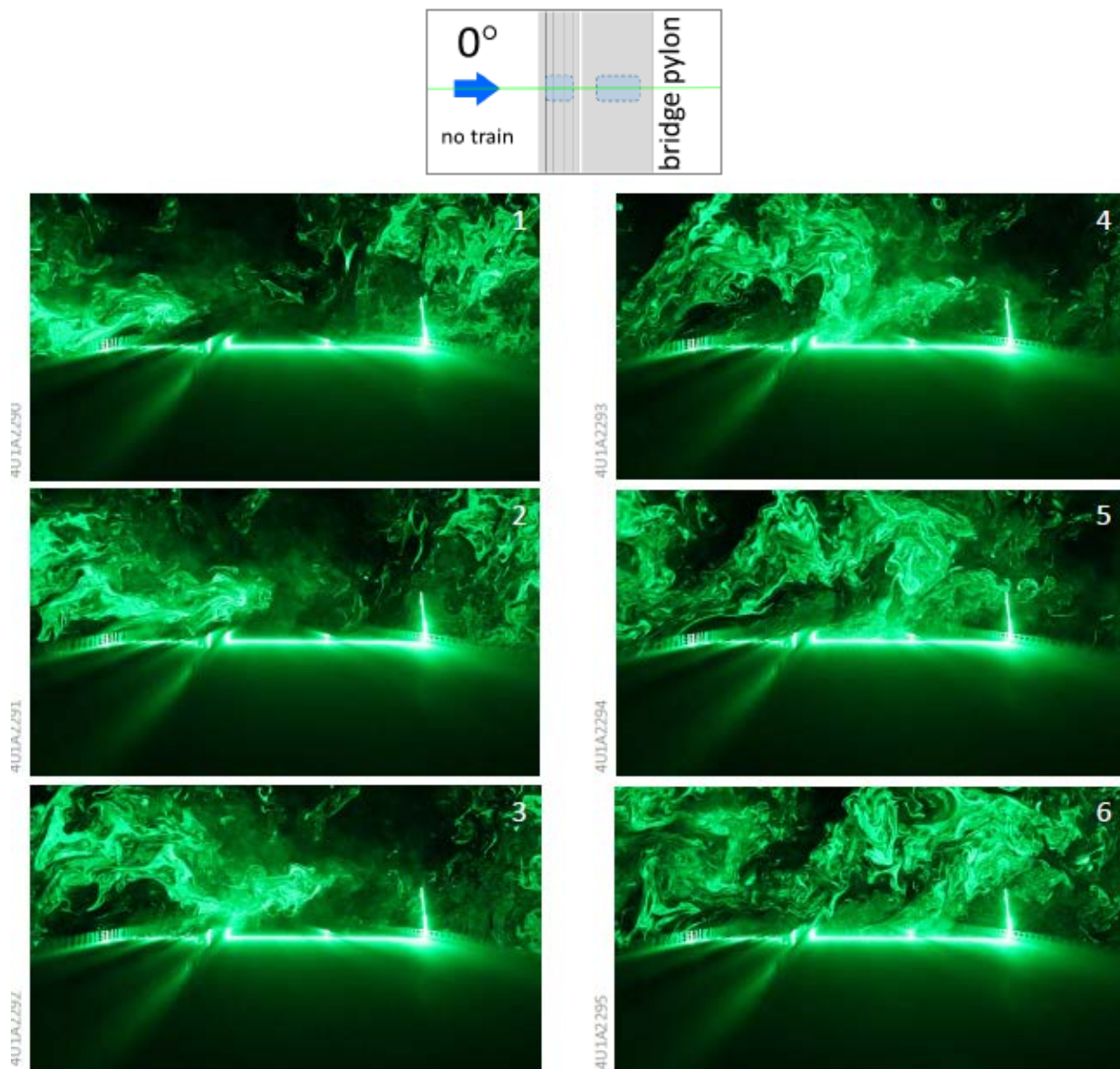
Strømningen omkring bro og tog er visualiseret med røg ved relativ lav hastighed, ca. 1m/s og filmes med ca. 10fps. Dette skønnes umiddelbart ikke afgørende at strømningshastigheden er betydeligt lavere omkring bro og tog, idet kantede geometrier svarende til bro og tog geometri erfaringsmæssigt kun udviser begrænset indflydelse af viskose effekter (Reynolds tal) for det karakteristiske strømningsbillede. Kræfterne vil dog typisk være mere følsomme. Et eksempel strømningen midt på brofag er vist på Figure 21 illumineret med laser plan.



Figur 21 Strømning henover tog og vejbro midt på brofag.

Den indkommende strømning deles over og under brofag gennem gitter (til venstre) og 'ruller' u-separeret henover tog og vejbro uden større deformation af røg strukturer. Tilsvarende forsøg ved 15° viser samme tendens uden separerede flowmønstre. Udfor bropille, i position

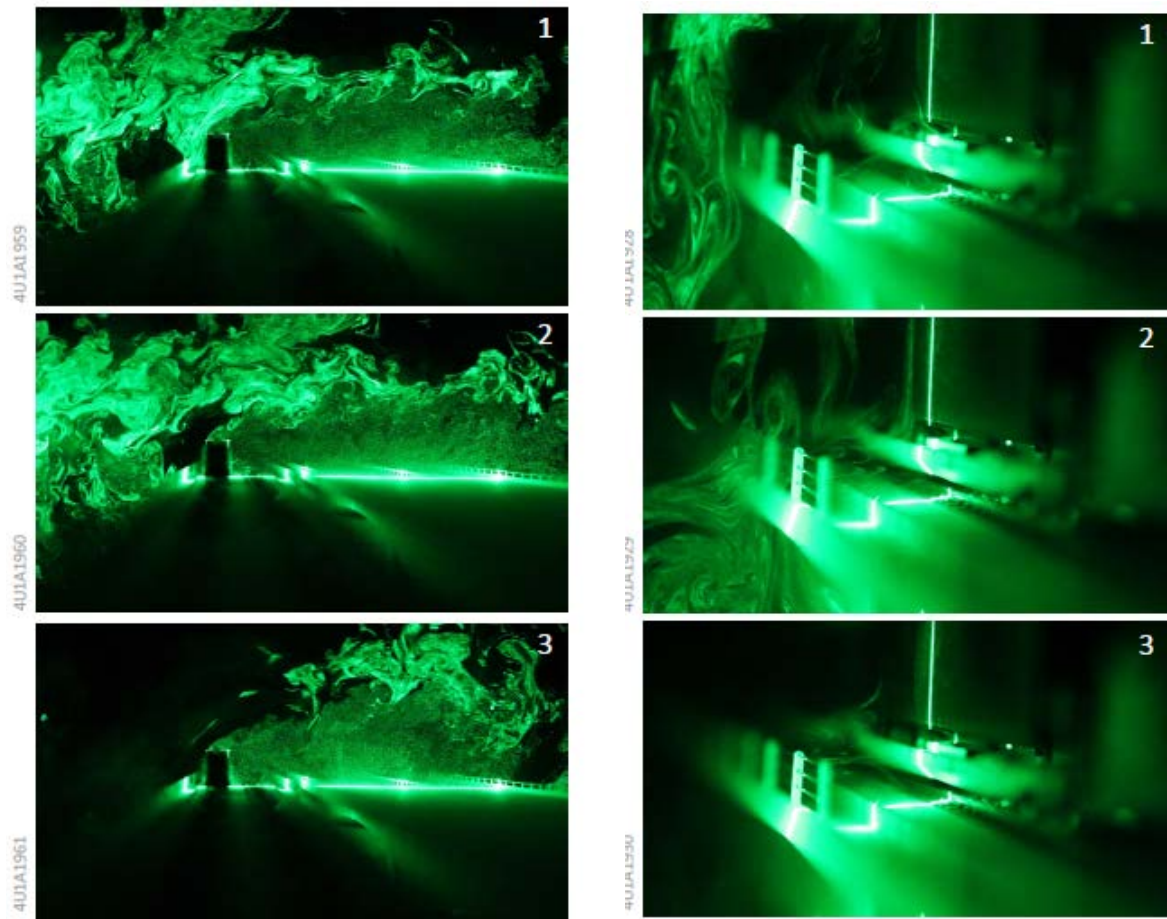
med sonic, Figur 22, er strømnings billede ikke afgørende anderledes, flow strukturer konvekteres fint hen over broen.



Figur 22 Strømning over bro ved pille. Sonic anemometer er illumineret til højre.

Ved sonic anemometer positionen ses heller ikke separations mønstre i flowbilledet. I sammenhold med probe målinger for hastighedsprofiler vist på Figur 5, synes der her at være et fint sammenfald, uden separations lignende strømningsstrukturer i niveau for sonics anemomenter.

For tilfældet ved passage af tog i sidevind vil der i et kortere tidsrum være et ændret strømningsbillede henover tog og vejbroen som på Figur 23.



Figur 23 Flow over tog og bro, 0^0 , midt på brofag, til venstre, lokal strømning omkring togvogn fra nord.

