



Universitetet  
i Stavanger

DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

## MASTEROPPGAVE

Studieprogram/spesialisering:  Konstruksjoner og materialer med fordypning i byggkonstruksjoner	Vårsemesteret, 2019  Åpen
Forfatter: Ragnhild Vatne	<i>Ragnhild Vatne</i> ..... (signatur forfatter)
Fagansvarlig: Veileder(e):	Jasna B. Jakobsen Jasna B. Jakobsen
Tittel på masteroppgaven: Engelsk tittel:	Analyse av vind-induserte vibrasjoner av en hengebro med fokus på samtidig respons av brodekket og brotårnet. Analysis of wind-induced vibrations of a suspension bridge focusing on simultaneous response of bridge deck and tower.
Studiepoeng:	30
Emneord: Hengebro Måledata Middelvind Responsspektra Standardavvik	Sidetall: ....70..... + vedlegg/annet: .24..... Stavanger, .....14.06.19..... dato/år

# Forord

Masteroppgaven er avsluttende del av min mastergrad innen studieretningen konstruksjoner og materialer med fordypning i byggkonstruksjoner ved Universitetet i Stavanger (UiS). Oppgaven ble utført våren 2019 og omhandler dynamiske analyser av Lysefjordbroen.

Å jobbe med denne oppgaven har vært spennende og utfordrende, det har vært en lærerik prosess med en bratt læringskurve, og har endt med en dypere forståelse for hengebroers dynamiske oppførsel.

Jeg vil takke min veileder Prof. Jasna B. Jakobsen for god hjelp og veiledning i løpet av våren gjennom både møter og e-poster. Jeg vil også takke postdoktor Etienne Cheynet for gode råd og hjelp på spørsmål om MATLAB og vinddata som er blitt benyttet i oppgaven.

UiS, Stavanger, 14.06.19

Ragnhild Vatne

# Sammendrag

Denne oppgaven omhandler den dynamiske responsen induisert av vind og trafikk på Lysefjordbroen. Basert på akselerasjonsmålinger er hovedformålet er å se på sammenhengen mellom bevegelsene til brodekket og brotårnet, spesielt sammenhengen mellom brodekkets vertikale bevegelser og brotårnets bevegelser i langsgående retning for brodekket, og hvordan dette endres med vindhastigheten.

Ved hjelp av MATLAB er målingene fra Lysefjordbroen analysert og presentert, det er i hovedsak tatt utgangspunkt i måledata fra en dag i januar 2018 og en lengre måleperiode fra juli 2017 til juni 2018. Her er det sett på akselerasjonsresponsen til brodekket og brotårnet under to tidsserier med et 10 minutters varighet, en tidsserie med trafikk og lite vind og en tidsserie med mye vind. Analysen av bevegelsene til brodekket viser akselerasjoner i lateral og vertikal retning, og torsjon om broens lengdeakse, for brotårnet viser analysen akselerasjoner i retningen langsgående og tversgående med broens lengdeakse, og torsjon om brotårnets vertikale akse. Det er utført analyser av spektraltetthet og korrelasjon av de utvalgte tidsseriene, i tillegg til å se på forskyvningen til brodekket og brotårnet.

Analyser av standardavvik som funksjon av vindhastighet over en lengre tidsperiode er også utført. Her er det sett på brotårnets akselerasjon mot horisontal middelvindhastighet, som i dette tilfellet representerer brodekkets bevegelser.

Sammenhengen mellom bevegelsene til brodekket og brotårnet er analysert ved hjelp av spektraltetthet og korrelasjon mellom brodekkets vertikale respons og brotårnets respons langsgående med brodekket, og standardavviket til akselerasjonen mot middelvindhastighet. Som forventet er brodekkets vertikale bevegelser sterkt korrelert med tårnets bøyning i broplanet, ettersom vibrasjoner av brodekket i den vertikale retningen medfører endringer i kabelkreftene og dermed bøyning av tårnet langs broaksen. Korrelasjonskoeffisienten viste en positiv samvariasjon mellom forskyvningene i både tidsserien med trafikk og lite vind og tidsserien med mye vind. Ut fra analysen om spektraltetthet vises det sammenheng mellom de vertikale bevegelsene til brodekket midt i brospennet med bevegelsene i tårntoppen på de relevante egenfrekvensene.

# Innhold

Forord .....	I
Sammendrag .....	II
Notasjon .....	V
Figurliste.....	VI
Tabelliste .....	IX
1 Introduksjon .....	1
1.1 Problemstilling.....	2
1.2 Oppgavestruktur .....	3
2 Kabelbroer.....	4
2.1 Hengebro .....	5
2.1.1 Forholdet mellom brotårnet og hovedkablene .....	7
3 Vind.....	9
3.1 Middelvind/vindhastighet .....	9
3.1.1 Logaritmisk lov profil .....	10
3.1.2 Power lov profil .....	11
3.2 Statisk vindlast.....	12
3.4 Dynamisk vindlast og aerodynamisk respons .....	13
3.4.1 Virvelinduserte vibrasjoner.....	14
3.4.2 Turbulens .....	15
3.4.3 Buffeting .....	16
3.4.4 Gallopering .....	16
3.4.5 Flutter .....	17
3.5 Spektra.....	18
3.5.1 Nyquist frekvens .....	20
3.5.2 Burgs-metode .....	20
4 Case-studie .....	21
4.1 Lysefjordbroen.....	21
4.2 Vindmålinger .....	22

4.2.1	Anemometre.....	23
4.2.2	Akselerometre .....	23
4.2.3	Forskyvningsmålere .....	23
4.3	Egenfrekvenser .....	24
5	Resultat og diskusjon .....	25
5.1	Vindmålinger på to sider av brodekket.....	25
5.1.1	Vindretning direkte på brodekket .....	26
5.1.2	Vind fra sør .....	27
5.2	Akselerasjoner .....	28
5.2.1	Tidsserie med trafikk og lite vind .....	29
5.2.2	Tidsserie med kraftig vind .....	34
5.3	Spektralitet/akselerasjonsspektre .....	41
5.3.1	Tidsserie med trafikk og lite vind .....	41
5.3.2	Tidsserie med mye vind .....	43
5.4	Forskyvning og spektra .....	45
5.4.1	Tidsserie med trafikk og lite vind .....	45
5.4.2	Tidsserie med mye vind .....	48
5.4.3	Korrelasjon.....	51
5.5	Standardavvik av tårnakselerasjon ved ulike vindhastigheter .....	54
5.6	Standardavvik fra lengre tidsperiode .....	55
5.6.1	Vind fra sørvest.....	56
5.6.2	Vind fra nordøst .....	57
5.6.3	Rotasjon om tårnakser.....	58
6	Konklusjon.....	60
	Referanser.....	61
	Vedlegg:	
	Vedlegg A: Tegninger fra Statens vegvesen over Lysefjordbroen	
	Vedlegg B: MATLAB koder	

## Notasjon

Prikker over symbol (for eksempel  $\dot{r}$ ,  $\ddot{r}$ ) viser til tidsderiverte,  $d/dt$ ,  $d^2/dt^2$ .

$x, y$ og $z$	refererer til korresponderende konstruksjonsaksen.
$u, v$ og $w$	turbulenskomponenter
$U$	horisontal middelvindhastighet i hovedvindretning
$K$	von Kármán konstant
$Re$	Reynolds tall
$St$	Strouhal tall
$S$	responspektrum
$f_N$	Nyquistfrekvens
$\Delta t$	tidssteg
$f_s$	samlingsfrekvens
$\rho_{x,y}$	korrelasjonskoeffisient
$I_u, I_v$ , og $I_w$	turbulensintensitet
$H$	horisontal vindhastighet
$f$	frekvens (Hz)
$\sigma$	standardavvik
$\alpha$	vinkel mellom brokassen og middelvind
$\beta$	vinkel mellom horisontalaksen og middelvind

### Forkortelser

HA1, HA2, HA3	1., 2. og 3. horisontale asymmetriske svingeform
HS1, HS2, HS3	1., 2. og 3. horisontale symmetriske svingeform
VA1, VA2, VA3	1., 2. og 3. vertikale asymmetriske svingeform
VS1, VS2, VS3	1., 2. og 3. vertikale symmetriske svingeform
TA1	1. asymmetriske svingeform
TS1	1. symmetriske svingeform
PSD	Power spektraltetthet

## Figurliste

Figur 1.1 Lysefjordbroen [1] .....	1
Figur 2.1 Verdens lengste hengebro; Akashi Kaikyō i Japan [1].....	4
Figur 2.2 Hengebro med enkelt spenn [5].....	6
Figur 2.3 Basis forbindelse mellom kabel og tårn. [5].....	7
Figur 2.4 Friksjonskrefter som virker på kabel over dekket sadel. [5] .....	7
Figur 2.5 Sadelspor støttet direkte på betong [5]. .....	8
Figur 3.1 Kartesisk koordinatsystem for vind [2] .....	9
Figur 3.2 Middelvindlast på brokasse [3].....	12
Figur 3.3 Dynamisk respons under vindpåkjenning [5].....	13
Figur 3.4 Endring i strømningsmønster, med hensyn til Reynolds tall [3] .....	15
Figur 4.1 Oversikt over Lysefjordbroen, tegning fra Statens vegvesen.....	21
Figur 4.2 Oversikt over Lysefjordbroens plassering i forhold til Nord, modifisert bilde fra [4] .....	22
Figur 4.3 Oversikt over instrumenter plassert på Lysefjordbroen [6].....	24
Figur 5.1 Vindhastighet registrert ved H18W og H18E under vindforhold fra vest.....	26
Figur 5.2 Vindretning gjennom tidsserien.....	26
Figur 5.3 Vindhastighet registrert med anemometer plassert ved H18W og H18E under vindforhold fra sør.....	27
Figur 5.4 Vindretning gjennom valgt tidsserie.....	28
Figur 5.5 Tidsserie for akselerasjon i brodekket i tidsrommet 06.30-06.40 den 24.01.18. De ulike retningene som er vist (fra topp til bunn) er lateral (x), vertikal (z) og torsjonal om langsgående akse( $\theta$ ). Standardavviket er markert med rød linje.....	29
Figur 5.6 Tidsserie for akselerasjon i brotårn i tidsrommet 06.30-06.40 den 24.01.18. De ulike retningene som er vist (fra topp til bunn) er lateral (x), langsgående (y) og torsjonal om vertikal akse( $\theta$ ). Standardavviket er markert med rød linje. ....	30
Figur 5.7 Horisontal vindhastighet og vindretning i tidsrommet 06.30-06.40 den 24.01.18...	31
Figur 5.8 Tidsserie for akselerasjon til brodekket i tidsintervall på 100 sekunder. De ulike retningene som er vist (fra topp til bunn) er lateral (x), vertikal (z) og torsjonal om langsgående akse( $\theta$ ) .....	32
Figur 5.9 Tidsserie for akselerasjon til brotårn under tidsintervall på 100 sekunder. De ulike retningene som er vist (fra topp til bunn) er lateral (x), langsgående (y) og torsjonal om vertikal akse( $\theta$ ).....	33

Figur 5.10 Horisontal vindhastighet og vindretning under tidsintervall på 100 sekunder. ....	33
Figur 5.11 Tidsserie for akselerasjon til brodekket i tidsrommet 19.10-19.20 den 24.01.18. De ulike retningene som er vist (fra topp til bunn) er lateral (x), vertikal (z) og torsjonal om langsgående akse( $\theta$ ). Standardavviket er markert med rød linje.....	34
Figur 5.12 Tidsserie for akselerasjon til brotårnet i tidsrommet 19.10-19.20 den 24.01.18. De ulike retningene som er vist (fra topp til bunn) er lateral (x), langsgående (y) og torsjonal om vertikal akse( $\theta$ ). Standardavviket er markert med rød linje. ....	35
Figur 5.13 Horisontal vindhastighet og vindretning i tidsrommet 19.10-19.20 den 24.01.18.	36
Figur 5.14 Tidsserie for akselerasjon til brodekket under tidsintervall på 100 sekunder. De ulike retningene som er vist (fra topp til bunn) er lateral (x), vertikal (z) og torsjonal om langsgående akse( $\theta$ ) .....	38
Figur 5.15 Tidsserie for akselerasjon til brotårn under tidsserie på 100 sekunder. De ulike retningene som er vist (fra topp til bunn) er lateral (x), langsgående (y) og torsjonal om vertikal akse( $\theta$ ).....	39
Figur 5.16 Horisontal vindhastighet og vindretning under tidsserie på 100 sekunder.....	40
Figur 5.17 Akselerasjonspektra for brodekket fra tidsintervallet 06.30-06.40 den 24.01.18...	41
Figur 5.18 Akselerasjonspektra for brotårnet fra tidsintervallet 06.30-06.40 den 24.01.18. ...	42
Figur 5.19 Akselerasjonspektra for brodekket fra tidsintervallet 19.10-19.20 den 24.01.18...	43
Figur 5.20 Akselerasjonspektra for brotårnet fra tidsintervallet 19.10-19.20 den 24.01.18. ...	44
Figur 5.21 Tidsserie for forskyvning til brodekket i tidsrommet 06.30-06.40 den 24.01.18. De ulike retningene som er vist (fra topp til bunn) er lateral (x), vertikal (z) og torsjonal om langsgående akse( $\theta$ ) .....	45
Figur 5.22 Tidsserie for forskyvning til brotårnet i tidsrommet 06.30-06.40 den 24.01.18. De ulike retningene som er vist (fra topp til bunn) er lateral (x), langsgående(y) og torsjonal om vertikal akse( $\theta$ ).....	46
Figur 5.23 Spektra for forskyvning fra tidsrommet 06.30-06.40 den 24.01.18. Både vertikal og horisontal bevegelse i brodekket, og brotårnets lateral og langsgående retning langs brodekket.....	47
Figur 5.24 Tidsserie for forskyvning til brodekket i tidsrommet 19.10-19.20 den 24.01.18. De ulike retningene som er vist (fra topp til bunn) er lateral (x), vertikal (z) og torsjonal om langsgående akse( $\theta$ ) .....	48
Figur 5.25 Tidsserie for forskyvning til brotårnet i tidsrommet 19.10-19.20 den 24.01.18. De ulike retningene som er vist (fra topp til bunn) er lateral (x), langsgående (y) og torsjonal om vertikal akse( $\theta$ ).....	49



Figur 5.26 Spektra for forskyvning fra tidsrommet 19.10-19.20 den 24.01.18. Både vertikal og horisontal bevegelse i brodekket, og brotårnets lateral og langsgående retning langs brodekket.....	50
Figur 5.27 Sammenligning mellom filtrert og opprinnelig respons for brodekkets vertikale retning og for brotårnets langsgående retning for tidsserien 06.30-06.40 den 24.01.18.....	51
Figur 5.28 Korrelasjon mellom forskyvning til brodekkets vertikale bevegelse og brotårnets langsgående bevegelse under tidsrommet 06.30-06.40 den 24.01.18.....	52
Figur 5.29 Sammenligning mellom filtrert og opprinnelig respons for brodekkets vertikale retning og for brotårnets langsgående retning for tidsserien 19.10-19.20 den 24.01.18.....	53
Figur 5.30 Korrelasjon mellom forskyvning til brodekkets vertikale bevegelse og brotårnets langsgående bevegelse under tidsrommet 19.10-19.20 den 24.01.18.....	53
Figur 5.31 Standardavvik av akselerasjon fra brotårn den 24.01.18. De ulike retningene som er vist (fra topp til bunn) er lateral (x), langsgående (y) og torsjonal om vertikal akse( $\theta$ ) .....	54
Figur 5.32 Standardavvik av akselerasjon som funksjon av middelvindhastighet. Fra tidsperiode juli 2017 til juni 2018 .....	56
Figur 5.33 Standardavvik av akselerasjon som funksjon av middelvindhastighet. Fra tidsperiode juli 2017 til juni 2018 .....	57
Figur 5.34 Standardavvik av akselerasjon. Rotasjon om henholdsvis x, y og z-aksen til brotårnet. Vind fra sørvest.....	58
Figur 5.35 Standardavvik av akselerasjon. Rotasjon om henholdsvis x, y og z-aksen til brotårnet. Vind fra Nordøst.....	59

## **Tabelliste**

Tabell 4.1 Egenfrekvenser for broen [16, s.118].....	24
Tabell 5.1 Standardavvik til akselerasjon fra to valgte tidsserier den 24.01.18.....	37

# 1 Introduksjon

I Norge planlegges og utføres utbygging av vegnettet i forbindelse med Statens Vegvesen sitt pågående prosjekt «Ferjefri E39», som strekker seg fra Kristiansand i sør, til Trondheim i nord. Langs denne vegstrekningen er det syv fjorder som må krysses ved hjelp av ferjer.