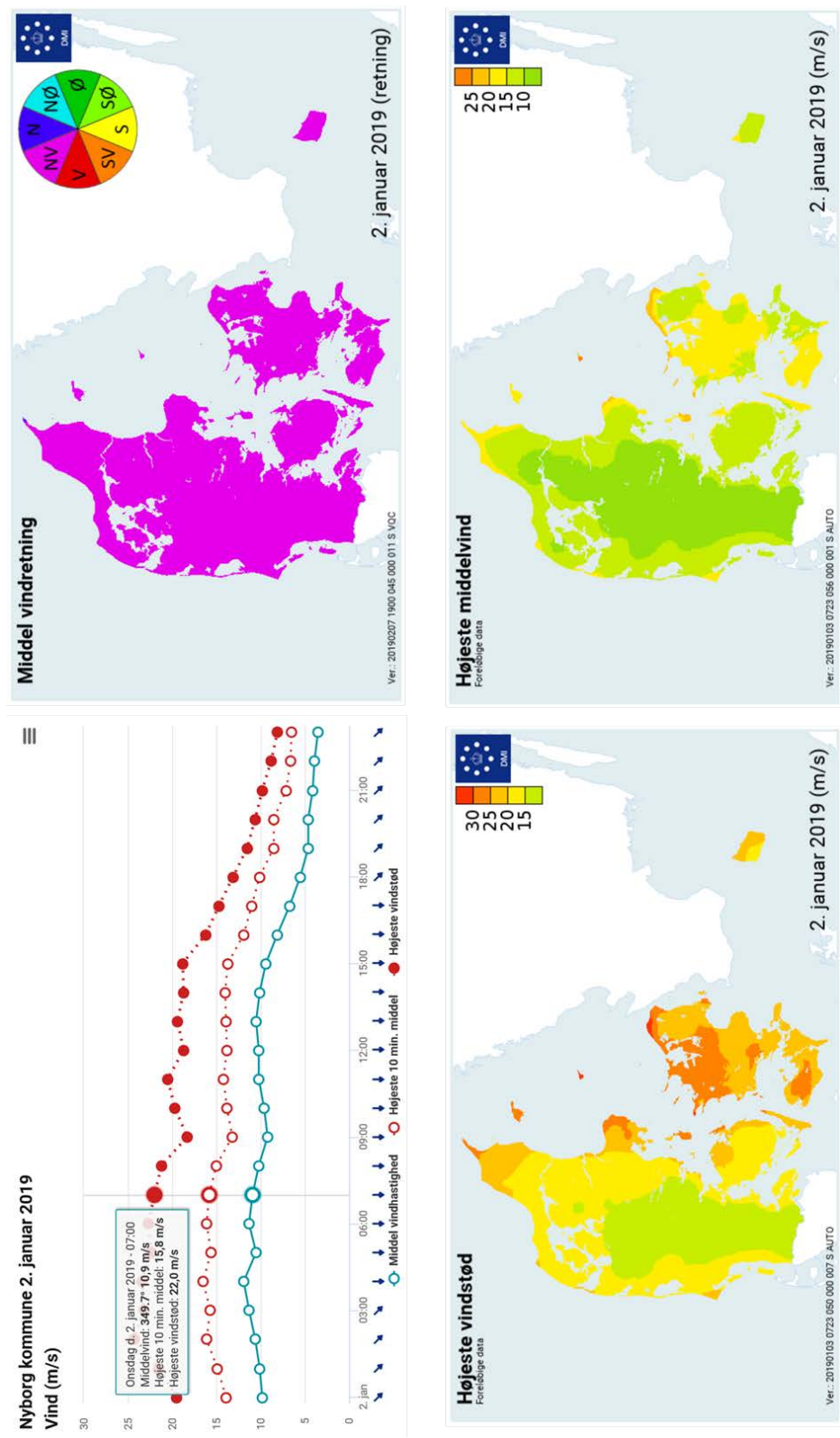
Strømninger ses klart separeret nedstrøms for togvogn der strækker sig langt henover vejbanen. Vejbroen vil i tidsrummet for tog passage opleve forøget turbulens med skiftende vindretninger. For sonics anemometer målinger vil der kortvarigt, $\sim 10-15$ sek, være en indflydelse for de målte værdier, men for en et-minuts tids-midling, vil det ikke signifikant ændre på den frie vindhastigheds aflæsning. Ses på strømningen lokalt nær lommevognen, antydes nogen strømning bevægende sig under lommevognen. Dette forhold kunne forklare lift komponentens begrænsede korrelation for max værdier idet trykfordelingen på den samlede trailer der udgør kraften i lift retningen, har strømning både over og under trailer. Dette kan ikke verificeres nærmere for nuværende.

5. Konklusioner

Ud fra ovenstående analyse af lastmålinger i vindtunnel kan følgende opsummeres-konkluderes:

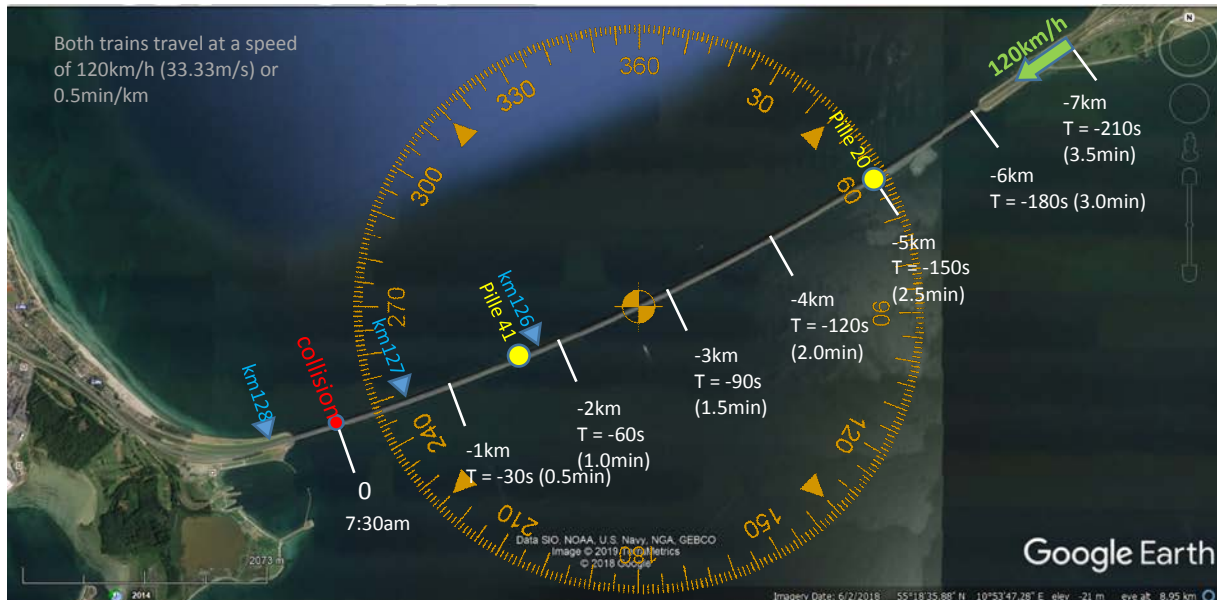
- De aerodynamiske sideværts- og liftkraft koefficienter er kortlagt for en trailer på en lommevogn i et bredt indfaldsvinkel område, $0-90$ deg.

- Med de aerodynamiske sideværts koefficienter er den kritiske vindhastighed bestemt i middel til 19.5-20m/s som værende tilstrækkelig til at opnå en sideværtskraft svarende til 3200kg målt i trækforsøg
- Vindstøds-laster kortlagt fra målinger giver en Gust-Load-Faktor, GLF, på 1.2 i middel og 1.3 i max.
- Med $GLF=1.3$ sænkes den kritiske hastighed til 17.5m/s ækvivalent med 18.4m/s for anemometer aflæsning.
- Det er anskueliggjort at der på ulykkestidspunktet har været tilstrækkeligt med middelvind og vindstød til at opnå en sideværtskraft svarende til 3200kg.
- Der er målt betydelig liftkraft, op til 1700kg ved 20m/s og 120km/t kørsel. Med en tom trailer dødvægt på ca. 6.5t er dette ikke tilstrækkeligt til at løfte trailer af lommevogn, men dog et last bidrag i retning af at vælte traileren af lommevognen. Løftekraften tillægges ikke afgørende betydning i ulykkesøjeblikket.
- Flowvisualisering med røg omkring bro er undersøgt for 0° , 15° og 45° midt på brofag og pille. For 0° og 15° ses den frie vind at passere henover tog- og vejbro uden separation. Vind aflæsning med cobra probe stemmer overens med en u-separeret strømning, anemometer positionen findes at angive repræsentative vindmåling med vinden i nord.

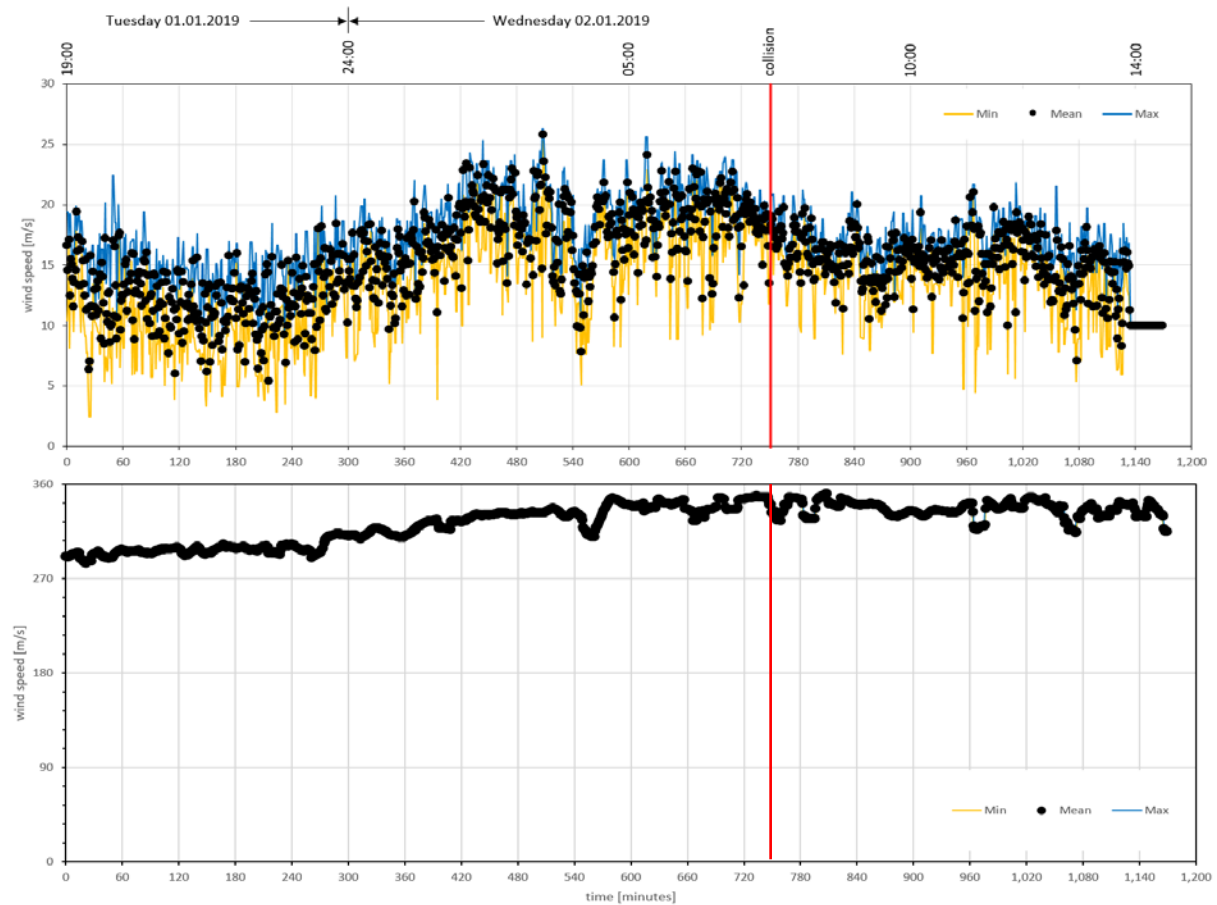


Figur 24 DMI Vinddata, 2. jan, 2019

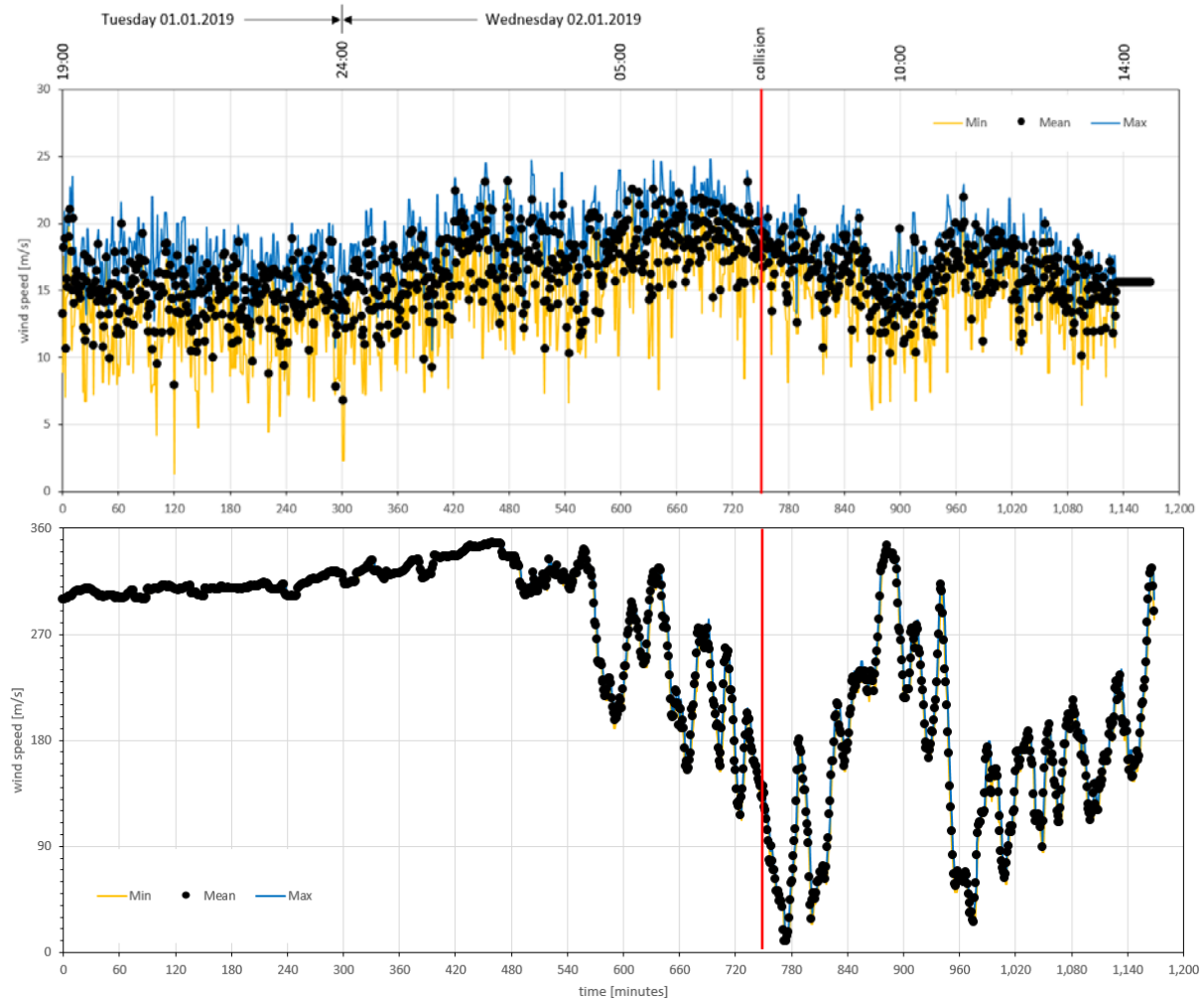
App. A2 Vind måling på vestbro, sonic anemometer ved pille 20 og pille 41