Målet er å redusere reisetiden ved å erstatte ferjene med tunneler og broer. Dette er et stort og utfordrende prosjekt da brede og dype fjorder gir store utfordringer til brokonstruksjonen [8].

Det er derfor viktig å ha god informasjon om vind og turbulens som treffer broen og brotårnene, og hvordan broen responderer på påførte vindkrefter.

Det er tatt utgangspunkt i Lysefjordbroen som case-studie, broen er en hengebro som strekker seg over Lysefjorden i Forsand kommune.

I forbindelse med Statens Vegvesen sitt prosjekt, har det siden 2013 vært utført en mengde målinger på Lysefjordbroen, dette for å få en økt forståelse over oppførselen til broer, da spesielt broer som kysser dype, norske fjorder, og hvor den utfordrende topografien i fjordene ofte påvirker vindstrømmen [6].



*Figur 1.1 Lysefjordbroen [1]*

## 1.1 Problemstilling

Vind er ofte den største utfordringen når det kommer til hengebroer med lengre spenn, og er dermed en viktig faktor i brodesign og dimensjonering av hengebroer. Oppgaven går ut på å se på sammenhengen mellom bevegelsene i brotårn og brodekket, og hvordan tårnbevegelser endres med vindhastighet. Oppgaven skal sette fokus om tårnet bøyer seg i retning langs broen, når brodekket svinger opp og ned, ettersom kablene «drar» tårnet med i bevegelsene. Oppgaven bygger videre på Kim Halvard Aronsen sin masteroppgave fra i 2018, hvor han startet å se på samme problemstilling.

Det skal ved hjelp av programvaren MATLAB («Matrix Laboratory») utføres analyser av vinddataene fra broen for å se på hvordan de dynamiske vindlastene påvirker de ulike brokomponentene. Måledataene som skal analyseres er tatt fra akselerometre plassert ved det nordvestre brotårn og i brodekket ved henger H18. Det skal analyseres måledata for 10 minutters intervall for en dag, hvor det blir sett på akselerasjon, forskyvning og spektra, i dette datasettet er det fokusert på to perioder, en med trafikk og lav middelvindhastighet, og en med høy middelvindhastighet. Det er i tillegg tatt for seg måledata for ca. et år, hvor standardavviket til akselerasjonen for tårnbevegelsene mot middelvindhastigheten som treffer brodekket skal analyseres.

I oppgaven er det kun valgt å se på middelvind og akselerasjoner for brodekket som er registrert ved instrumenter plassert ved henger H18, som er midt på broen hvor bevegelsene vil være størst.

## **1.2 Oppgavestruktur**

### **Kapittel 1**

Kort innledning med bakgrunnen for oppgaven og målingene ved Lysefjordbroen. Her blir også problemstillingen presentert, sammen med oppgavebeskrivelse og utførelse.

### **Kapittel 2**

Grunnleggende teori om kabelbroer, her presenteres hengebroer, og kort om de ulike hovedelementer til konstruksjonen.

### **Kapittel 3**

Grunnleggende teori om vind, om statisk og dynamisk vindlast, og oppførselen til broen under påvirkning av vind.

### **Kapittel 4**

Case-studie Lysefjordbroen. Her presenteres informasjon om Lysefjordbroen og om de ulike måleapparatene som er installert på broen.

### **Kapittel 5**

Resultat og diskusjon. Her blir analysene som er blitt utført presentert, sammen med resultatene som blir presentert og diskutert.

### **Kapittel 6**

Konklusjon, oppsummering av resultatene i oppgaven.

## 2 Kabelbroer

Den første permanente kabelbroen ble bygget i 1823 i Genève. Selve prinsippet med å overføre last via kabler hadde lenge vært kjent, men dette ble den første permanente løsningen hvor det ble brukt kabler av sammensatt jern [5]. Siden har kabelbroer blitt mye brukt der hvor det kreves lange spenn, og dekker nå strekk opp mot 2000 m. Lengste hengebro per dags dato er Akashi Kaikyō broen i Japan med et spenn på 1991 m [9].



*Figur 2.1 Verdens lengste hengebro; Akashi Kaikyō i Japan [1]*

Kabelbroer krever relativt sett begrenset materialbruk, utfordring er at de er fleksible og har lav demping, som fører til mye svingninger.

Med hensyn til broens funksjon er brodekket hovedkomponenten i konstruksjonen, det er den som direkte bærer ekstern last som blir påført broen. Kabelsystemet blir brukt til å støtte brokassen og overføre lasten fra brokassen til tårnene og videre til fundamentene [3].

Bevegelsesindusert vindbelastning er et viktig tema i kabelbroer. Broens vibrasjonsfrekvenser og evnen til å absorbere energi, dvs. dempningsegenskapene, endres med vindhastighet.

Når brospennet øker, blir vinden en mer kritisk faktor i brodesignet, og for de lengste kabelbroene, er omfattende vindstudier nødvendig, disse blir ofte utført vha. vindtunnel.

Blir broen utsatt for lav vindhastighet, og da relativt lav turbulensstrømning, kan dette i mange tilfeller føre til vibrasjoner av brodekke pga. virvelavløsning [7].

Man skiller mellom to typer kabelbroer, skråstagbroer og hengebroer. Lysefjordbroen går under kategorien hengebroer, det er denne typer broer det er valgt å legge vekt på videre i oppgaven.

## 2.1 Hengebro

Hengebro er en type kabelbro hvor brodekke henger under hovedkablene på hengere som bærer vekten av brodekket, og overfører lasten til hovedkablene. På toppen av hvert av tårnene er det satt opp sadel som en kobling mellom tårnene og hovedkablene, disse sadlene støtter kablene når de krysser tårnene og hjelper kablene med å bevege seg over brotårnet. Hovedkablene går videre over tårnet og ned ankerfestene hvor kablene blir spredt. De blir deretter festet i fast grunn, dette for å fordele kreftene best mulig. I hengebroer forankres kablene til enten fjell eller i ankerblokker. I en tradisjonell hengebro er hovedkablene støttet i fire punkter; i de to ankerblokkene i hver ende og på toppen av tårnene. I ankerfestene er kablene støttet både i horisontal og vertikal retning, mens på toppen av brotårnene er kablene mobile i horisontal retning [5].

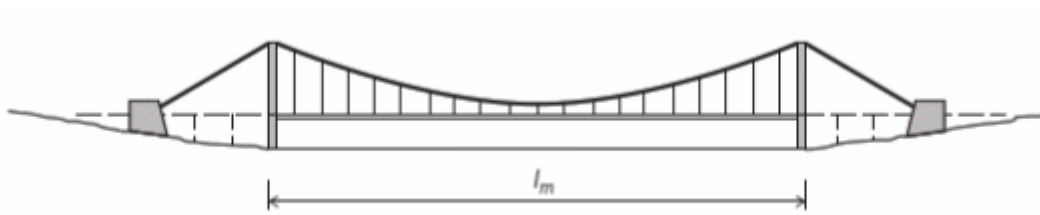
I Norge forankrer vi som regel i fjell. Her er det viktig med god grunnanalyse da all last på broen blir overført gjennom hovedkablene til festene.

Hengebroens hovedelementer er:

- Brokassen
- Hovedkabler
- Ankerfester
- Tårn

Brokassen er den komponenten i broen som er utsatt for mest ytre belastninger, her vil all trafikklast påvirke, i tillegg til egenvekt og vind. Brokassen fungerer som avstivning, slik at trafikken på broen kan foregå på fastest mulig underlag. Utformingen til brokassen påvirker ikke bare egenvekten, men også hvordan broen reagerer på vindkreftene fra siden. Utforming av brokassen er dermed viktig med tanke på aerodynamisk stabilitet [5].

Figur 2.2 viser en hengebro hvor kun hovedspennet er støttet av kabelsystemet, men hovedkabelen fortsetter fritt fra tårntoppen og ned til ankerfestet. Brodekket mellom brotårnene er støttet opp via hengere til hovedkablene, og brodekket utenfor tårnene virker uavhengig av kabelsystemet. Dette illustrerer oppbygningen til Lysefjordbroen.



Figur 2.2 Hengebro med enkelt spenn [5]

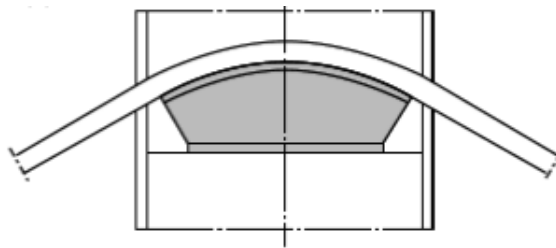
Den viktigste oppgaven til brotårnene er å overføre reaksjonskreftene fra kabelsystemet til fundamentet, det er viktig at de vertikale kreftene overføres til aksiale krefter på brotårnet. I prinsippet er tårnkonstruksjoner søyler, men i motsetning til frittstående tårn/søyler hvor momenter fra horisontal last (drag last) fra vind dominerer, vil brotårnene også være påvirket av aksial-kraften som kommer fra kablene. Her er det de lasten fra de vertikale komponentene i kabelsystemet som overføres til brotårnene. Tårnene tar som sagt mye av de vertikale kreftene som overføres fra brokassen, via hovedkablene.

I hengebroer med langt spenn bygges ofte tårnbeinene med en gjennomsnittlig bredde i langsgående retning på et forhold mellom  $1/20 - 1/25$  av tårnets høyde. I mange tilfeller er tårnbeinene smalere ved toppen enn bunn på grunn av moment som kan oppstå i bunnen av brotårnet. Brotårnene i Norge konstrueres ofte i betong, da de blir utsatt for store trykkrefter, men stål kan også brukes. Det er mange faktorer som påvirker valget av materiale, som for eksempel grunnforhold, stabilitet i byggefasen og pris [5].



### 2.1.1 Forholdet mellom brotårnet og hovedkablene

Kablene i en hengebro bærer kun strekk krefter, den største delen av lasten kommer av vekten fra brodekket og vekten av kjøretøy som krysser broen, til sammenligning er egenvekten til kablene ubetydelige. Hovedkablene som man kan se fra figur 2.2 går kontinuerlige over brotårnets topp. Koblingen mellom kablene og tårnet går enten gjennom sadler eller ankring av kabler til tårnet. Forbindelsen som er mest foretrukket på alle store hengebroer er kabler som er kontinuerlig krummet over en sadel som er festet i tårnet [5]. I praksis glir de som nevnt tidligere i sadler på toppen av brotårnet.



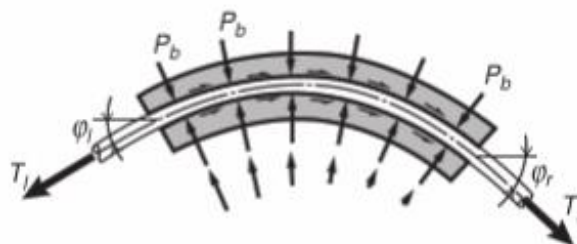
Figur 2.3 Basis forbindelse mellom kabel og tårn. [5]

I tilfeller hvor kabler passerer kontinuerlig over sadler på tårn er det to hovedegenskaper som må vurderes med hensyn til design; radius til sadel og overføring av kabelkreftene  $T_l - T_r$ . Radius til sadelen kan finnes med hensyn til tillatt trykk per side for hver stålpart i kabelen. Trykket må være begrenset for å unngå reduksjon i kabelen sin aksiale styrke, spesielt med tanke på utmatting.

For en kabel som passerer en sadel uten dekke, kan maksimal kraft, maks  $T_l$  i venstre kabel kan finnes ved hjelp av Eytelwein's formel [5]:

$$\text{maks } T_l = T_r \exp[\mu(\varphi_l + \varphi_r)] \quad 2.1$$

Hvor  $\mu$  er friksjonskoeffisient og  $\varphi_l$  og  $\varphi_r$  er vinkel mellom kabelaksene.



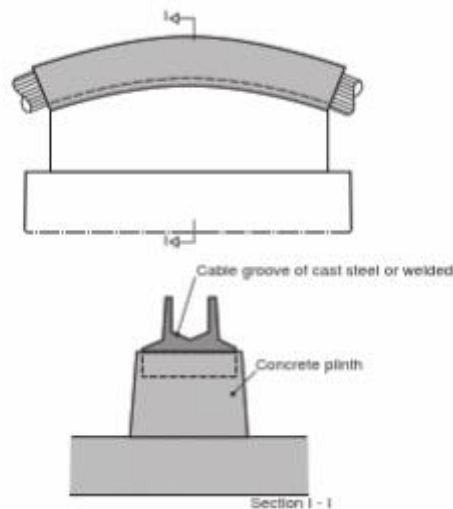
Figur 2.4 Friksjonskrefter som virker på kabel over dekket sadel. [5]

På de fleste europeiske hengebroer er kabelen i sadelsporet beskyttet av et deksel som er boltet fast på toppen av sadelen, se figur 2.4. For å finne maks kraft  $T_1$  i tilfellet hvor dekke er presset med  $m$  forspente bolter mot kabelen, kan Eytelwein's formel skrives om til [5]:

$$\text{maks } T_1 \approx [1 + \mu(\varphi_l + \varphi_r)]T_r + 2\mu m P_b \quad 2.2$$

$m$  er antall bolter og  $P_b$  er aksialspenning i hver bolt.

Sadelen til kabelen i hengebroer ble i mange år laget i en stor stålform, men de senere år har betong har blitt et mer foretrukket materiale for brotårnet, og det materiale som er mest brukt i Norge, dermed er det blitt mer naturlig at den tunge stålkonstruksjonen byttes ut, og sadelsporet støpes inn i en betongsokkel som vist i figur 2.5 [5].



Figur 2.5 Sadelspor støttet direkte på betong [5].

### 3 Vind

Vind er luft i bevegelse i forhold til jorden. Årsaken til vind er trykkforskjeller i atmosfæren, som skapes av ulik soloppvarming mot jordens overflate. Dette skaper temperaturforskjeller som skaper høytrykk og lavtrykk. For å utjevne trykkforskjellene sirkulerer luften fra områder med høyt trykk til områder med lavt trykk [7].

Vindhastigheten varierer stadig, og kan derfor sette broen i svingninger. Man registrerer vindhastighet over en periode hvor vinden holder seg relativt «stabil», typisk over 10 minutter og opptil en time. Dette er passelig varighet for å gi grunnlag for statistisk analyse av de viktigste brosvingningene med perioder på noen få sekunder. Middelveien av disse målingene kaller man for middelvind.

#### 3.1 Middelvind/vindhastighet

Middelvindhastigheten  $U(z)$  avhenger kun av høyde  $z$  over bakken. For brodekket som stort sett følger en gitt høyde over bakken er det da viktig med riktig estimat av middelvindhastighet i den høyden, i det gitte terrenget kan dette være svært komplekst.

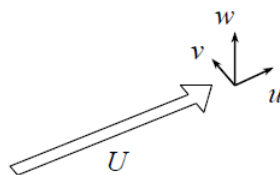
Vindhastighet blir beskrevet av middelvindhastighet  $U(z)$  og av turbulenskomponentene  $u$ ,  $v$  og  $w$ . For en matematisk beskrivelse bruker man kartesisk koordinatsystem, hvor man tenker at  $x$ -aksen er langs vindretningen,  $y$ -aksen går horisontalt (lateralt) og  $z$ -aksen går vertikalt, med positiv retning oppover.

Hastigheten til en gitt tid « $t$ » er [10]:

$$i \text{ langsgående retning} \quad U(z) + u(x, y, z, t) \quad 3.1$$

$$i \text{ lateral retning} \quad v(x, y, z, t) \quad 3.2$$

$$i \text{ vertikal retning} \quad w(x, y, z, t) \quad 3.3$$



Figur 3.1 Kartesisk koordinatsystem for vind [2]

Vind vil typisk forårsake en del bevegelser av kabelbroer, da vind regnes som en av de mest dominerende lastene på en bro, her skiller man mellom statisk og dynamisk vindlast.