Sonic anemometer pille 41, T=-0.8min

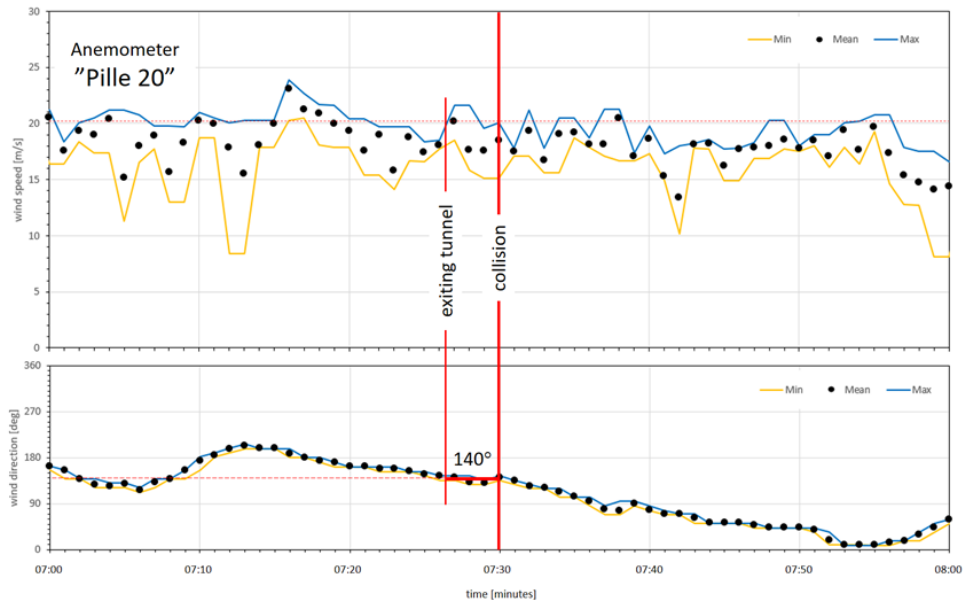


Sonic anemometer pille 20, T-2.5min

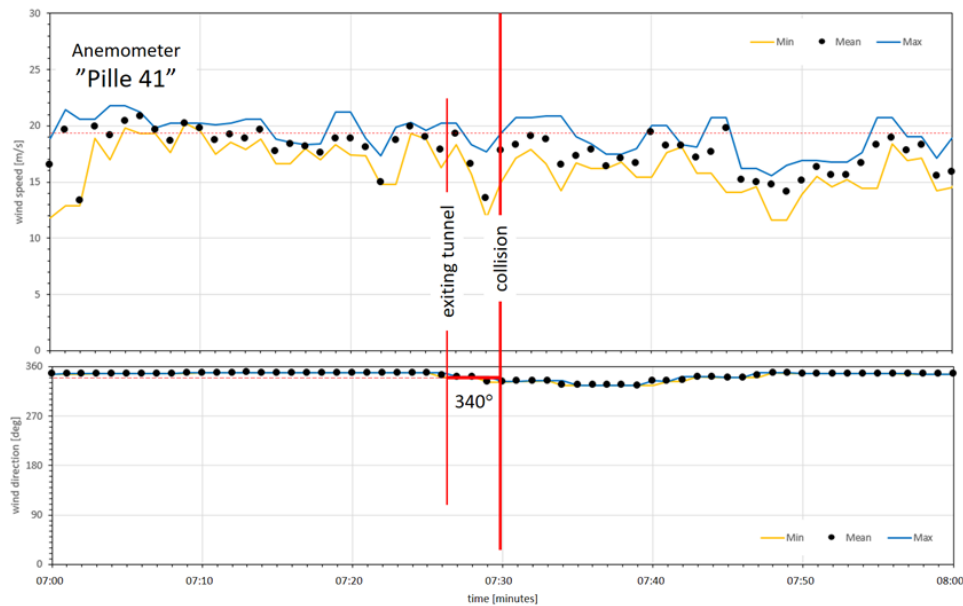


Figur 25 Vindhastighed ved pille 20

Zoom af anemometer pille 20, T=-0.8min

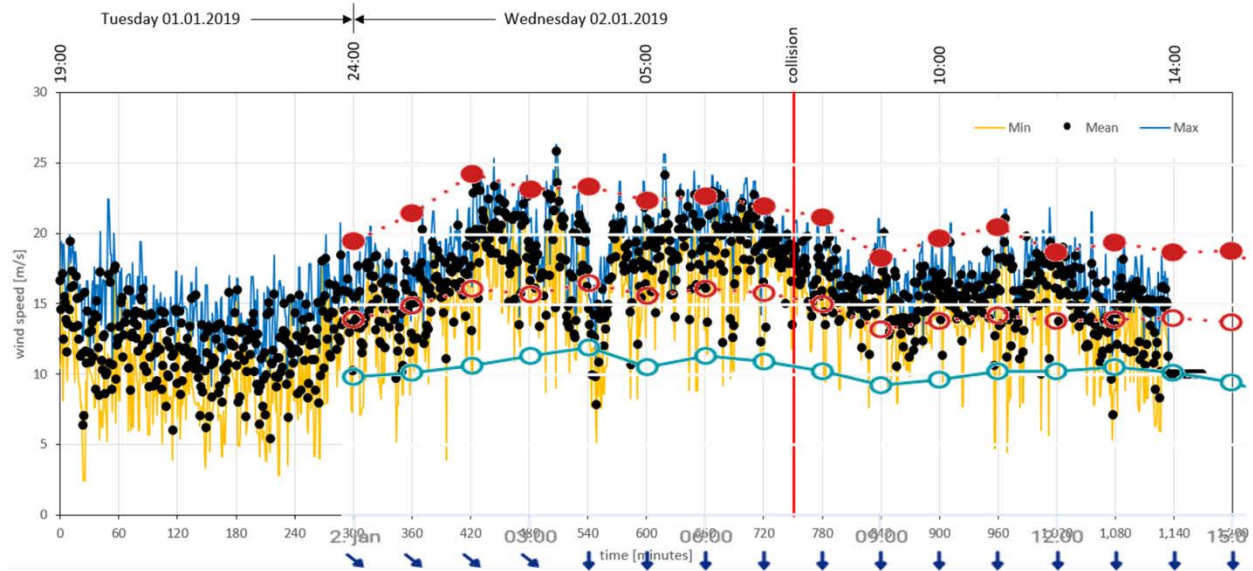


Zoom af anemometer pille 41, T=-2.5min



Ifølge officielle kilder er tidspunktet for kollisionen 07:29 den 2. januar 2019. Det tager et tog, der kører med en hastighed på 120 km/t (33.33 m/s) ca. 3,5 minutter fra det forlader tunnelen til kollisionspunkt svarende til en afstand på 7 km. I dette tidsvindue (se figurerne A2.) blev den højeste gennemsnitlige vindhastighed målt på pylon 20 kort efter, at godstoget ville have forladt tunnelen.

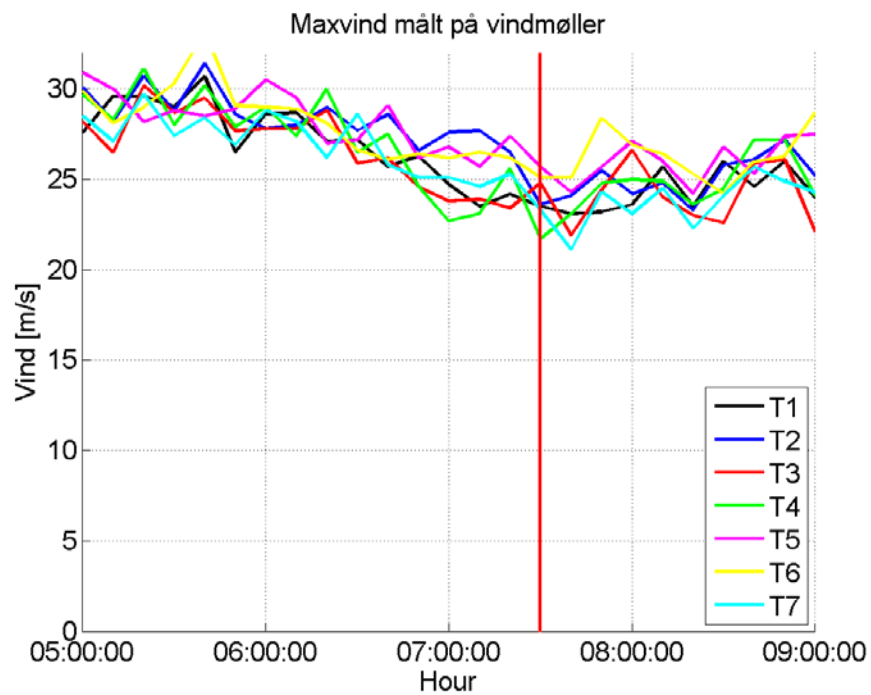
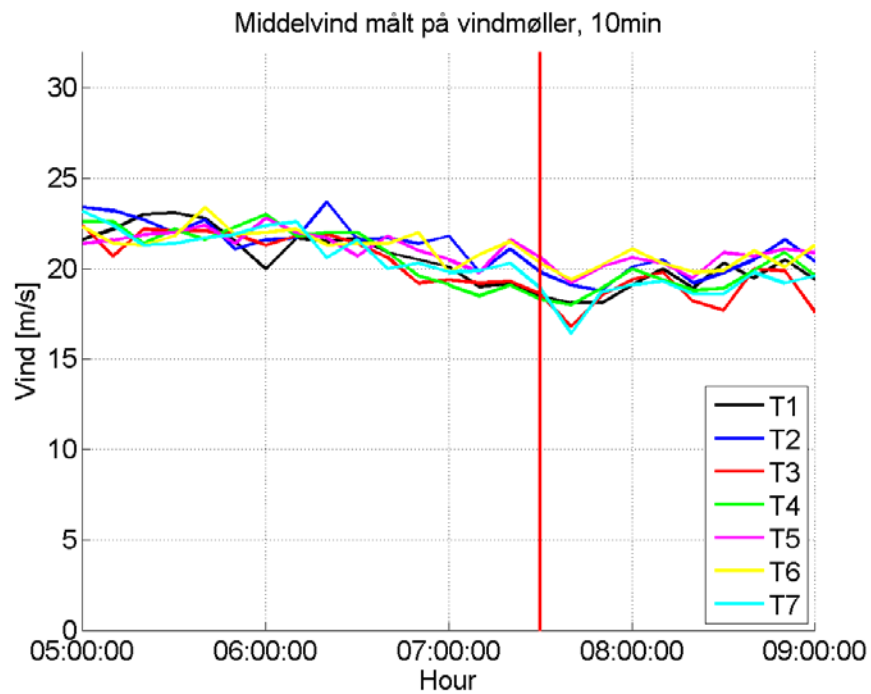
Ved vindbelastningsmålinger i vindtunnel blev referencevindhastigheden V_{ref} , målt i en højde L svarende til toppen af traileren. Her er vindhastigheden ca. 5% lavere end vindhastigheden registreret ved bro-anemometeret ved pylon 41. Som et godt skøn og lidt konservativt kan en fuldskala middelhastighed på 20 m/s antages øverst på traileren.



Figur 26 Sammenligning mellem DMI data fra Nyborg og Sonic data, Pille 41. Max, middel og minimum hastigheder (10min middel, DMI) markeret med rød(fuld), rød (åben), blå(åben).

App. A3 Vindmåling fra vindmøller

Vindmøller nord for vestbro, d.2 Jan 2019, kl. 5.00-9.00, 10min middel og max.

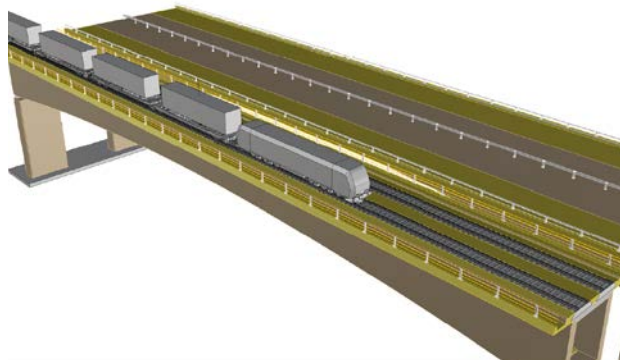


Kollisionstidspunkt markeret med linje kl.7:29

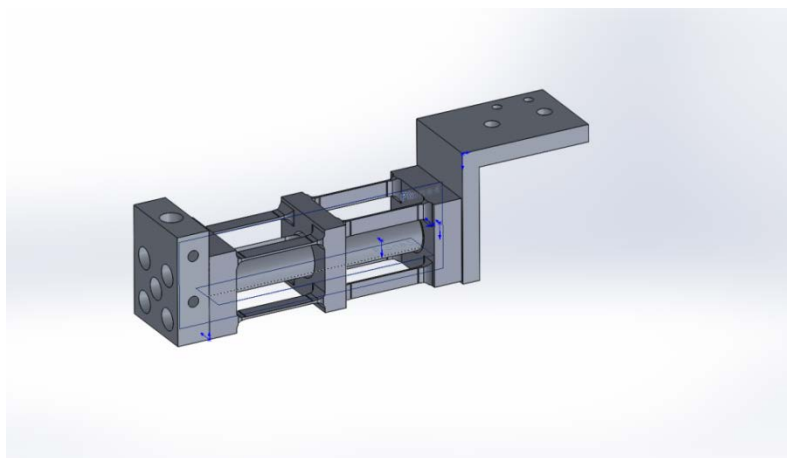
App. B1 CAD af bro



Fem brofag

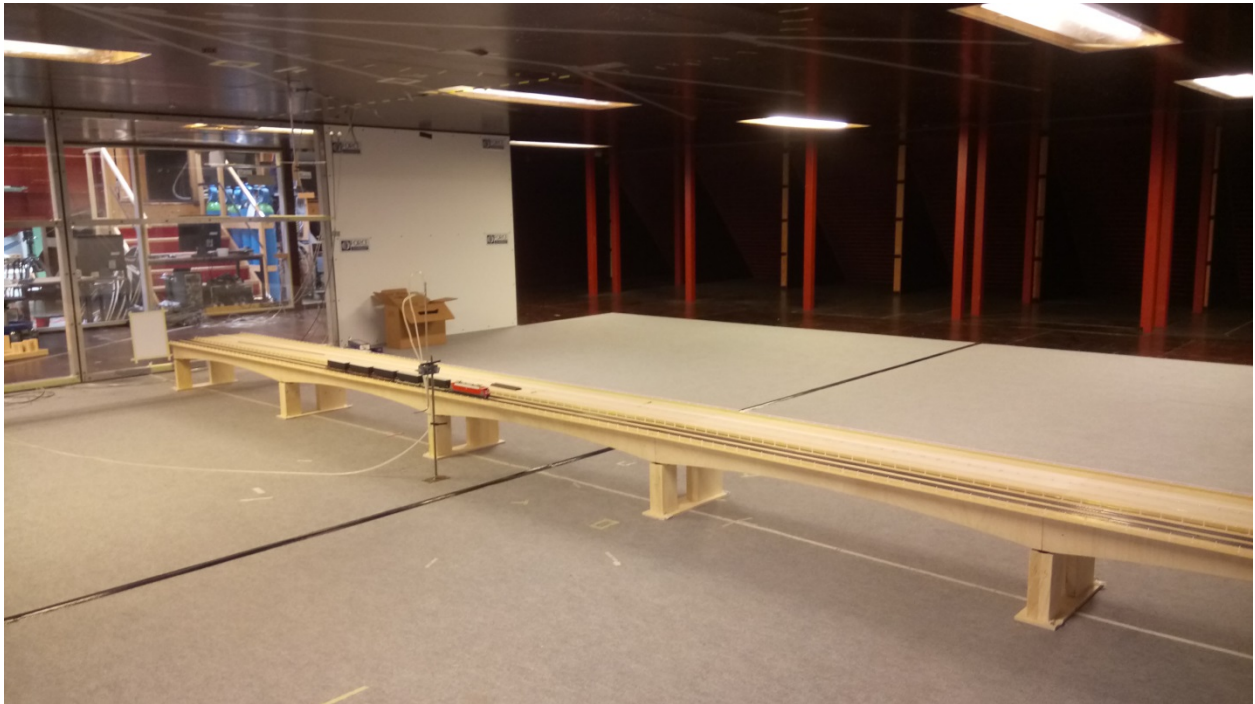


Tog placeret på bro

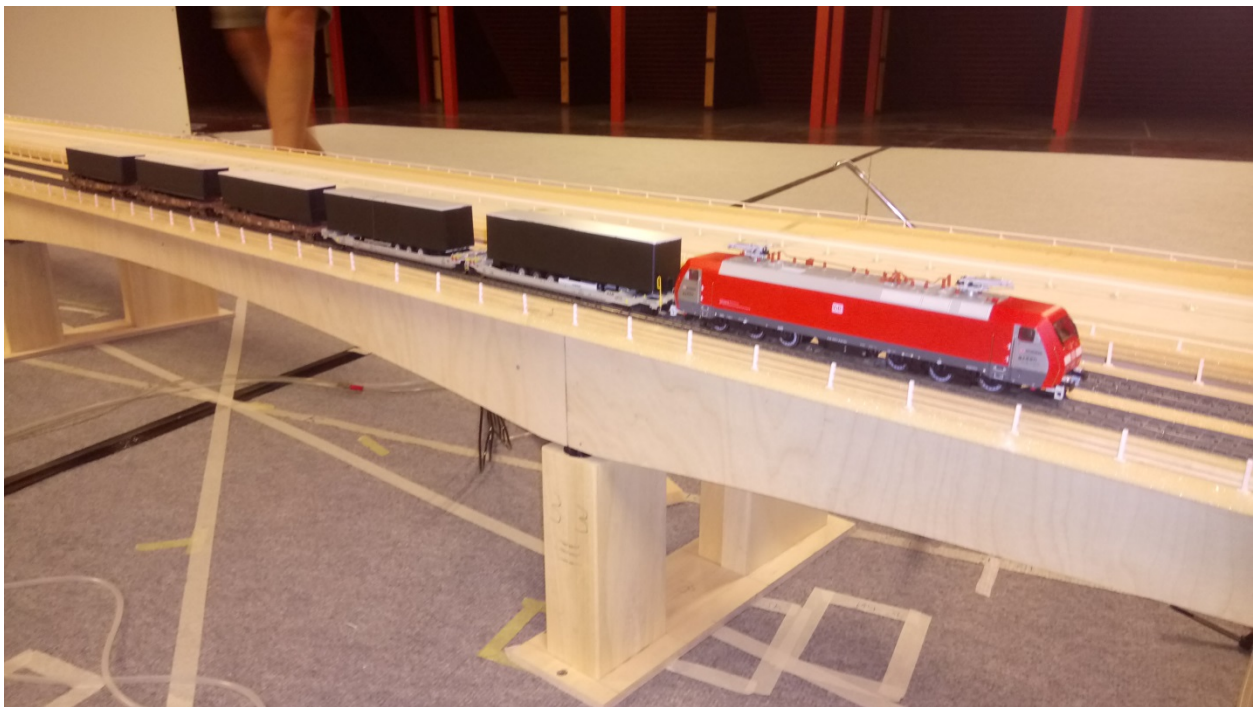


3-komponent force gage, F_x , F_y , M_z , max last: 20N

App. B2 Foto af bromodel i vindtunnel



Bromodel i atmosfærisk vind tunnel, 7m bred, 1.75m høj. Vindhastighed: 100% ~ 13m/s, 80% ~ 10m/s, 60% ~ 7m/s.



Trailer lige efter lokomotiv er monteret på gage for måling af laster, ovenover i position ud for pille.

Bromodel nedefra, center brofag modificeret for montering af gage

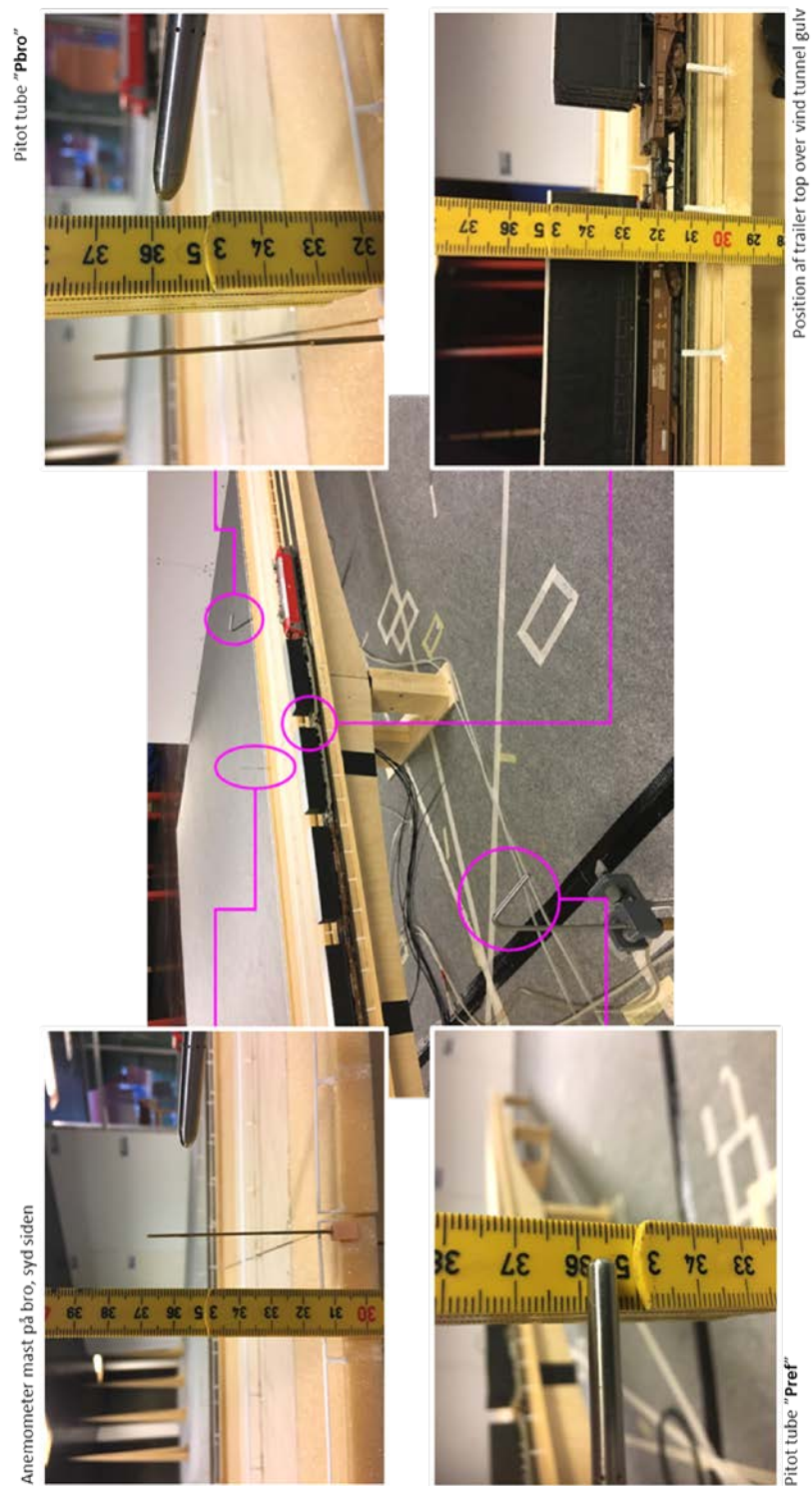


Gage kan monteres midt for brofag og ud for pille.