For å få en bro til å vibrere trengs det flere faktorer, de mest sentrale er lav demping på konstruksjonen, en vindstrøm med turbulensintensitet, fra hvilken vinkelen vinden treffer broen, både vinkelen på dybden og vinkelen på langs, og en høy nok vindhastighet til å ha nok energi for å danne bevegelse på broen [5].

Den totale vindlasten på et brodekke  $F_{tot}$ , uttrykkes som en av flere ledd: middelvindlasten  $F_q$ , den varierende vindbelastningen pga. turbulens (buffeting)  $F_t$ , og bevegelsesindusert vindlast  $F_m$  [10].

$$F_{tot} = F_q + F_t + F_m \quad 3.4$$

### 3.1.1 Logaritmisk lov profil

Under forhold med sterk vind, og i en høyde opp til ca. 200 meter over bakken, blir den logaritmiske profilen den mest representative modellen for å beregne middelvind i ulike høyder. Modellen tar utgangspunkt i analysen av grensesjiktet over en flat plate. Her trenger man variabler som høyde over bakken ( $z$ ), ruhetslengden ( $z_0$ ) som er et mål over overflatens ruhet og von Kármán konstant ( $\kappa$ ) som er omtrent 0.4 [10].

$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad 3.5$$

$u_*$  er en friksjonskoeffisient som er definert som

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad 3.6$$

Hvor  $\tau_0$  er skjærspenning ved overflaten og  $\rho$  er luftdensitet.

### 3.1.2 Power lov profil

Power lov profil er et alternativ til logaritmisk lov profil, og er en empirisk beskrivelse av middelvind.

$$\bar{U}(z) = U(z_{ref}) \left( \frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha \quad 3.7$$

$Z_{ref}$  er en referansehøyde (som regel 10 m)

$\alpha$  endrer seg med høyde og terreng, og kan finnes i tabell i Eurocode 1 [11], eller den kan regnes ut ved hjelp av denne formelen [7]:

$$\alpha = \left( \frac{1}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)} \right) \quad 3.8$$

### 3.2 Statisk vindlast

Ved statisk vindlast tar man utgangspunkt i middelvindhastighet. Å finne de korrekte vindlastene kan være utfordrende da de avhenger ulike variabler som konstruksjonene utforming og vindstrømmens egenskaper. Det blir derfor ofte utført vindtunnel tester for å finne trykk- eller kraftkoeffisienter, som videre blir brukt på større prototyper. For brodekket medfører vindtrykket rundt konstruksjonen tre ulike spennings resultater: drag, løft og moment. Som vist på Figur 3.2 ser man hvordan kreftene virker; dragkraften virker i vindretning. Løft virker vinkelrett på vindretningen (opp eller ned), og moment virker rundt brokassens langsgående akse, hvor alle er avhengig av angrepsvinkelen  $\alpha$ . Likningene til vindkreftene som virker på brodekket blir som følger [3]:

$$\text{Drag, kraft per lengderetning;} \quad F_D = \frac{1}{2} \rho U^2 H C_D(\alpha) \quad 3.9$$

$$\text{Løft, kraft per lengde enhet;} \quad F_L = \frac{1}{2} \rho U^2 B C_L(\alpha) \quad 3.10$$

$$\text{Moment, per lengde enhet;} \quad M = \frac{1}{2} \rho U^2 B^2 C_M(\alpha) \quad 3.11$$

Hvor:

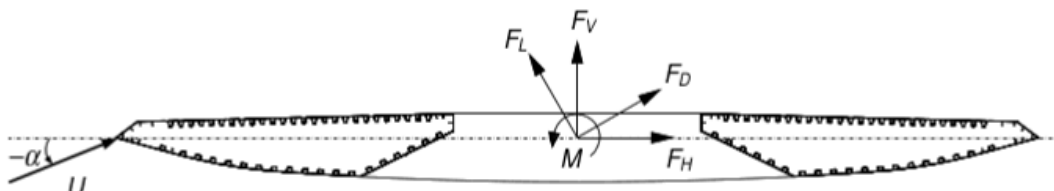
$\rho$ : lufttettheten

$U$ : middelvindhastighet

$H$ : høyden på brokassen

$B$ : bredden på brokassen

$C_D(\alpha)$ ,  $C_L(\alpha)$  og  $C_M(\alpha)$  er dimensjonsløse drag-, løft- og momentkoeffisienter.



Figur 3.2 Middelvindlast på brokasse [3]

### 3.4 Dynamisk vindlast og aerodynamisk respons

I tillegg til belastningen fra middelvind og statisk vindlast finnes det flere mekanismer i ulike vindhastighetsintervaller som kan føre til dynamisk respons og aerodynamisk ustabilitet.

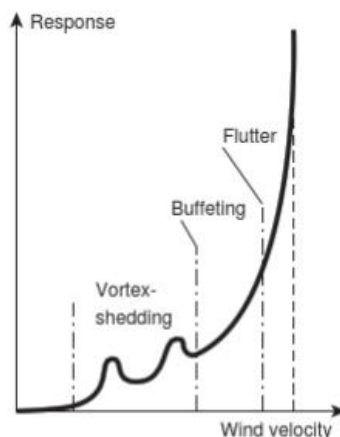
Vind-induserte vibrasjoner er en viktig årsak til belastning på brokonstruksjoner, hvor det kan føre til utmattelseskader og i verste fall kollaps [3].

Dynamisk vindlast kommer av virvler, turbulens og bevegelser av broen. Dynamisk vindlast skyldes med andre ord den naturlige tid- og stedsvarierende vinden, samt varierende vindtrykk pga. interaksjonen mellom vind og konstruksjonen, dette pga. virvelavløsning og svingninger.

For fleksible og vindsensitive konstruksjoner, kan bevegelsen til konstruksjonen i seg selv generere aerodynamiske krefter. I ekstreme tilfeller kan denne kraften føre til aerodynamisk ustabilitet. Dersom konstruksjonen er i en ustabil situasjon, kan små forstyrrelser føre til økt amplitude på vibrasjonen til for eksempel brodekke. Aeroelastisk oppførsel er et samspill mellom aerodynamiske krefter og konstruksjonens bevegelser. Eksempler på denne aeroelastisk adferd er gallopering, flutter og virvelindusert vibrasjoner [7].

Aerodynamisk respons kan deles i to ulike deler:

- Kvasistatisk respons blir også kalt bakgrunns respons da dette er respons som oppstår pga. «bakgrunns turbulens», noe som vil si turbulens med lav frekvens. Dette er noe som ikke forårsaker dynamisk forsterkning.
- Resonant respons er respons på grunn av turbulens med den frekvens nær konstruksjonenes egenfrekvens, noe som kan føre til betydelig dynamisk forsterkning.



Figur 3.3 Dynamisk respons under vindpåkjenning [5]

### 3.4.1 Virvelinduserte vibrasjoner

Når vinden treffer et hinder, som for eksempel en brokasse, blir vinden separert og det vil oppstå virvler vekselvis på over- og underflaten av konstruksjonen. Kastefrekvensen er direkte proporsjonal med middelvindhastigheten, omvendt proporsjonal med diameter  $D$  og avhenger av tverrsnittets formen gjennom konstanten som kalles Strouhal tall ( $S_t$ ) [3].

$$f_s = \frac{S_t U}{D} \quad 3.12$$

Den kritiske virvelkasthastigheten er dermed definert som [5]:

$$U_{cr} = \frac{f_s D}{S_t} \quad 3.13$$

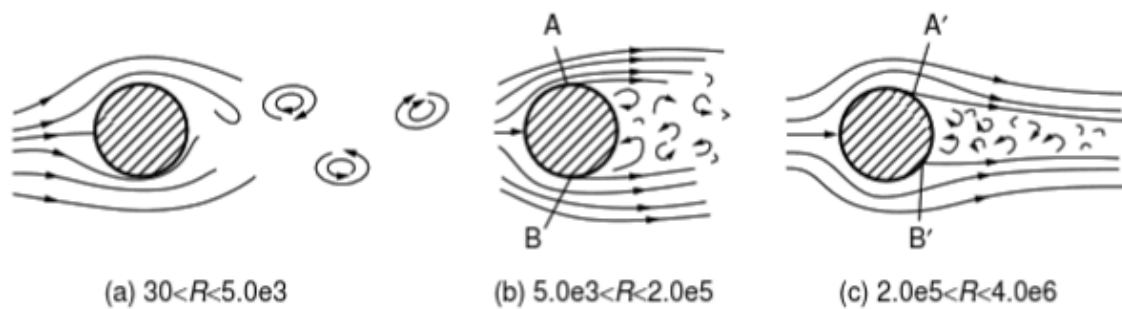
Den kritiske hastigheten beskriver ved hvilken vindhastighet virvelkastene vil ha samme frekvens som konstruksjonene egenfrekvens, her vil det dannes svingninger i broen og et samspill mellom virvelkastene og broen oppstår; resonant respons [5]. Resonans kan oppstå i alle naturlige frekvenser til konstruksjonen, når dette fenomenet oppstår kan vibrasjonene bli tilstrekkelig store slik at konstruksjonens vibrasjoner kan kontrollere frekvensen til de virvelinduserte vibrasjonene. Dette er et fenomen som kalles «Lock-in» og oppstår på kabelbroer med langt spenn når kastefrekvensen fra vinden nærmer seg den naturlige frekvensen til brodekket eller kablene. Dette fører til store vibrasjoner, som igjen fører til utmatting av brokomponenter [3].

Dette gjelder brokasser med skarpe kanter, da vil ikke Reynolds tall ha betydning. Det vil den derimot ha på brokasser med mer avrundet kant. Reynolds tall er et dimensjonsløst tall som gjelder forholdet mellom treghets- og viskøskrefter i strømming, som her beskriver om vindstrømmen er stabil eller turbulent [3]. Dersom Reynolds tall er mindre enn  $5 \cdot 10^5$  er det fare for virvelinduserte vibrasjoner.

$$Re = \frac{UD}{\nu} \quad 3.14$$

Hvor  $U$  er middelvindhastighet,  $D$  er konstruksjonens diameter og  $\nu$  er luftens kinematiske viskositet.





Figur 3.4 Endring i strømningsmønster, med hensyn til Reynolds tall [3]

Virvelinduserte svingninger er som regel ikke stor fare, men bør unngås for å sikre normal bruk og unngå utmattingskade.

### 3.4.2 Turbulens

I det atmosfæriske grenselaget er vinden alltid turbulent, som vil si at vindstrømmen er uregelmessig og kaotisk, med tilfeldige perioder som varierer fra brøkdeler av et sekund til flere minutter.

Når man snakker om turbulens er det to ulike opphav vi er opptatt av; turbulens fra naturlige vind som påvirker konstruksjonen og av turbulens som blir fremprovosert i vinden av konstruksjonens egne bevegelser [12].

Vi har tre turbulenskomponenter  $u$ ,  $v$  og  $w$ , som blir beskrevet ved hjelp av deres standardavvik, tidsskalaer og integralskalaer.

Ved å anta homogent terreng, vil vinden være horisontal homogen, som betyr at gjennomsnittlige egenskaper ikke endres i horisontalplanet. Standardavvik  $\sigma_u$ ,  $\sigma_v$  og  $\sigma_w$  for turbulenskomponentene er derfor kun avhengige av høyden,  $z$ . [10]

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (U(t) - \bar{U})^2 dt} \quad 3.15$$

Hvor  $U(t)$  er lik  $\bar{U} + u(t)$ , kan og skrives:

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u(t)^2 dt} \quad 3.16$$

Tilsvarende likning gjelder for de andre turbulenskomponentene  $v(t)$  og  $w(t)$  [7].

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v(t)^2 dt} \quad 3.17$$

$$\sigma_w = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T w(t)^2 dt} \quad 3.18$$

Turbulensintensitet beskriver gjennomsnittlig variasjon i vindhastighet, relativ til middelvindhastigheten. Dette er den enkleste beskrivelsen for turbulens som gir en enkel indikasjon på hvor store spenningsvariasjoner, relativt til de som skyldes middelvindlast en kan vente seg i konstruksjonen. Den blir definert som forholdet mellom standardavviket for hver turbulenskomponent og middelvindhastighet:

$$I_u(z) = \frac{\sigma_u(z)}{U(z)} \quad 3.19$$

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v(z)}{U(z)} \quad 3.20$$

$$I_w(z) = \frac{\sigma_w(z)}{U(z)} \quad 3.21$$

### 3.4.3 Buffeting

I kombinasjon med konstruksjonens egne bevegelser og flukterende krefter forårsaket av turbulens oppstår buffetingrespons, dette over et bredt spekter av vindhastighet, og øker normalt med økt vindhastighet. Vinkelen vinden treffer broen på vil også ha medvirkning på responsen som oppstår.

Disse vibrasjonene er som regel ikke katastrofale, men kan over lengre tid føre til utmattingsproblemer på komponenter i broen og inngår derfor i dimensjonering i bruddgrensetilstand [5].

### 3.4.4 Gallopering

Gallopering er en form for aerodynamisk ustabilitet, som kan oppstå for lange konstruksjoner med et visst tverrsnitt. Det er svingninger med stor amplitude normalt til vindretningen, og skjer når brodekke «absorberer» energi fra vindstrømmen og vibrasjonene øker.

Vindhastigheten som trengs for å forårsake gallopering øker med demping og massen til konstruksjonen. Det er mer sannsynlig at gallopering oppstår i stålkonstruksjoner enn i

konstruksjoner av betong. For at gallopering skal oppstå må den totale effektive dempingen bli redusert til 0, ved at den aerodynamiske dempingen blir i størrelsen lik konstruksjonsdempningen. Faren for gallopering er gitt ved såkalt «Den Hartog-kriteriet» [10].

$$\left(\frac{dC_L}{d\alpha} + C_D\right)\Big|_{\alpha=0} < 0 \quad 3.22$$

Gallopering oppstår ved en kombinasjon mellom de aerodynamiske kreftene som virker på brodekke, og brodekkets bevegelser. Den effektive angrepsvinkelen til en jevn vindstrøm vil endre seg når den passerer en konstruksjon som svinger, selv om vindstrømmen har en fast retning. Disse endringene i angrepsvinkelen kan resultere i endring av den aerodynamiske adferden på broen. Dette skjer brått, og kan forårsake kollaps av broen [3].

Fra Statens vegvesen sin håndbok N400 kan man finne den kritiske vindhastigheten til gallopering ved hjelp av denne ligningen [13]:

$$U_{crit} = \frac{8\pi n_z m_z \xi_z}{\rho b} * \frac{1}{-[C'_L(\alpha) + \frac{h}{b} C_D(\alpha)]} \quad 3.23$$

Hvor:

b er referansebredde for koeffisientene  $C_L(\alpha)$  og  $C_M(\alpha)$

h er referansehøyde

$n_z$  er laveste egenfrekvens, med hensyn til egensvingninger på tvers av hovedstrømretningen

$m_z$  er jevnt fordelt translasjonsmasse

$\xi_z$  er dempningsforholdet for tilhørende egensvingeform

$\rho$  er luftdensitet

### 3.4.5 Flutter

Flutter er en aerodynamiske ustabilitet som involverer rotasjon, dette er et fenomen som oppstår i fleksible og flate konstruksjoner, som for eksempel i brodekket ved hengebroer. Når vindhastigheten øker, og energien fra aerodynamiske kreftene pga. sterk vind er større enn energien som forsvinner av konstruksjonens demping, vil amplituden til vibrasjonene på

brodekke øke. Den økte vibrasjonen vil forsterke de aerodynamiske kreftene, og vibrasjonene til brodekke kan bygge seg opp til broen til slutt kollapser [3].

Flutter kan normalt deles inn i to typer:

- Klassisk flutter, som er en koblet, kombinert vertikal- og torsjonsinstabilitet
- Torsjonsflutter, som er ren torsjonssvingning

Torsjonsflutter kommer av ugunstige bevegelsesinduserte vridningskrefter, mens klassisk flutter er forårsaket av bevegelsesinduserte krefter på tvers av vindretningen i en kombinasjon med vridning [13].