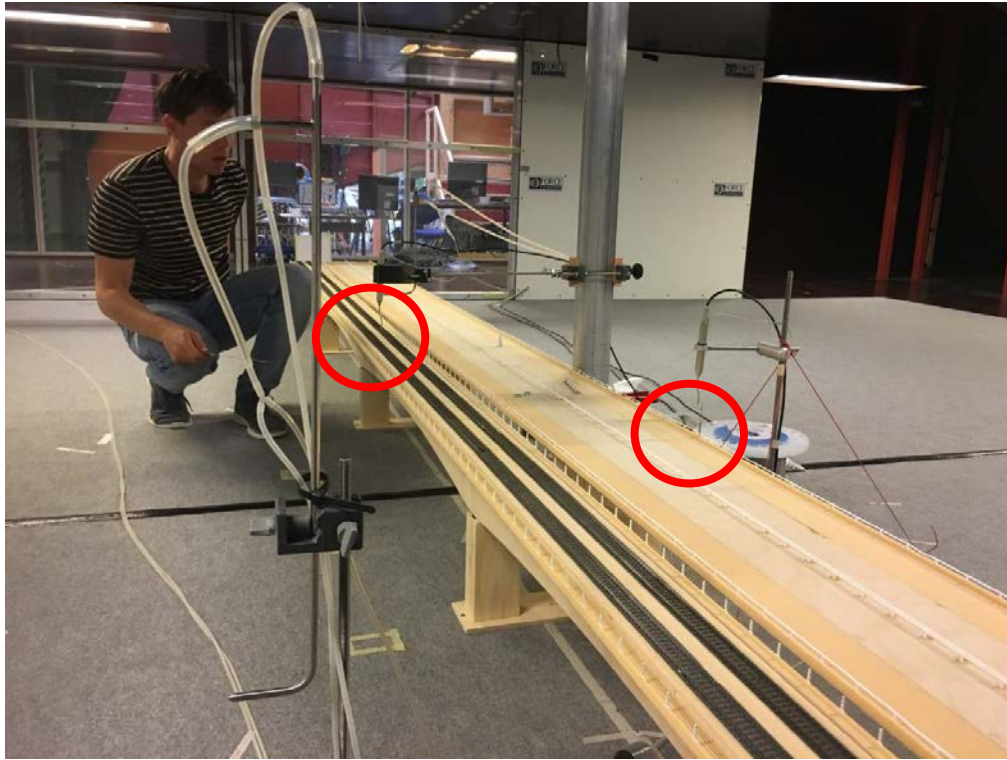
Togstamme på brofag, trailer bag lokomotiv fikseret i gage med position midt på brofag

App. B3 Reference mål

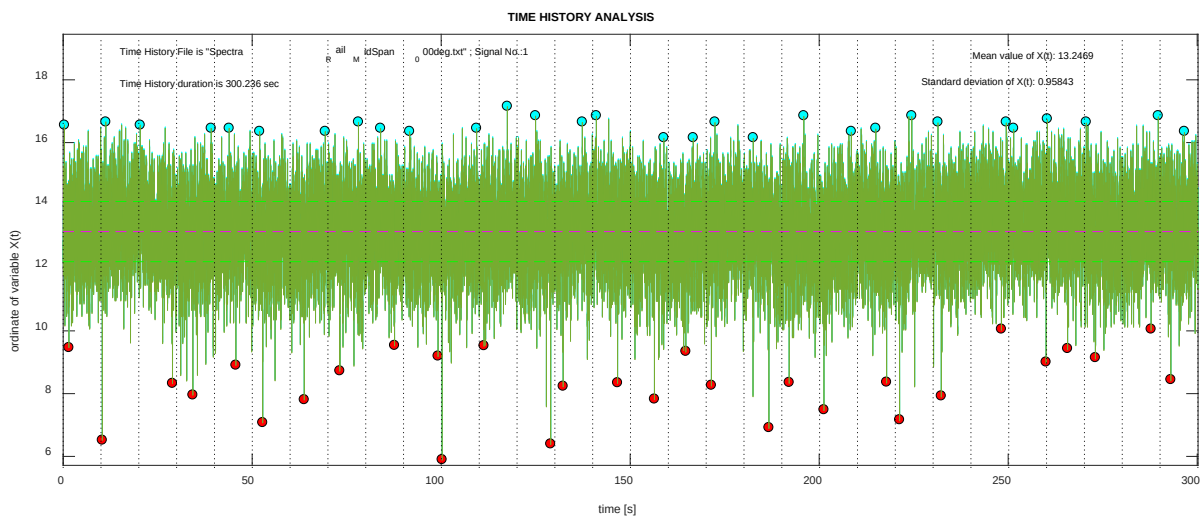


App. B4 Måling af reference hastighed

Hastighedsprofiler målt med 5 huls Cobra probe

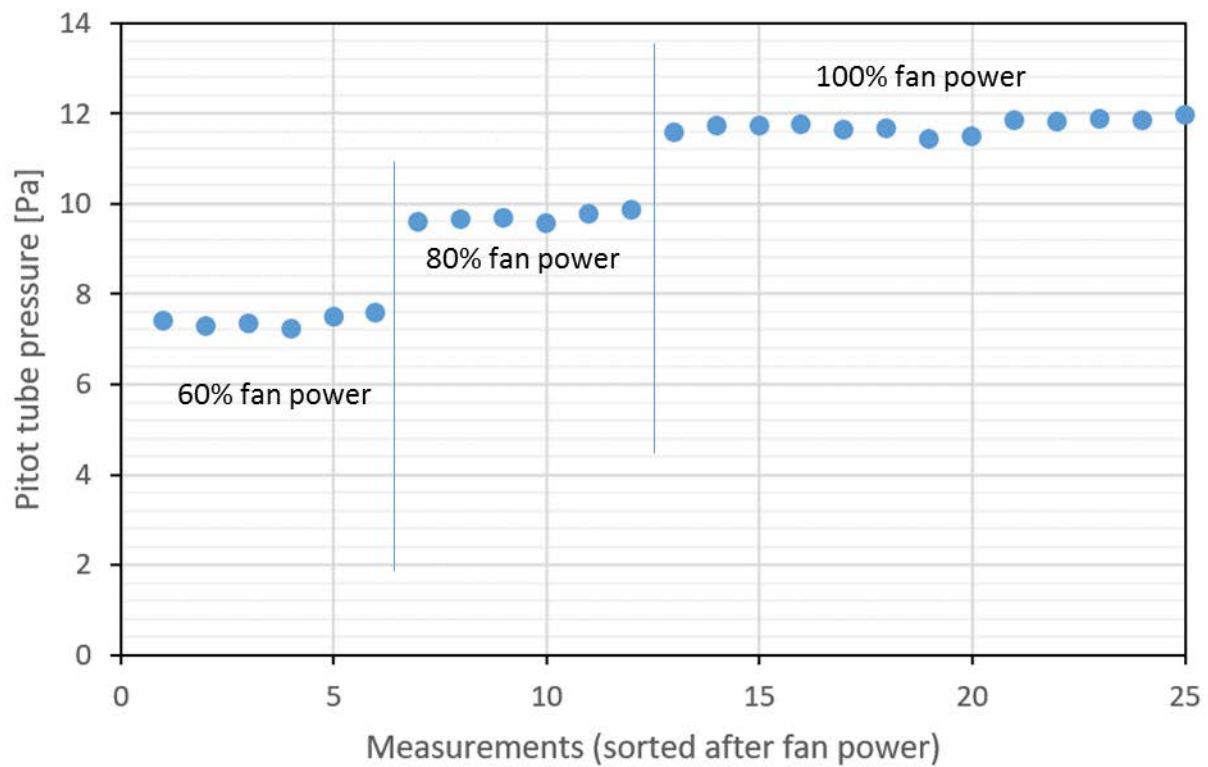


Hastigheds profil målt ved 'pille 41' og midt på brofag, foran (opstrøms) og bagved (nedstrøms) for bro.



Den 'rå' 300s tidshistorie for vindhastighed målt i højden svarende til midt for trailer. Middelvind, ca.13m/s, ± 1 gange standard afvigelsen samt ekstrem hastigheder.