Ut i fra Selbergs formel gitt i Håndbok N400 av Statens vegvesen regnes den kritiske vindhastigheten for klassisk flutter [13]:

$$U_{crit} = 3,7bn_{\theta}\sqrt{\frac{m_z r}{\rho b^3}\left[1 - \left(\frac{n_z}{n_{\theta}}\right)^2\right]} \quad 3.24$$

Hvor:

r = treghetsradien til tverrsnittet

$n_{\theta}$  er laveste egenfrekvens for torsjonssvingning

### 3.5 Spektra

Turbulent vind kan matematisk beskrives som en sum av harmoniske komponenter med ulik amplitude og frekvens. Spektraltetthet beskriver fordelingen av turbulens som en funksjon av frekvens, og hvilke frekvensområder som dominerer. Integrert over alle frekvenser blir variansen [7]:

$$\sigma_u^2 = \int_0^{\infty} S_u(n)dn \quad 3.25$$

Hvor  $S_u(n)$  er spektraltetthet funksjonen for  $u(t)$ .

I 1948 utviklet von Karman en formel for utregning av  $S_u(n)$ , videre i 1968 tilpasset Harris den for vind og er nå den mest vanlige og matematisk riktige formelen som blir brukt, den kan skrives i mange former, men den mest vanlige er [7]:

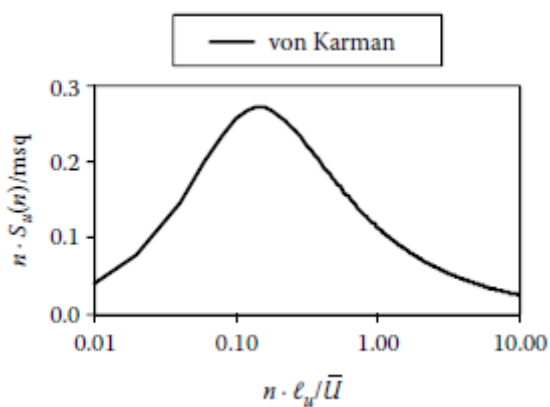
$$\frac{n \cdot S_u(n)}{\sigma_u^2} = \frac{4 \left( \frac{n l_u}{U} \right)}{\left[ 1 + 70.8 \left( \frac{n l_u}{U} \right)^2 \right]^{5/6}} \quad 3.26$$

Hvor  $l_u$  er turbulens lengdeskala som varierer med terrengruhet og høyde over bakken. Kurven til den dimensjonsløse vindspektrum har et toppunkt, og verdien av  $l_u$  defineres av  $n/U$  hvor toppen oppstår.  $\lambda$  som er toppunktet til grafen og blir definert langs den vertikale aksene, er kjent som den maksimale bølgelengden og for von Karman-Harris spektra er  $\lambda$  lik  $6.85 l_u$ . For spektra av vertikal turbulens ( $w'$ ) er det også utarbeidet en matematisk formel av Busch og Panofsky (1968), denne er aktuell for hengebroer med langt spenn, da vindspektrum for vertikal turbulens er viktigst [7].

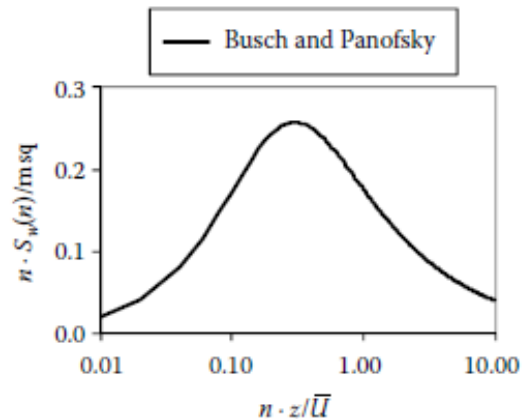
$$\frac{n \cdot S_w(n)}{\sigma_w^2} = \frac{2.15 \left( \frac{n z}{U} \right)}{\left[ 1 + 11.16 \left( \frac{n z}{U} \right)^{5/3} \right]} \quad 3.27$$

Hvor  $S_w(n)$  er den vertikale turbulens vindspektrum.

Turbulenslengeskalaen er i dette tilfellet direkte proporsjonal med høyden over bakken,  $z$ . Figur 3.5 og 3.6 viser spektrum med hensyn til den horisontale og den vertikale vindhastighetskomponenten.



Figur 3.5 Normalisert spektrum av langsgående hastighetskomponent [7]



Figur 3.6 Normalisert spektrum av vertikal hastighetskomponent [7]

### 3.5.1 Nyquist frekvens

Nyquistfrekvensen er den høyeste frekvensen en kan «fange opp» i en tidsserie med avlastingsfrekvens på fs. Nyquistfrekvensen er:

$$f_N = \frac{1}{2 \cdot \Delta t} \quad 3.28$$

$\Delta t$  står for tidssteg, og er 1 over samplingsfrekvensen;  $1/f_s$ . Samplingsfrekvensen viser hvor mange målinger som registreres per sekund [14].

I tilfellet med Lysefjordbroen er samplingsfrekvensen 25 Hz, dvs.  $\Delta t$  er  $1/25 = 0.04$ s og Nyquist frekvens er 12.5 Hz.

### 3.5.2 Burgs-metode

Power spektraltetthet (PSD) er et statiske mål på fordelingen av kraften til et signal eller tidsserie over en frekvens.

Burgs metode for utregning av spektraltetthet baserer seg på en auto-regressive modell (AR), og er en allsidig modell for estimering av Power spektraltetthet på grunn av sin gode utnyttelse i å karakterisere spektral av tidsserier, og er dermed brukt i flere felt.

Burg metode er veltilpasset for lav-order modeller og tidsserier over korte intervall.

Dersom en diskre tilfeldig prosess  $x(n)$  tilfredsstiller følgende lineær ligning [15]:

$$x(n) = -\sum_{k=1}^p a_k \cdot x(n-k) + u(n) \quad 3.29$$

hvor:

$x(n)$  er observerte ut-verdier

$u(n)$  er uobserverte inn-verdier

$p$  er systemets grad

$a_k$  er tilhørende koeffisient

kan PSD av serie  $x(n)$  estimeres med følgende ligning [15]:

$$P_x(\omega) = \frac{\sigma_x^2}{|1 + \sum_{k=1}^p a_k e^{-j\omega k}|^2} \quad 3.30$$

hvor  $\sigma_x^2$  er den minste-kvadrat feilen av grad  $p$ .

## 4 Case-studie; Lysefjordbroen

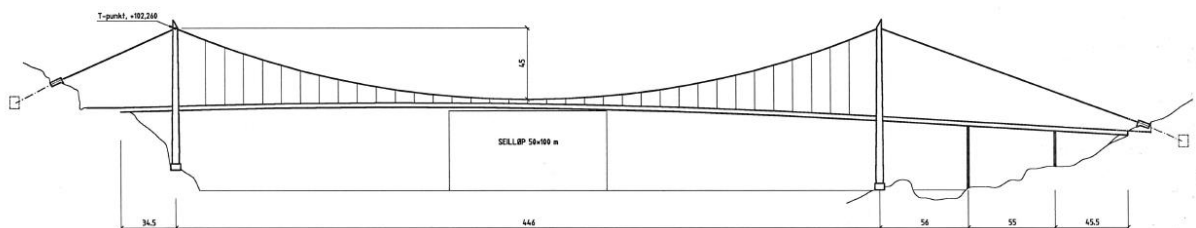
Lysefjordbroen i Forsand kommune er valgt som case-studie, ved denne broen har det siden 2013 blitt utført vindmålinger for å øke forståelsen på responsen til broer som krysser fjorder med utfordrende topografi. Det er i hovedsak tatt utgangspunkt i måledata fra en dag i januar 2018 og en lengre måleperiode fra juli 2017 til juni 2018. For analysering av resultater og målinger utført gjennom denne oppgaven er det hentet bakgrunnsdata fra tidligere utførte masteroppgave av K.H. Aronsen og R. Steigen om Lysefjordbroen.

### 4.1 Lysefjordbroen

Lysefjordbroen er en ett-spenns hengebro som ble åpnet i 1997, den er 639 m lang, og knyttet Oanes og Forsand sammen. Den ligger i Forsand kommune og krysser Lysefjorden.

Hovedspennet er 446 m, med to sidespenn på 34.5 og 156.5 m.

Selve brodekket ligger ca. 55 m over havet, og tillater dermed ferjer og båter fri passasje inn og ut fra Lysefjorden.



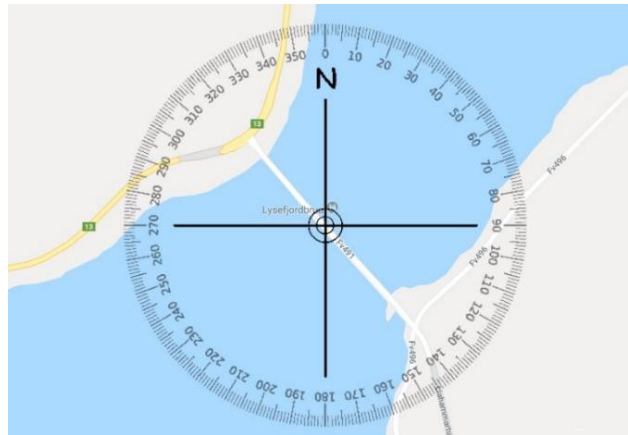
Figur 4.1 Oversikt over Lysefjordbroen, tegning fra Statens vegvesen

Broen består av to tårn som er 102 m høye og er konstruert i armert betong. Hvert tårn består av to hule, firkantede søyler som er forbundet sammen ved hjelp av to tverrbjelker, hvor brodekket hviler på en tverrbjelke, og en tverrbjelke er plassert nærmere toppen.

Brokassen er i stål, sveist sammen av mange seksjoner. Den er utformet med hensyn til aerodynamisk stabilitet og har et strømlinjeformet tverrsnitt [5]. Sidespennene, som også kalles viadukter er konstruert i betong, disse går fra fastland til tårnene på hver side, og blir støttet opp med søyler langs spennet.

Hovedkablene strekker seg fra ankerfeste ved en side av broen, over tårnene, til ankerfeste ved andre siden av broen. Ved tårnene er det plassert en sadel hvor kablene passerer over, sadlene overfører lasten fra kablene og ned aksialt i tårnene. Hovedkablene bærer sammen med de vertikale hengekablene brokassen. Kablene er i stål, noe som gjør dem sterke under

trafikklast, men på grunn av stålets høye elastisitet er den ikke like egnet når det kommer til vindlast, hvor de vil oppføre seg mer fleksibelt. Se vedlegg A for detaljer og tegninger over broen.



Figur 4.2 Oversikt over Lysefjordbroens plassering i forhold til Nord, modifisert bilde fra [4]

Broen er orientert fra nordvest til sørøst. Vindens retning er som standard orientert fra nord, slik at broens orientering er ca. -40 grader eller 320 grader fra nord, se figur 4.2. Fra østside er broen utsatt for vind fra enten fjordinnløpet, fra sørvest eller fra nordøst, da ofte som «fallvind» over fjellene [16]. Vind fra nordøst faller enten fra fjellene i nærheten eller følger fjorden over lengre strekninger. Vestsiden av broen er utsatt for vind som er noe «friere» og kommer hovedsakelig over havet flere kilometer oppstrøms fra broen, fra sørvest.

## 4.2 Vindmålinger

Det har blitt utført målinger av vindhastighet på Lysefjordbroen siden 2013, hensikten med dette er blant annet å øke forståelsen av oppførselen til hengebroer som krysser dype og ofte brede norske fjorder, og øke forståelsen og modelleringen av vindlaster og vindindusert respons på broer med langt spenn. Dette kan bidra til å legge til rette for en mer sikker og økonomisk brodesign. Figur 4.3 viser hvor på broen de ulike måleinstrumentene er plassert. Analysene er relevante for prosjektet «Ferjefri E39», og er støttet av Universitetet i Stavanger og Statens vegvesen. Målingene er også utført i samarbeid med norsk senter for offshore vindenergi (NORCOWE). All måledata overføres kontinuerlig via mobilnett til en server ved UiS [6].



### **4.2.1 Anemometre**

På broen er det satt opp 8 anemometre av typen «3D Windmaster Pro fra Gill Instrument Ltd». Dette er ultralyd baserte målere som registrerer vindhastighet fra 0-50 m/s. Det er tre par med sensorer, hvor hastigheten i tre retninger blir målt, instrumentet tolker om disse målingene til tre retninger i et kartesisk koordinatsystem. To horisontale og en vertikal, u, v og w vektor [17].

De er plassert enten direkte på de vertikale hengerne, eller plassert på toppen av en 2,5 m lang stålstang som er festet på hovedkablene. Alle er plassert ca. 6 m over brodekket, utenom i seksjon H-08, hvor to anemometre er plassert både på 6 m og 10 m over brodekket.

Avstanden mellom målerne er mellom 24 m og 168 m.

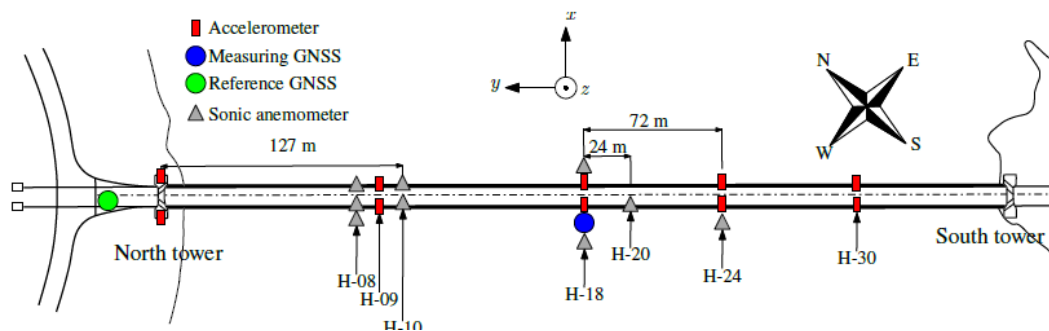
På vestsiden av brodekke er det også plassert en værstasjon ved henger H-10, som måler vindretning, vindhastighet, temperatur, luftfuktighet og atmosfærisk trykkutfelling, denne kan registrere data med en registreringsfrekvens på 4 Hz [6].

### **4.2.2 Akselerometre**

På broen er det montert totalt ti akselerometre, disse av typen treaksial MEMs (micro-electromechanical systems) silisium akselerometer fra Canterbury Seismic Instruments Ltd. To er plassert på toppen av nordvestre tårn, en på toppen av hvert tårnbein hvor kabelsadelen er plassert. De resterende åtte er installert på innsiden av brodekke. De er plassert som fire par, i fire seksjoner nær henger 9, 18, 24 og 30. Hver seksjon har da to sensorer, en på hver side av brodekket, med en avstand på ca. 7,15 m, dette for å kunne registrere broens vridninger rundt lengdeaksen, i tillegg til den translatoriske bevegelsen. Akselerometrene er blitt plassert slik at både symmetrisk og usymmetrisk svingeformer kan bli registrert effektivt.

### **4.2.3 Forskyvningsmålere**

Forskyvningen av brodekke blir i tillegg målt basert på geografiske posisjonerings systemer (GPS), ved hjelp av såkalt «Real-Time Kinematic Global Positioning system» (RTK-GPS). Dette systemet består av to sensorer: en ved broenden, på viadukten og en midt i spennet på hovedkabelen. Differansen mellom koordinatene til disse to punktene gir informasjon om bevegelsene midt i brospennet. Da denne er plassert på toppen av hovedkabelen, blir det mer nøyaktig forskyvningen av hovedkabelen ved midten av brospennet som blir målt [6].



Figur 4.3 Oversikt over instrumenter plassert på Lysefjordbroen [6]

### 4.3 Egenfrekvenser

Egenfrekvens er konstruksjonens egen bevegelse «rytme», som vil si hvor raskt broen svinger «frem og tilbake» etter den har fått en svingebevegelse og beveger seg fritt etter det.

Det er tidligere blitt estimert egenfrekvenser til Lysefjordbroen ved hjelp av SSI-COV-metoden, et såkalt systemidentifikasjonsmetode fra måledata, modeller laget i Alvsat og SBM («Simplified Bridge Model»). Verdiene fra de ulike måle metodene er fremstilt i Tabell 4.1

som er hentet fra E. Cheynet sin doktoravhandling om fullskala-overvåking av Lysefjordbroen [16].

Tabell 4.1 Egenfrekvenser for broen [16, s.118]

Modes	SSi-COV	Alvsat		SBM	
	Hz	Hz	%	Hz	%
HS1	0.136	0.130	-4.35	0.130	-4.41
HA1	0.444	0.442	-0.43	0.442	-0.45
HS2	0.577	0.557	-3.45	0.556	-3.51
HA2	0.626	0.598	-4.51	0.597	-4.61
HS3	0.742	0.831	12.01	0.830	11.90
HA3	1.011	1.002	-0.89	1.000	-1.03
VA1	0.223	0.213	-4.30	0.205	-8.10
VS1	0.294	0.286	-2.69	0.319	8.35
VS2	0.408	0.400	-1.87	0.439	7.63
VA2	0.587	0.589	0.28	0.585	-0.39
VS3	0.853	0.867	1.59	0.864	1.31
VA3	1.163	1.198	3.06	1.194	2.72
TS1	1.237	1.154	-6.64	1.067	-13.69
TA1	2.184	2.125	-2.73	1.920	-12.09

## 5 Resultat og diskusjon

I følgene kapittel blir resultatene av analysene presentert. Vinddataen som er samlet inn fra måleutstyret ved Lysefjordbroen er analysert ved hjelp matematikkprogrammet MATLAB. Rådataene er .xls filer som blir dekomprimert og lagret som .mat filer ved hjelp av skript i MATLAB. Det er sett på akselerasjonsrespons og forskyvning til brodekket og brotårnet, spektraltetthet og standardavvik som funksjon av horisontal middelvindhastighet. Målet er å se på sammenhengen mellom vibrasjonene til brodekket og brotårnets respons. I tillegg er det sett på differansen mellom målingene til anemometrene plassert ved henger H18.

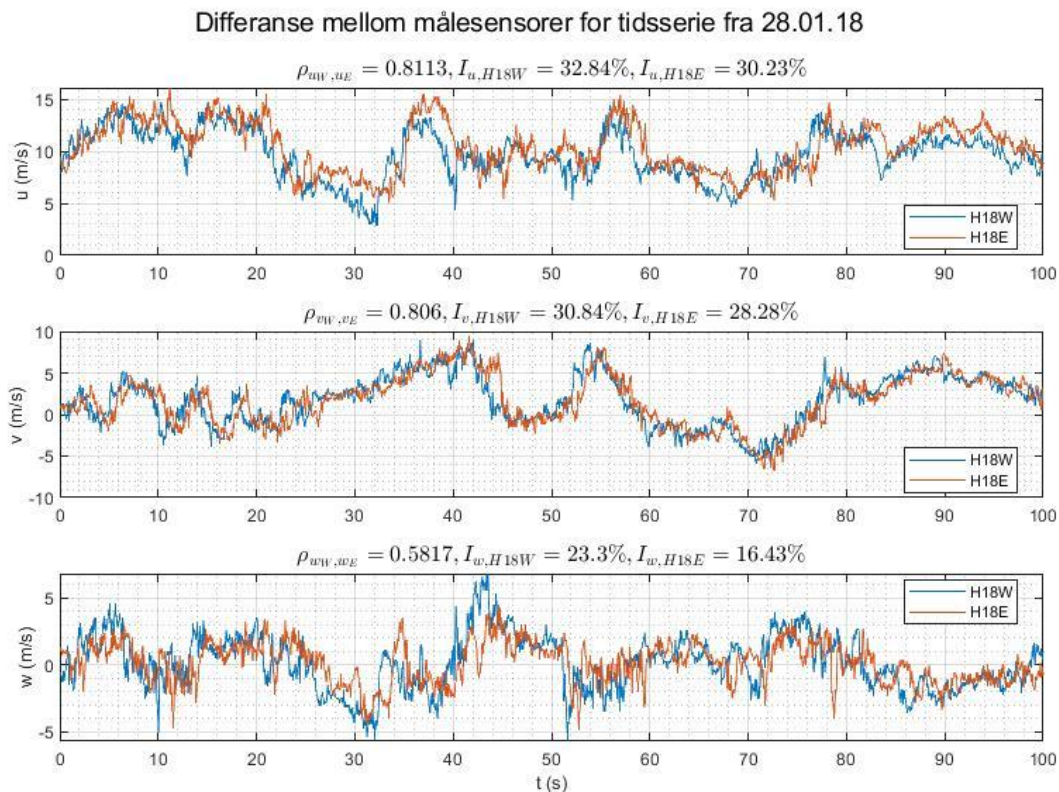
I oppgaven blir det referert til x-, y- og z-retning ved flere figurer, her er x-retning brodekkets laterale akse, altså tversgående retning til brodekket, y-retning er langsgående med brodekket og z-aksen er den horisontale aksene, for brotårnet er samme akser gjeldene.

### 5.1 Vindmålinger på to sider av brodekket

Som nevnt tidligere i kapittel 4.2.1 er det plassert ut anemometer på Lysefjordbroen, to ved henger H18, en plassert på vestsiden og en på østsiden av brodekket; H18W og H18E. Avstanden mellom disse to anemometrene er ca. 12 m. Hver av disse registrerer vindhastigheten i tre retninger (langs og normalt på broen i horisontalplan og vertikalt) som blir omgjort til komponentene u-, v- og w, i hoved-vindretning, og på tvers i horisontal og vertikalplan. I tillegg til vindhastigheten blir også vindretningen registrert. Det er sett på målingene som er registrert av de to anemometrene under et kort tidsintervall på 100 sekunder, for å se om det er forskjell mellom de registrert hastighet på de to instrumentene. Pga. evt. påvirkning av brokassen på målt vind er det tatt utgangspunkt i to forskjellige dager, hvor vinden kom fra ulike retninger. En dag hvor vinden kom relativt vinkelrett på broen fra vest, og en dag hvor vinden kom fra sørlig retning. Ved hjelp av MATLAB er det i tillegg beregnet korrelasjonskoeffisienten og turbulensintensitet til de ulike tidsseriene.

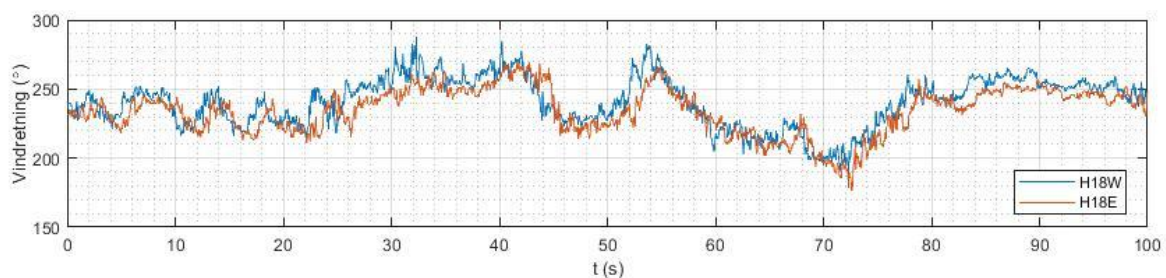
### 5.1.1 Vindretning direkte på brodekket

Fra figur 5.1 ser man hvordan de to anemometrene fanger opp de ulike komponentene u, v og w, samt beregnet korrelasjonskoeffisienten for de ulike vindretningene. Her kan man observere en viss forskyvning i registrert vindhastighet hos de to anemometrene vest og øst over tid.



Figur 5.1 Vindhastighet registrert ved H18W og H18E under vindforhold fra vest

Som vi ser fra korrelasjonskoeffisientene har vi som forventet en positiv sammenheng i alle tre tilfellene. For komponentene u og v er korrelasjonskoeffisientene henholdsvis 0.81 og 0.8, mens for komponent w er koeffisienten 0.58, hvor samvariasjonen er noe svakere. Dette kan komme av at brodekket «bremser» vinden noe i den vertikale retningen når den passerer over broen. I motsetning til de to andre vindretningene hvor vinden kan passere «friere» over broen uten å møte den samme motstanden fra brodekket. Turbulensintensiteten for målingene er vist

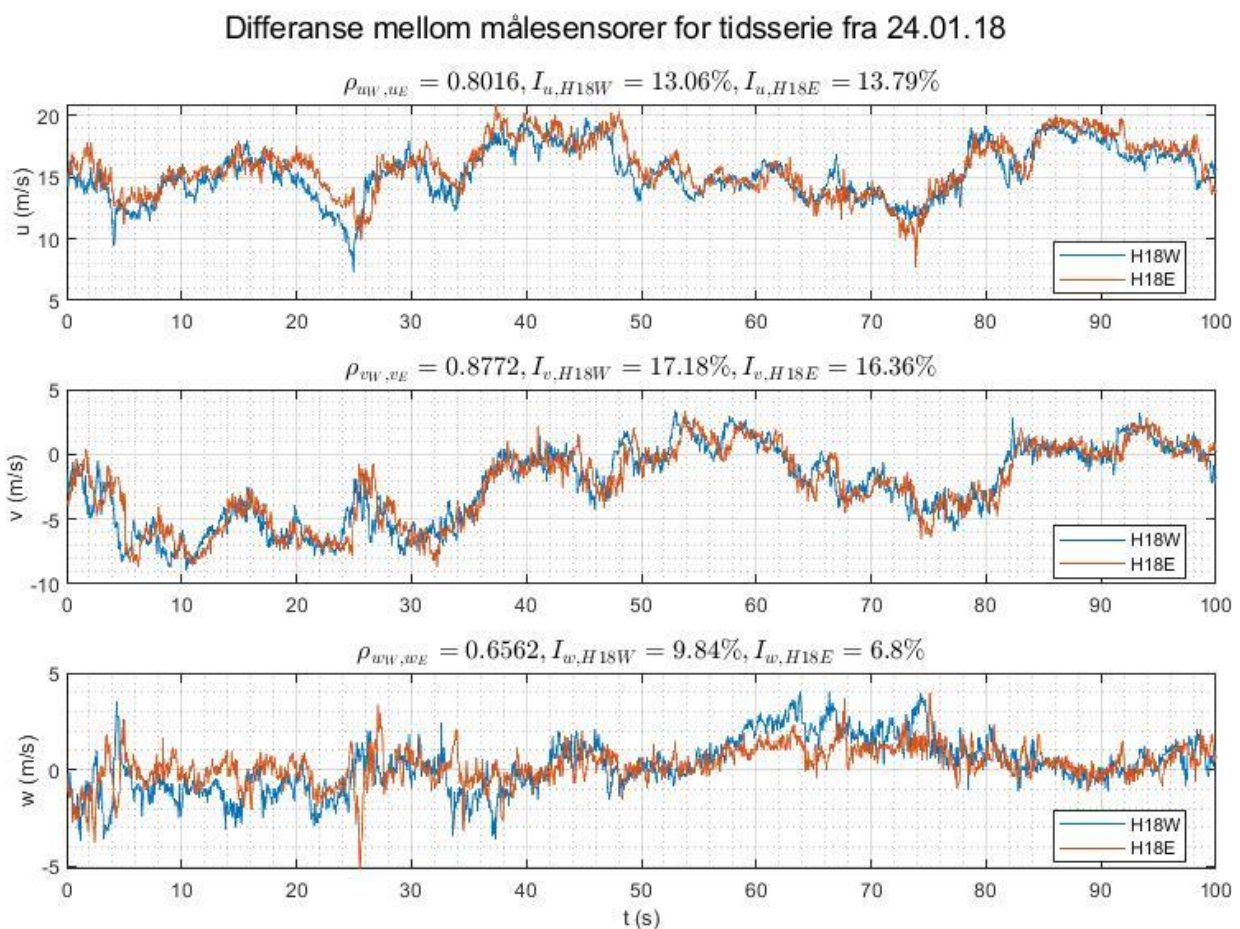


Figur 5.2 Vindretning gjennom tidsserien

i prosent, og beskriver gjennomsnittlig variasjon i vindhastighet, relativ til middelvindhastighet over valgt tidsserie. Turbulensintensiteten målt av H18E viser lavere variasjon i vindhastigheten i alle komponenter. Som kan relateres til at brokonstruksjonen demper vinden når den passerer over.

Figur 5.2 viser hvordan vindretning var under valgt tidsserie. Retningen ligger stort sett mellom  $200^\circ$  og  $250^\circ$ , med en gjennomsnittlig vindretning på ca.  $230^\circ$ , som vil si vinkelrett på broen fra vest (ref. figur 4.2).

### 5.1.2 Vind fra sør

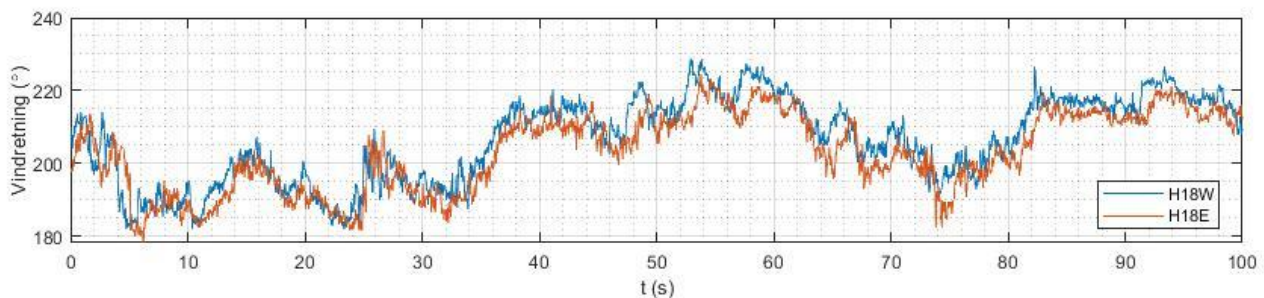


Figur 5.3 Vindhastighet registrert med anemometer plassert ved H18W og H18E under vindforhold fra sør

Figur 5.3 viser hvordan de to ulike anemometrene har fanget opp vindhastighet når vinden kommer i hovedsak fra sør/sørvest. Her kan man observere samme trend som i tilfellet med vind fra vest, hvor grafen viser en forskyvning av vindhastighet i tid i de registrert måling for de to instrumentene, forskyvningen er større ved lavere vindhastighet enn ved høyere vindhastighet. Ved en vindhastighet på ca. 12 m/s vil vinden bruke ca. 1 sekund over broen i

retningen til komponent u. Korrelasjonskoeffisientene viser også i dette tilfellet en positiv samvariasjon, også i dette tilfellet har komponent w noe svakere samvariasjon enn de to andre komponentene u og v. Målingene fra komponent w viser mindre variasjoner i vindhastighet gjennom tidsserien registrert med måleren plassert på østsiden når vinden kommer fra sør, vinden vil passere over brodekket i en lengre periode enn når vinden treffer broen fra vest, og brodekket vil dermed redusere vinden i større grad. Turbulensintensiteten viser mer jevne verdier fra anemometrene, og lavere verdier når vinden kommer fra sør, kontra vinden fra vest. Vinden fra sør vil treffe brodekket fra en annen vinkel og passere over brokonstruksjonen over en lengre periode/strekning, dette vil påvirke variasjonen og vindkastene til vinden.

Figur 5.4 viser vindretning gjennom tidsserien, retningen ligger mellom  $180^\circ$  og  $220^\circ$ , med et gjennomsnitt på ca.  $208^\circ$ , som vil si at vinden kommer fra sør/sørvest.



Figur 5.4 Vindretning gjennom valgt tidsserie

## 5.2 Akselerasjoner

Det er sett på akselerasjoner i brodekket i vertikal og horisontal retning, i tillegg til rotasjonsbevegelser rundt broens lengdeakse. For det nordvestlige brotårnet er det blitt analysert rotasjon rundt den vertikale akse (z) i tillegg til akselerasjon i lengderetning og på tvers av brodekket.