App. B5 Reference pitot måling i forhold til tunnel blæser power



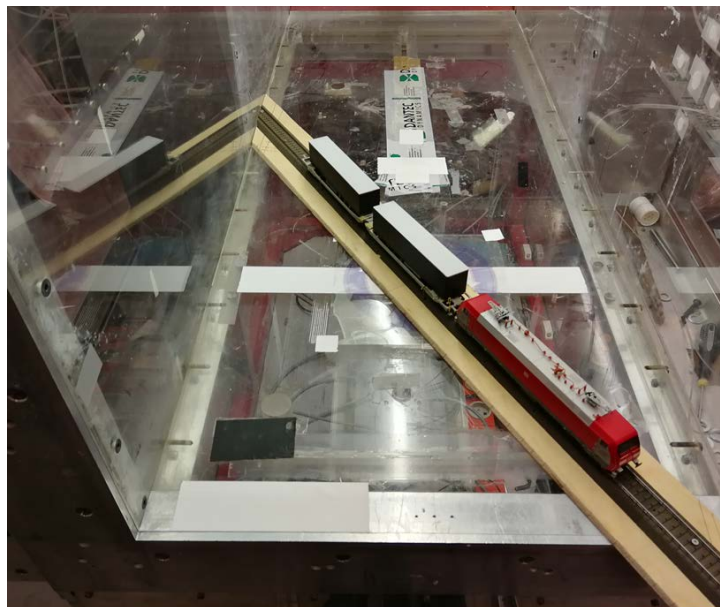
Pitot tryk "Pref" foran bro

App. C1 Rød tunnel setup

Isoleret tog setup, målt ved 45^0 , 55^0 og 60^0



Figur 27 Tog placeret i 60^0 flowvinkel

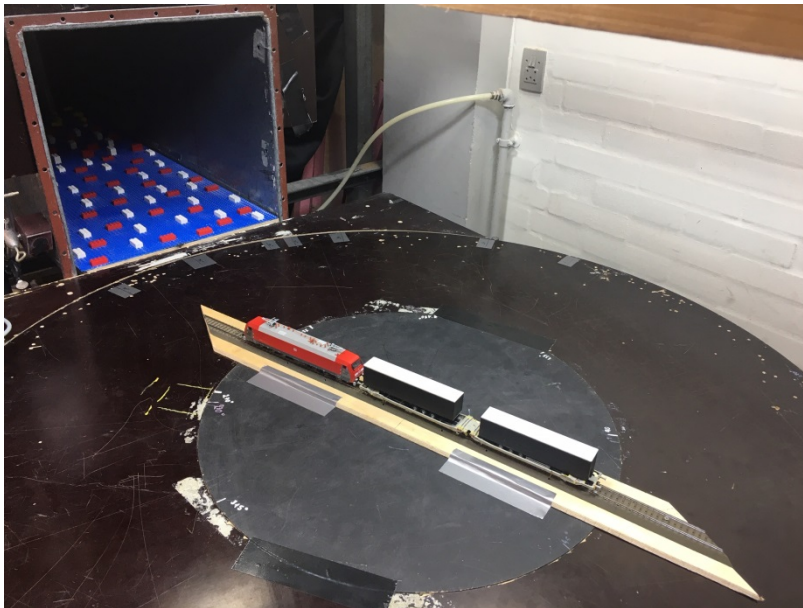


Figur 28 Set oppefra, kraftgage på trailer lige bag lokomotiv

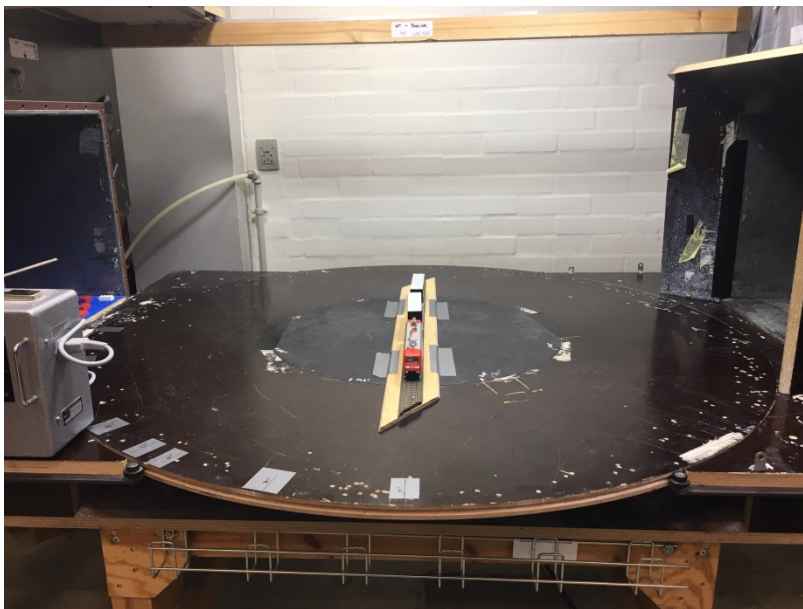
Kraftgage er samme som i tog-bro konfiguration, placeret under og parallelt med tog. Der måles kun på trailer lige bag lokomotiv ved samme hastigheder som i atmosfærisk tunnel, men ved lav turbulens og uniformt/fladt hastigheds profil.

App. C2 Åben jet tunnel ved DTU Byg

Tog alene, målt ved 0, 15, 45, 55, 60, 65, 75 og 90^0 , 13m/s.



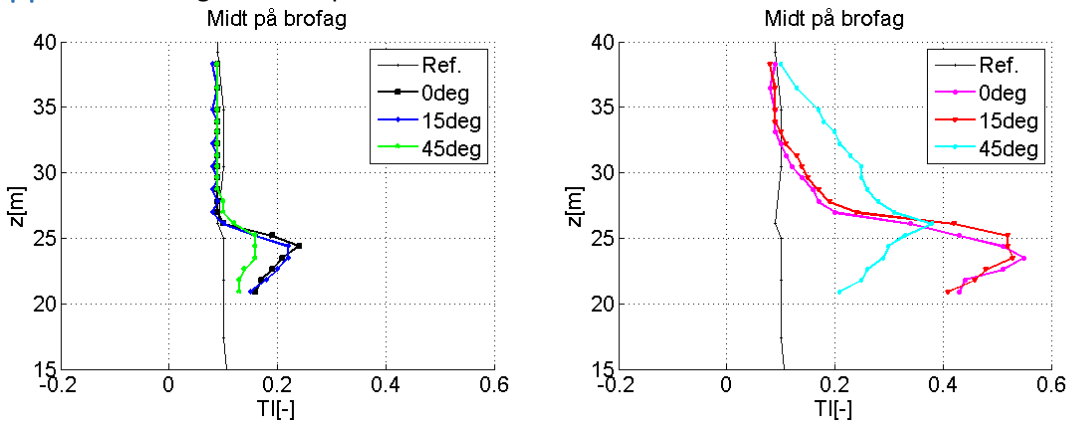
Figur 29 Tog placeret i 60^0 .



Figur 30 Tog placeret i 0^0

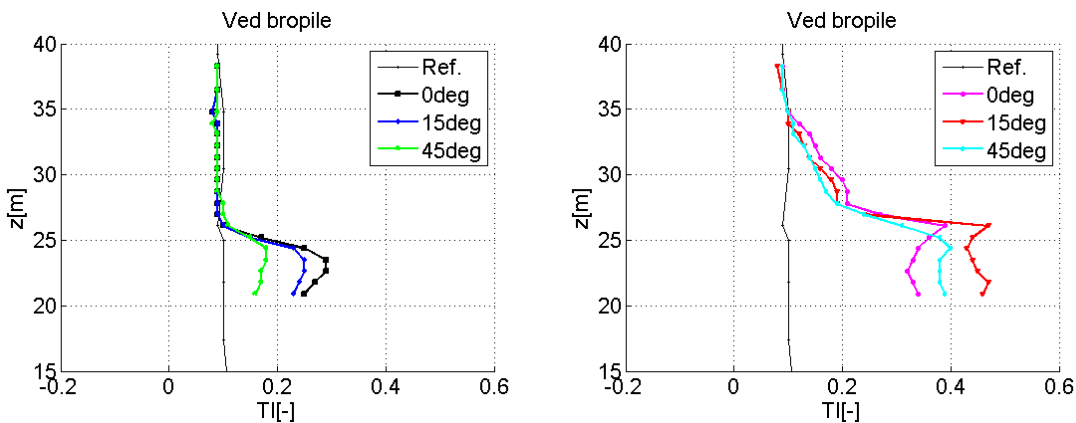
Kraftgager er samme som i tog-bro konfiguration, placeret under og parallelt med tog. Der måles kun på trailer lige bag lokomotiv ved samme hastigheder som i atmosfærisk tunnel, med turbulens intensitet, $Ti=15\%$ og grænselags hastigheds profil.

App. D1 Vind- og turbulensprofiler



Figur 31 Turbulens profiler midt på brofag, indkommende vind på tog siden, venstre, på vejsiden, højre.

Turbulens midt på brofag, den indkommende vind på togsiden, til venstre, og ved vejsiden, til højre. Turbulens intensiteten, TI, ses at sammenfalde med fristrøms TI-profilet, ca. 9% på togsiden fra vejbanen og opefter. Henover tog- og vejbroen stiger TI til mellem 20-30% i vejbane højde, faldende til 12-15% i sonic højde for 0° og 15° og ca. 25% for 45° .

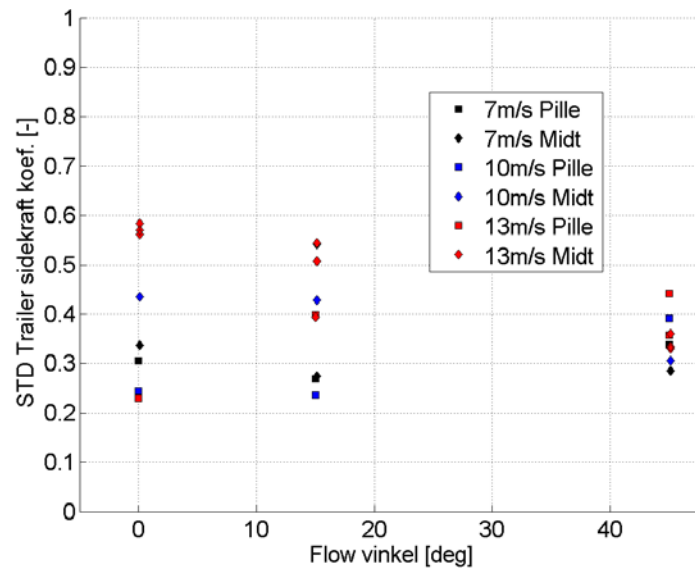


Figur 32 Turbulens profiler ved pille, indkommende vind på tog siden, venstre, på vejsiden, højre.

For TI ved bropille ses tilsvarende profiludvikling, dog med et sammenfald for alle 3 vinkler på begge sider fra vejbanen og opefter.

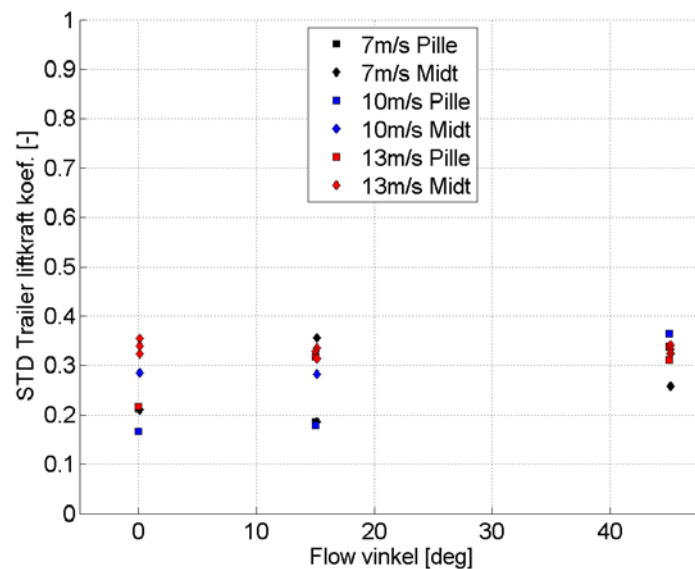
App. E1 Side- og liftkraft koefficient, standard afvigelse

På Figur 33 og Figur 34 ses standard afvigelse for side- og liftkraft koefficeint.



Figur 33 standard afvigelse på sidekraft koefficient

Standardafvigelse for sidekraft koefficient er med nogen spredning og ses at være størst midt på bro, modsat middelværdien.



Figur 34 Standard afvigelse på liftkraft koefficient.