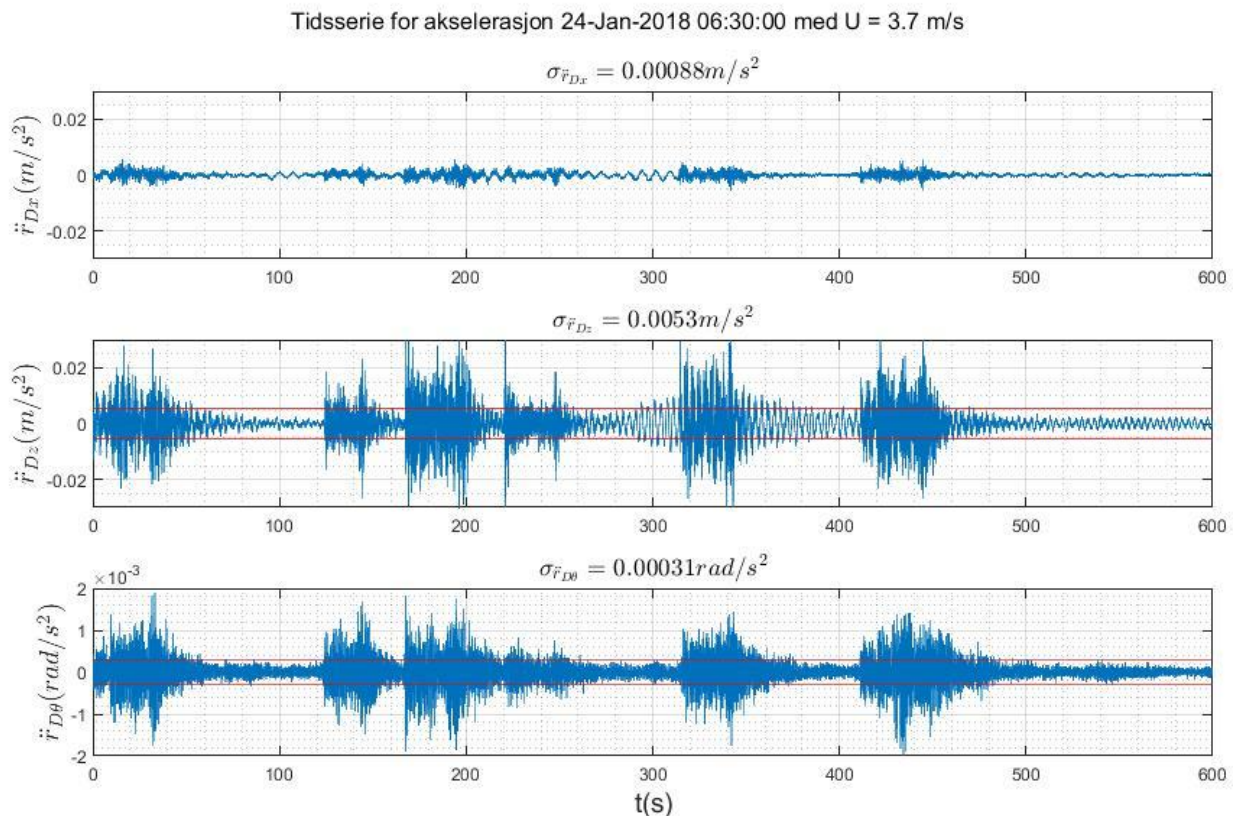
Det er ikke sett på akselerasjon i langsgående retning for brodekket da dette ble sett på i en tidligere masteroppgave av K.H. Aronsen, og her observert liten respons. Det er heller ikke lagt vekt på brotårnets akselerasjoner i vertikale retning, da dette også ble undersøkt i Aronsen sin oppgave uten store utslag, da brotårnet har lite vertikale bevegelser på grunn av tårnets høye stivhet og fasthet i bunn [18].

Det er valgt å se på to 10 minutters intervall, et tilfelle med mye vind, og et med trafikk og lite vind. Begge intervallene er tatt fra 24.01.18, men på ulike tidspunkter av dagen.

Akselerasjonene til brodekket er målt av akselerometeret som er plassert ved henger H18.

Vindhastigheten kommer i hoved vindretning (regnet ut som  $H = \sqrt{u^2 + v^2}$ ). Det er regnet ut standardavvik for hver analysert akselerasjonsretning for både brodekket og brotårnet, disse blir presentert samlet i tabell 5.1.

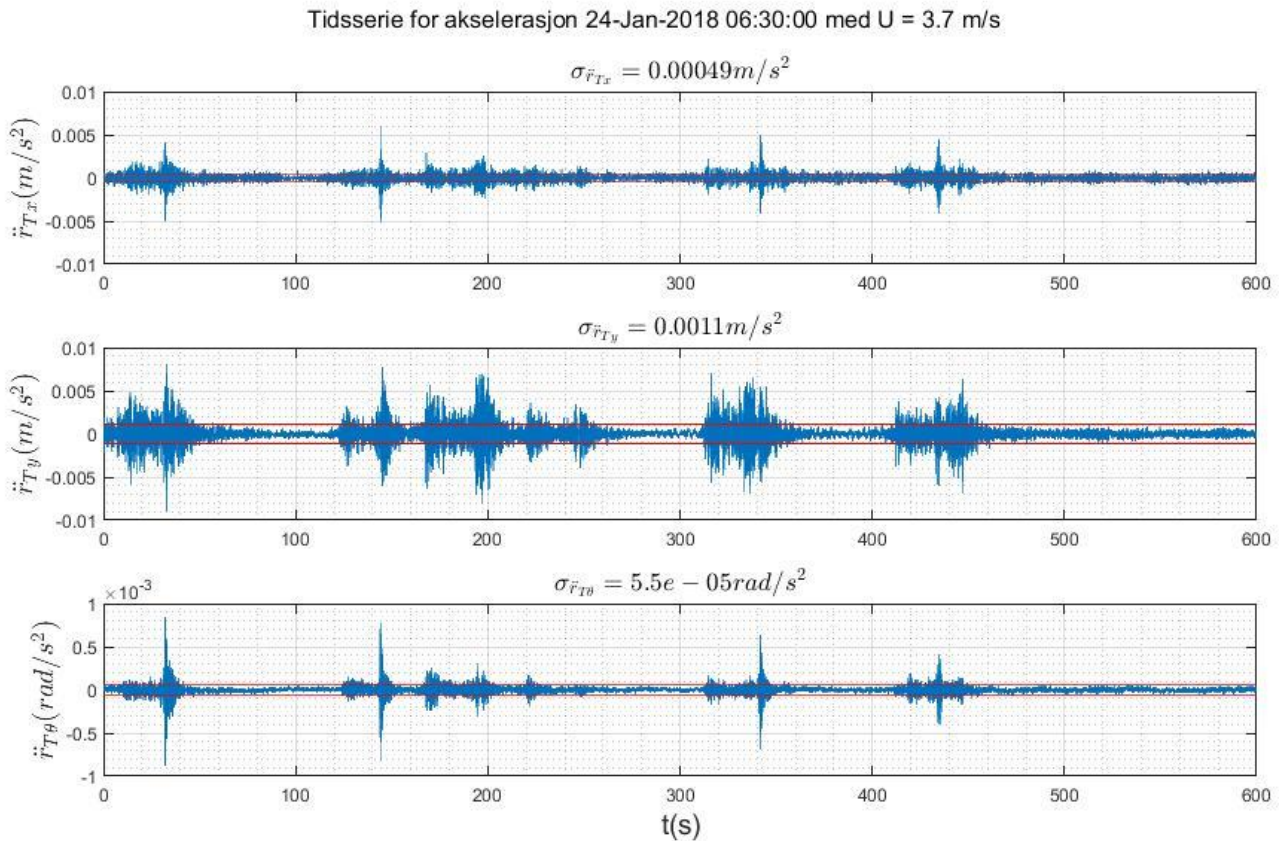
### 5.2.1 Tidsserie med trafikk og lite vind



Figur 5.5 Tidsserie for akselerasjon i brodekket i tidsrommet 06.30-06.40 den 24.01.18. De ulike retningene som er vist (fra topp til bunn) er lateral (x), vertikal (z) og torsjonal om langsgående akse( $\theta$ ). Standardavviket er markert med rød linje.

Figur 5.5 viser tidsserie med akselerasjon til brodekket under forhold med trafikk og lite vind. Her kan det observeres lav respons med unntak av korte perioder med spontant høyere respons. Her er det tydelig at trafikkbelastning gir mest respons i vertikal retning, hvor akselerasjonen periodevis går opp mot  $0.05 m/s^2$ , mens den horisontale responsen er relativt lav, maks respons gjennom tidsserien er  $0.005 m/s^2$ . Det er ikke markert inn standardavviket i grafen som viser akselerasjon i horisontal retning, dette fordi responsen var så lav at avviket ikke kom tydelig fram i plottet. Torsjon viser samme tildens som den vertikale akselerasjonen med spontan respons, vridningen går mot  $2 \times 10^{-3} rad/s^2$ , vridning av brodekket kommer av tunge kjøretøy som gir vertikallast på en side av kjørebanelen, dette fører til rotasjon om den langsgående akselen til brodekket. Trafikklast påvirker ikke brodekkets bevegelser i horisontal retning i stor grad. Økningen i respons skjer ved ca. samme tidspunkt for alle retninger og

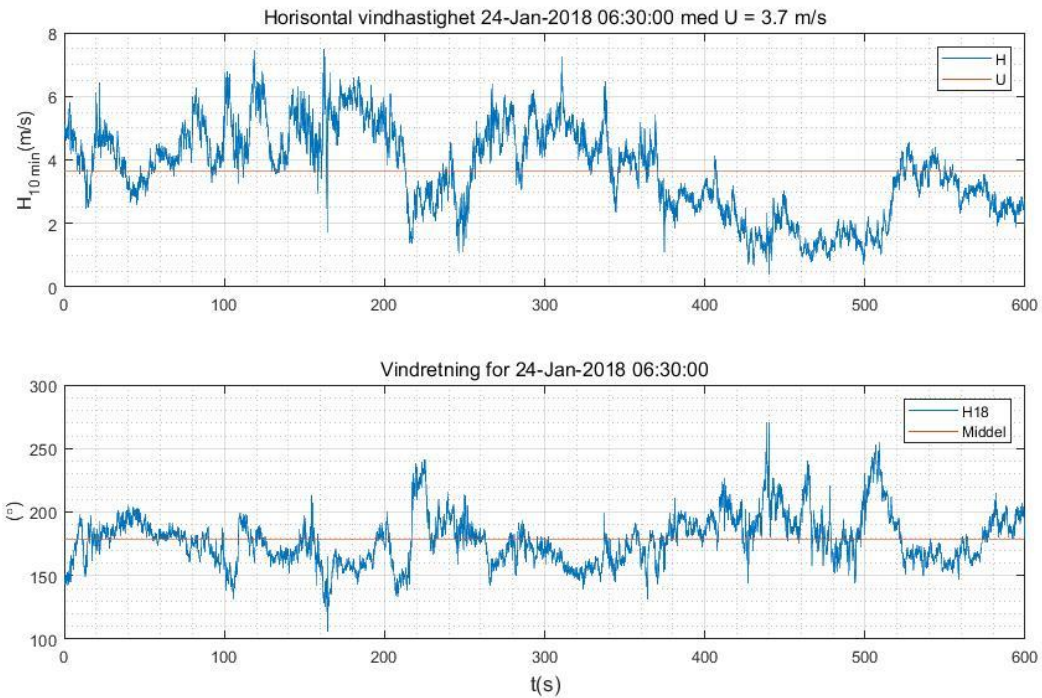
avtar ca. ved samme tidspunkt. Figur 5.5 viser at brodekket er utsatt for kortvarig, forbigående trafikklast og ikke en jevn lastpåvirkning gjennom hele måleperioden. Ved perioder hvor kun vinden påvirker broen som lasttilfellet, er det liten respons i alle retninger.



Figur 5.6 Tidsserie for akselerasjon i brotårn i tidsrommet 06.30-06.40 den 24.01.18. De ulike retningene som er vist (fra topp til bunn) er lateral (x), langsgående (y) og torsjonal om vertikal akse( $\theta$ ). Standardavviket er markert med rød linje.

Figur 5.6 viser hvordan brotårnet responderer i tilfellet med trafikk og lite vind, her ser man samme sammenheng som er diskutert ved responsen til brodekket, hvor trafikkbelastning viser tydelig ved rask og kortvarig økning i respons. Responsen til brotårnet er størst i lengderetning (y) med broen, som stemmer med teorien i kapittel 2.2 om at kreftene i kablene påvirker brotårnet bevegelse, og at de vertikale bevegelsene i brodekket «drar» ved hjelp av kablene tårnet med seg i bevegelsene. I tårnets bevegelse på tvers av brodekke kan man også observere sammenheng med trafikkbelastningen som påvirker de vertikale bevegelsene til brodekke, men ikke like kraftige som i brotårnets lengderetning, her påvirkes tårnbevegelsene av hvilken side av broen trafikken kjører på, og at kablene på hver side av broen dermed «drar» med ulik kraft. Et likt mønster kan man observere med torsjonsbevegelsen rundt vertikalaksen til brotårnet, som også blir påvirket av hvilken side av broen kabelen har størst dragkraft. For bevegelsene i brotårnet er det langsgående akselerasjon som er størst. Ved alle tilfellene oppstår responsen i korte intervall, sporadisk, uten en jevn «flyt».

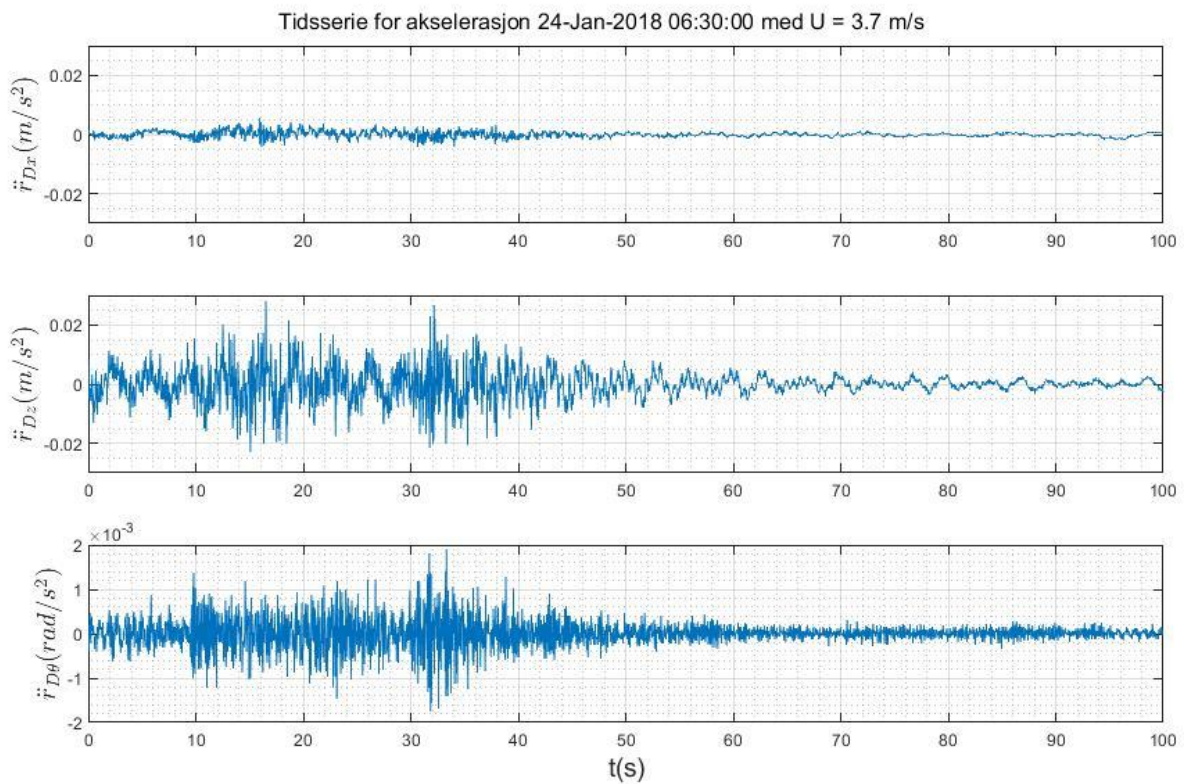




Figur 5.7 Horizontal vindhastighet og vindretning i tidsrommet 06.30-06.40 den 24.01.18.

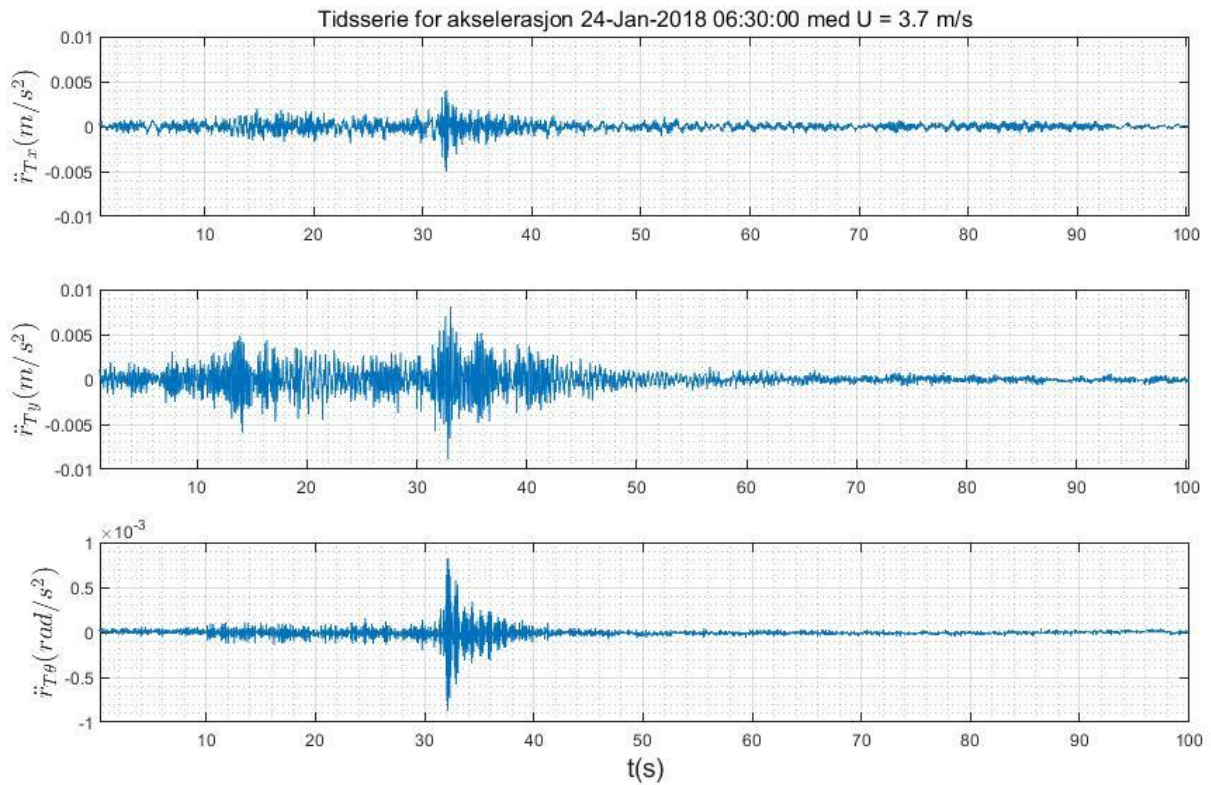
Figur 5.7 viser hvordan vindhastigheten og vindretningen var under valgt tidsintervall med trafikk og lite vind. Som man ser fra grafen med horisontal vindhastighet varierer vinden stadig, hvor man kan se at høyeste vindhastighet går mot 8 m/s, mens laveste ligger på ca. 1 m/s. Middelvindhastigheten gjennom tidsserien er 3.7 m/s. Vindretningen varierer stadig, den ligger mellom ca.  $150^\circ$  til  $250^\circ$ , som vil si at vinden kommer i hovedsak fra sør, med en gjennomsnittretning på  $180^\circ$ .

Det er valgt å se på et lite utsnitt av samme tidsseriene som diskutert overfor med trafikk og lite vind for å få en litt mer detaljert oversikt over responsen til brodekket og brotårnet over et kort intervall på 100 sekunder.

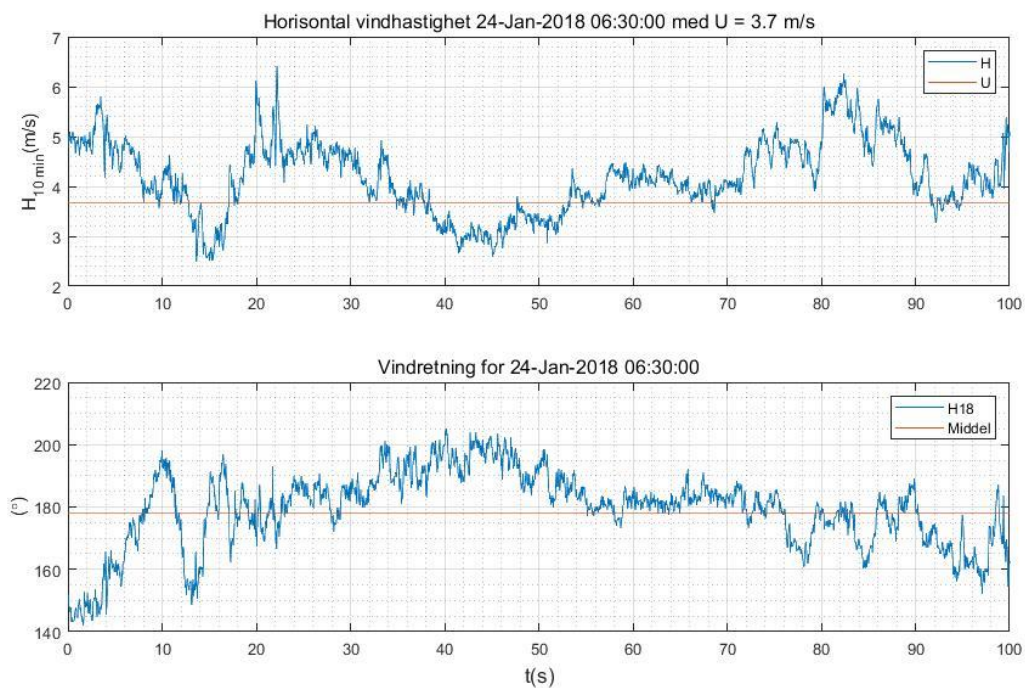


Figur 5.8 Tidsserie for akselerasjon til brodekket i tidsintervall på 100 sekunder. De ulike retningene som er vist (fra topp til bunn) er lateral ( $x$ ), vertikal ( $z$ ) og torsjonal om langsgående akse( $\theta$ )

Figur 5.8 illustrerer responsen til brodekket under en kortere sekvens. Ved å zoome seg inn på et kort tidsintervall vil en kunne se de ulike svingningene mer nøyaktig, her kan man estimere egenfrekvensen til de ulike akselerasjonsretningene ved å beregne antall sykluser gjennom en tidsperiode. Ved å se på for eksempel den vertikale responsen til brodekket kan det observeres ca. 3 sykluser over 10 sekunders periode. Dette gir en egenfrekvens på 0.3 Hz, som stemmer med tidligere estimert egenfrekvens VS1 fra Tabell 4.1. Responsen til brotårnet vises i figur 5.9, når den vertikale responsen på brodekket øker, øker også responsen til brotårnet i langsgående retning. Responsen til den vertikale akselerasjonen av på brodekket er  $0.03 \text{ m/s}^2$ , som er større enn responsen til langsgående retning til brotårnet som ligger under  $0.01 \text{ m/s}^2$ . Fra figur 5.10 kan man se hvordan vindhastigheten og vindretningen var under intervallet på 100 sekunder, her ser man at selv under den korte tidsserien er det variasjoner i både vindhastigheten og vindretning, vindhastigheten ligger mellom 2 m/s og 6 m/s i gjeldende tidsintervall.

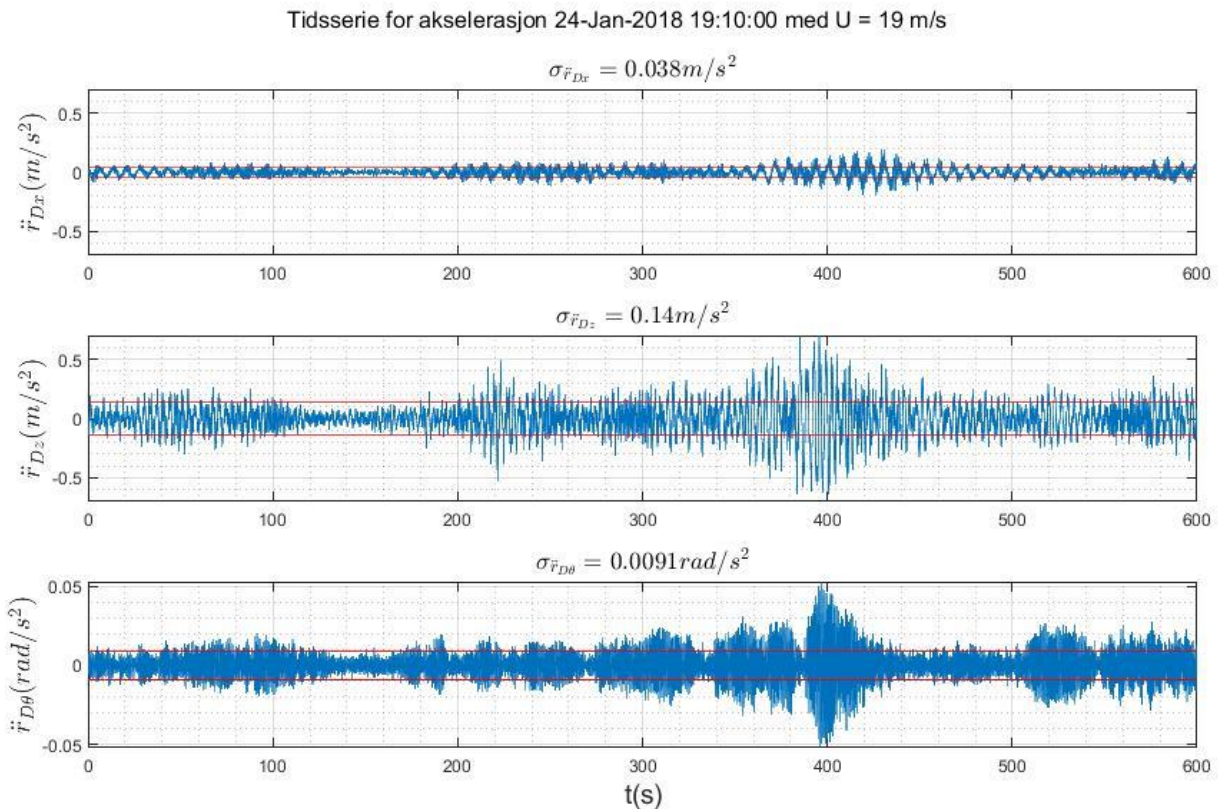


Figur 5.9 Tidsserie for akselerasjon til brotårn under tidsintervall på 100 sekunder. De ulike retningene som er vist (fra topp til bunn) er lateral (x), langsgående (y) og torsjonal om vertikal akse( $\theta$ )



Figur 5.10 Horisontal vindhastighet og vindretning under tidsintervall på 100 sekunder.

## 5.2.2 Tidsserie med kraftig vind



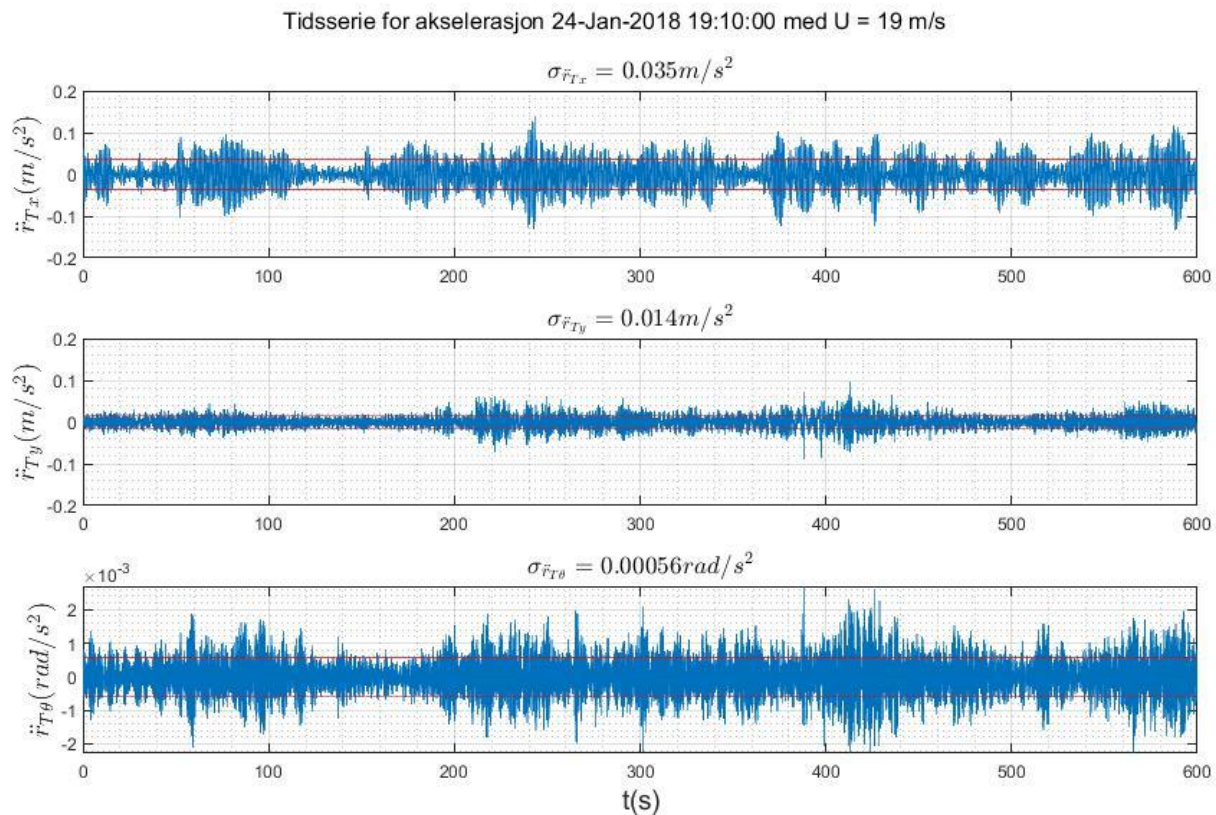
Figur 5.11 Tidsserie for akselerasjon til brodekket i tidsrommet 19.10-19.20 den 24.01.18. De ulike retningene som er vist (fra topp til bunn) er lateral ( $x$ ), vertikal ( $z$ ) og torsjonal om langsgående akse( $\theta$ ). Standardavviket er markert med rød linje.

Figur 5.11 viser responsen til brodekket over en tidsserie med mye vind, her viser en mer jevn flyt i akselerasjon uten de samme sporadiske utfallene som kunne observeres i tilfellet med trafikk og lite vind. I dette tilfellet er som i forrige tidsserie registrert større bevegelser i den vertikale retningen på brodekket enn den horisontale retningen. Torsjon om langsgående broakse er større under situasjon med mye vind, da rotasjonen går opp mot  $0.05 \text{ rad/s}^2$ , mot tilfellet med trafikk og lite vind hvor rotasjonen gikk mot  $2 \times 10^{-3} \text{ rad/s}^2$ .

I den horisontale responsen kan en observere en økning i akselerasjon etter ca. 400 sekunder, dette kan relateres til vindhastigheten i figur 5.13 hvor den horisontale vindhastigheten har en plutselig økning i samme tidsperiode.

Fra Figur 5.5 og figur 5.11 viser at vindhastigheten utgjør en tydelig forskjell i responsen på brodekket i vertikal retning. Tilfellet med mye vind har en mer jevn respons, mot tilfellet med trafikk og lite vind som er mer dominert av trafikk, der en ser en tydelig økning i responsen over en kort periode, og lav respons ellers. Ved trafikkbelastning ligger maks akselerasjon i vertikal retning på ca.  $0.05 \text{ m/s}^2$ , som er mindre enn tilfellet hvor broen blir påvirket av

kraftig vind, der responsen går over  $0.5 \text{ m/s}^2$ . Den horisontale responsen til brodekket øker i situasjonen med mye vind da akselerasjonen går opp mot  $0.2 \text{ m/s}^2$ , i tilfellet med trafikk og lite vind går ikke responsen over ca.  $0.005 \text{ m/s}^2$ .