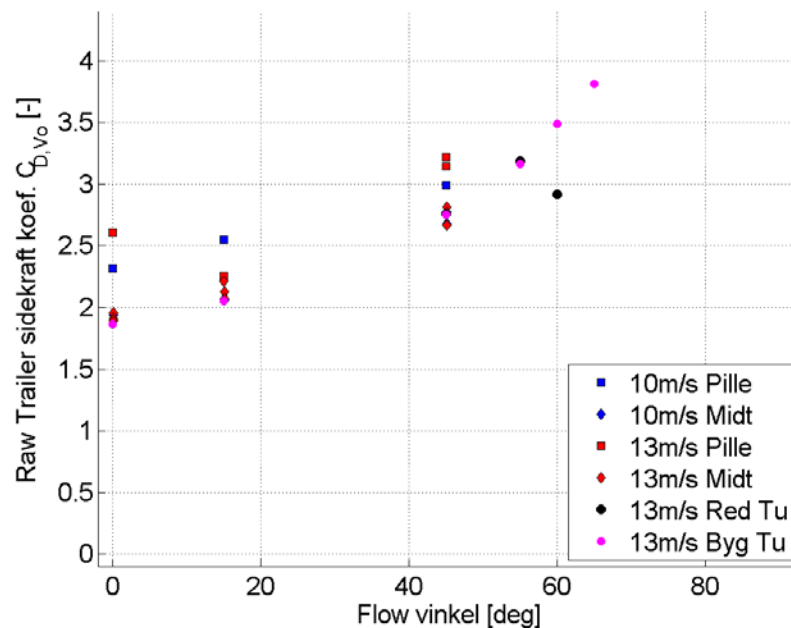
Nogen samling af data midt på bro og ved pille for standardafvigelse for liftkraft koefficient og mindre spredning i forhold til sidekraft koefficient.

App. E2 Sideværtskraft koefficient C_{D,V_0}

På Figur 35 er vist sideværts kraft koefficeint C_{D,V_0} gældende i forhold til den frie vind på tværs af broen dvs.

$$F_D = \frac{1}{2} \rho A_r V_o^2 C_{D,V_0} \quad [\text{N}]$$

hvor sideværtskraften F_D er den samme i ligning (1), men med V_o som vindhastigheden midt på trailer dug, ikke relativhastigheden.



Figur 35 Sideværts kraft koefficient i forhold til vind (ikke relativ vind)

Deraf er $C_D = \cos^2 \alpha \cdot C_{D,V_0}$ hvor α er flowvinkel. Trenden for C_{D,V_0} er stigende fra ca. 2 ved nul grader midt på bro og 2.3-2.6 ved pille, til 3-3.5 ved 60deg, ca. svarende til 120km/t med 20m/s sidevind. Antages $C_{D,V_0} = 3.2$ ved 60deg findes den kritiske vind hvor sideværtskraften svarende til 3200kg til

$$V_o^2 = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho A_r C_{D,V_0}} = \frac{3200 \cdot 9.82}{\frac{1}{2} \cdot 1.28 \cdot 40.4 \cdot 3.2} \rightarrow V_o = 19.5 \text{ m/s}$$

Hastigheden svare til aflæsning på Figur 12. Anvendes yderligere en GLF= 1.3, kan hastigheden tilnærmet reduceres til

$$\hat{V} = \frac{V_o}{\sqrt{GLF}} = 17.1 \text{ m/s}$$

Anemometer aflæsning i 4.5m højde ligger ca. 5% højere end denne værdi eller ca. 18m/s.

App. G1. Fuld skala trækforsøg

Af foto på Figur 31 ses opsætning for trækforsøg med trailer på lommevogn i fuld skala.



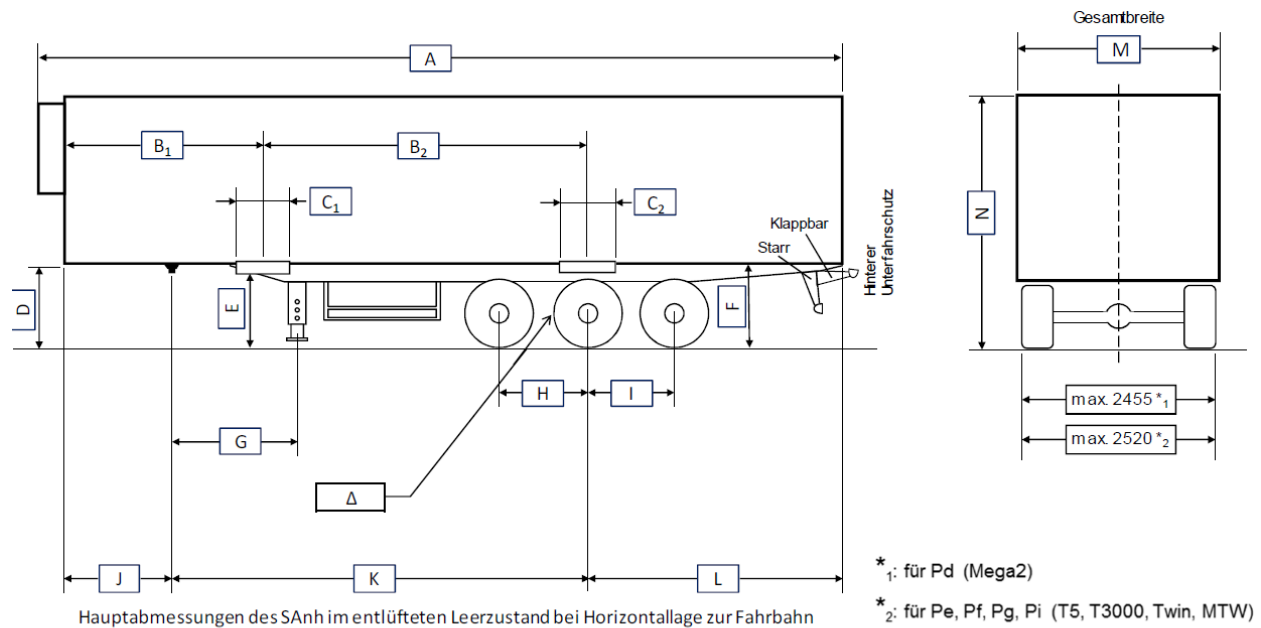
Figure 36 Trækforsøg på trailer

En række testforsøg blev gennemført. For tilfældet med ulåst kongetab, var den nødvendige trækraft sideværts ca.3200-3250kg for at tilte trailer.

Tabel med middeldata for gaugemålinger

Vink	Vbro	Vref	rho	Temp	Pbro	C_D	CL	stdC_D	stdC_L	
0	8.0	7.6	1.168	27.7	33.7	1.84	0.16	0.34	0.24	P
0	10.5	9.9	1.164	28.5	56.5	2.32	0.04	0.28	0.19	P
0	12.9	11.9	1.159	30.0	82.4	2.61	0.03	0.27	0.25	P
0	7.9	7.5	1.162	29.1	32.6	1.89	0.24	0.37	0.23	M
0	10.6	9.9	1.159	29.8	57.2	1.94	0.16	0.50	0.33	M
0	13.1	12.1	1.155	30.9	84.5	1.96	0.13	0.67	0.38	M
0	12.8	12.1	1.150	32.2	84.6	1.91	0.14	0.65	0.40	M
0	12.8	12.2	1.149	32.6	85.0	1.89	0.14	0.63	0.38	M
15	7.9	7.5	1.151	32.1	32.0	1.98	0.40	0.30	0.21	P
15	10.5	9.9	1.149	32.6	56.4	2.38	0.22	0.26	0.20	P
15	12.6	11.9	1.142	34.5	80.3	2.11	0.14	0.45	0.36	P
15	12.6	11.9	1.141	34.8	81.3	2.07	0.14	0.44	0.37	P
15	12.8	12.2	1.147	33.0	84.8	1.89	0.14	0.60	0.40	M
15	8.2	7.6	1.154	31.3	33.1	1.83	0.29	0.32	0.22	M
15	10.9	10.0	1.151	31.9	57.7	1.92	0.22	0.51	0.33	M
15	13.1	12.0	1.148	32.9	83.3	1.98	0.20	0.65	0.40	M
15	13.2	12.1	1.145	33.7	83.5	1.93	0.19	0.61	0.38	M
45	7.2	7.7	1.160	29.7	34.6	1.35	0.47	0.30	0.29	P
45	9.3	10.1	1.157	30.4	58.7	1.50	0.48	0.34	0.31	P
45	11.4	12.2	1.153	31.4	86.1	1.61	0.63	0.31	0.27	P
45	11.4	12.2	1.150	32.3	85.6	1.57	0.63	0.38	0.29	P
45	8.2	7.8	1.155	30.9	35.4	1.30	0.38	0.31	0.28	M
45	10.9	10.2	1.153	31.5	59.7	1.33	0.38	0.35	0.37	M
45	13.2	12.3	1.149	32.5	86.5	1.40	0.39	0.38	0.39	M
45	13.1	12.3	1.146	33.4	86.5	1.38	0.38	0.41	0.38	M
45	13.2	12.4	1.144	33.9	88.2	1.33	0.35	0.38	0.37	M

App. F1.



A = Fahrzeugesamtlänge inkl. Anbauteile vorne	max. 14040	mm	Kühlaggregat (max. 430 mm)	☐
B ₁ = Anschlag Stirnwand - Mitte Krantasche vorne	4334	mm		
B ₂ = Mitte Krantasche vorne – Mitte Krantasche hinten	4970	mm		
C ₁ = Krantaschenlänge vorne	500	mm		
C ₂ = Krantaschenlänge hinten	500	mm		
D = Unterkante Sattelplatte	1034	mm		
E = Unterkante Krantasche	1056	mm		
F = Plattformhöhe leer entlüftet (waagrecht)	1136	mm		
G = Stützwindenabstand	2267	mm		
H = Radstand	1310	mm		
I = Radstand	1310	mm		
J = vorderer Überhang	1654	mm		
K = Aggregatabstand	7650	mm		
L = hinterer Überhang	4350	mm		
M = max. Gesamtbreite	2550	mm		
N = Eckhöhe	vorne: 3911	mm	hinten: 3911	mm

Figur 37 Fuldskala trailer mål.