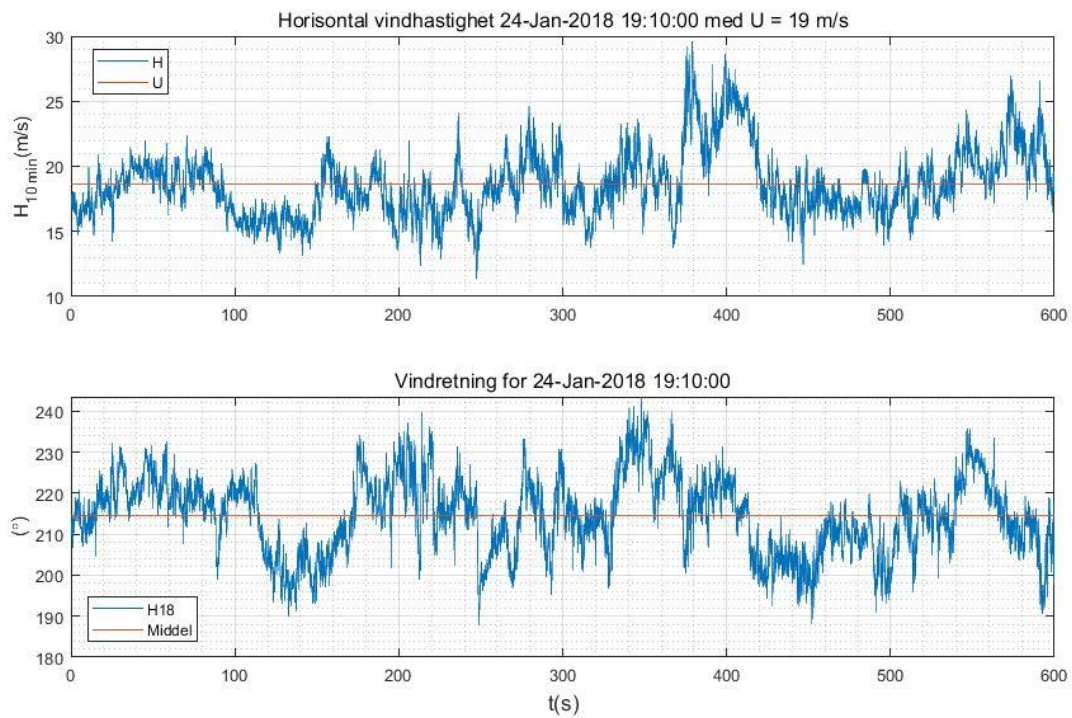


Figur 5.12 Tidsserie for akselerasjon til brotårnet i tidsrommet 19.10-19.20 den 24.01.18. De ulike retningene som er vist (fra topp til bunn) er lateral (x), langsgående (y) og torsjonal om vertikal akse ( $\theta$ ). Standardavviket er markert med rød linje.

Figur 5.12 viser hvordan tårnet responderer under forhold med kraftig vind, i dette tilfellet er vinden mer dominerende for tårnbevegelsene enn brodekket og kablene, da akselerasjonen til brotårnet i lateral retning er større enn responsen til brotårnet i langsgående retning. Her er det en kombinasjon mellom vindbelastning og kablens strekk kraft som påvirker brotårnets respons. Brodekkets økning i horisontal akselerasjon kan være en påvirkende faktor i responsen til brotårnet, da kablene ikke lenger får den samme kraften i vertikal retning når brodekkets bevegelse i horisontal retning øker.

Fra Figur 5.6 og figur 5.12 kan man observere at under tidsserien med mye vind går torsjonsresponsen opp mot  $2 \times 10^{-3} \text{ rad/s}^2$ , mens i tidsserien med trafikk og lite vind oversteg ikke torsjonsresponsen  $1 \times 10^{-3} \text{ rad/s}^2$ . Tilfellet med trafikk og lite vind viser nesten ingen respons foruten den trafikkpåvirkede bevegelsen, mens tilfellet med mye vind har høyere utslag og en mer jevn akselerasjon gjennom tidsserien på 10 minutter.

Figur 5.13 viser horisontal vindhastighet og vindretning under den valgte tidsserien, her vises store variasjoner mellom vindhastigheten, den laveste er 12 m/s mot høyeste som går mot 30 m/s. Middelvindhastigheten er målt til 19 m/s. Det vises og variasjoner i vindretning gjennom tidsserien, her treffer vinden i hovedsak brodekket fra sørvest.



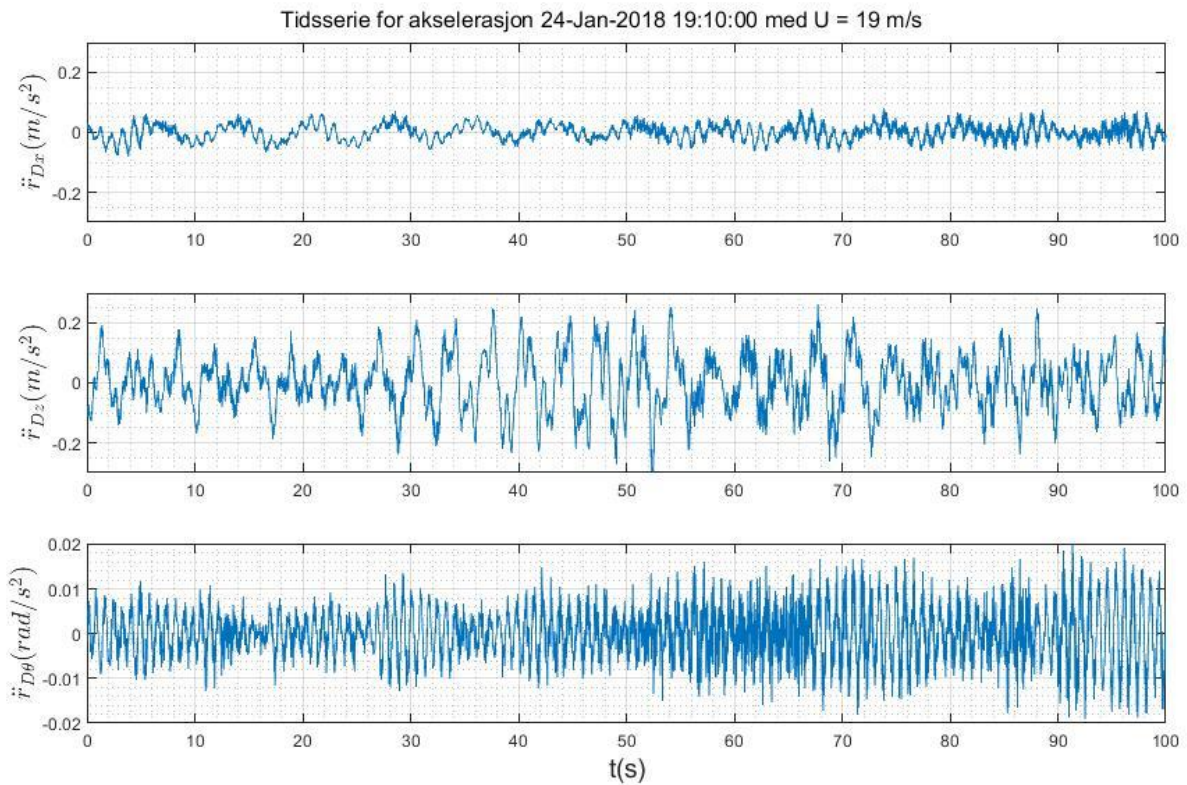
Figur 5.13 Horisontal vindhastighet og vindretning i tidsrommet 19.10-19.20 den 24.01.18

Det er i tillegg regnet ut standardavviket til akselerasjonen i begge de valgte tidsseriene, for responsen i både brodekket og brotårnet, resultatet er presentert i tabell 5.1. Her ser man at standardavvikene for tidsserien med mye vind er større enn for tidsserien med trafikk og lite vind i samtlige retninger, noe som indikerer at under forhold med mye vind er broens variasjoner i akselerasjon større enn med trafikk og lite vind, og dermed er det også mer bevegelser i brodekket og brotårnet i alle de analyserte retningene. For å kunne danne et mer nøyaktig bilde vil det være interessant å undersøke flere tidsserier med varierende vindhastighet.

Tabell 5.1 Standardavvik til akselerasjon fra to valgte tidsserier den 24.01.18

	Trafikk og lite vind	Mye vind
$\sigma_{\ddot{r}_{Dx}}$ (m/s <sup>2</sup> )	0.00088	0.038
$\sigma_{\ddot{r}_{Dz}}$ (m/s <sup>2</sup> )	0.0053	0.14
$\sigma_{\ddot{r}_{D\theta}}$ (rad/s <sup>2</sup> )	0.00031	0.0091
$\sigma_{\ddot{r}_{Tx}}$ (m/s <sup>2</sup> )	0.00049	0.035
$\sigma_{\ddot{r}_{Ty}}$ (m/s <sup>2</sup> )	0.0011	0.014
$\sigma_{\ddot{r}_{T\theta}}$ (rad/s <sup>2</sup> )	$5.5 \cdot 10^{-5}$	0.00056

På samme måte som responsen for broen er sett på over et kort tidsintervall i tilfellet med trafikk og lite vind, er det og sett på samme intervall-lengde på 100 sekunder i tilfellet med mye vind.



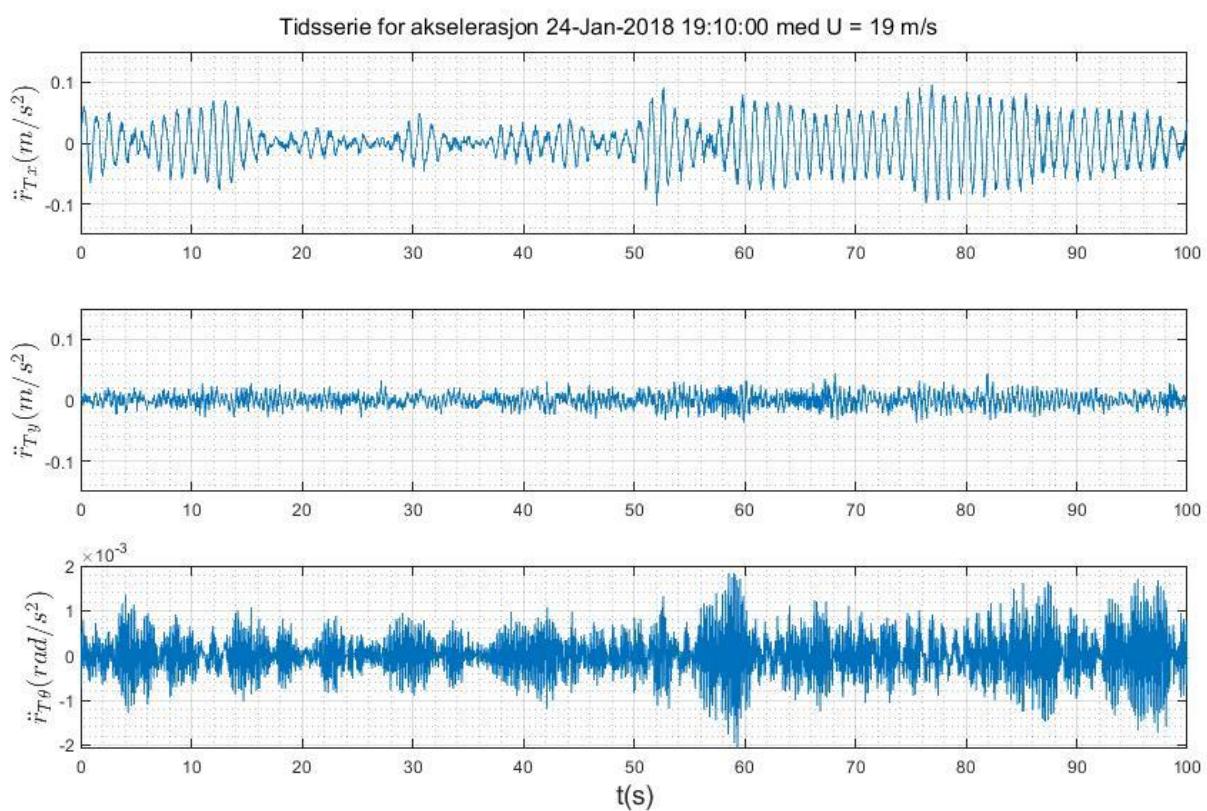
Figur 5.14 Tidsserie for akselerasjon til brodekket under tidsintervall på 100 sekunder. De ulike retingene som er vist (fra topp til bunn) er lateral ( $x$ ), vertikal ( $z$ ) og torsjonal om langsgående akse( $\theta$ )

Figur 5.14 viser mer detaljert hvordan akselerasjonen til brodekket endrer seg over valgt tidsperiode med mye vind, enn figur 5.11 som har et lengre tidsintervall. Her er det mulig å se responsen til brodekket mer nøyaktig, og likt som i tilfellet med trafikk og lite vind kan det lettere estimeres egenfrekvens ut fra grafen. Ved å se på brodekkets horisontale respons over en 10 sekunder sekvens kan en estimere en egenfrekvens på rett over 0.1 Hz, som stemmer med HS1 fra tidligere beregninger av frekvens i tabell 4.1.

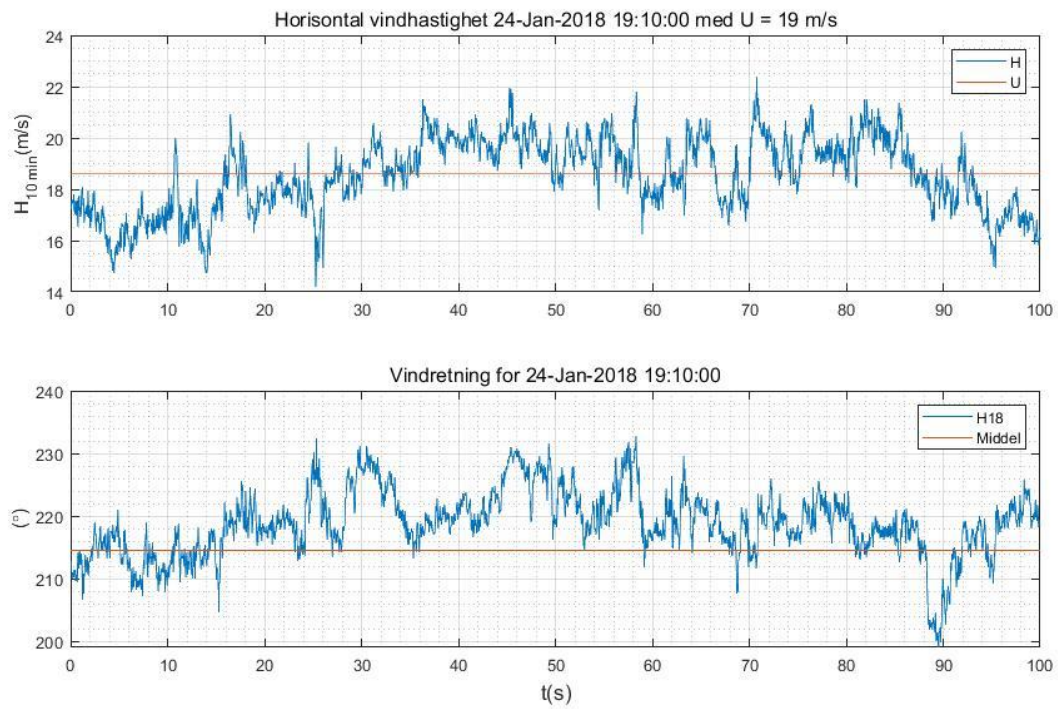


Figur 5.15 viser brotårnets respons under tidsserien på 100 sekunder med mye vind, her kommer responsen i brotårnet retninger godt frem, og en ser at under forhold med mye vind har brotårnets tversgående respons for brodekket større utslag en responsen i langsgående retning for brodekket.

Figur 5.16 viser horisontal vindhastighet og vindretning under den valgte tidsserien på 100 sekunder, her vises det variasjoner i både vindhastighet og vindretning gjennom det korte sekvensen, da vindhastigheten varierer fra 14 m/s til 22 m/s, og vindretningen går fra  $200^\circ$  til  $230^\circ$ . Variasjonene som kan observeres i vindhastigheten oppstår som følge av vindkast i vindstrømmen.



Figur 5.15 Tidsserie for akselerasjon til brotårn under tidsserie på 100 sekunder. De ulike retningene som er vist (fra topp til bunn) er lateral (x), langsgående (y) og torsjonal om vertikal akse( $\theta$ )

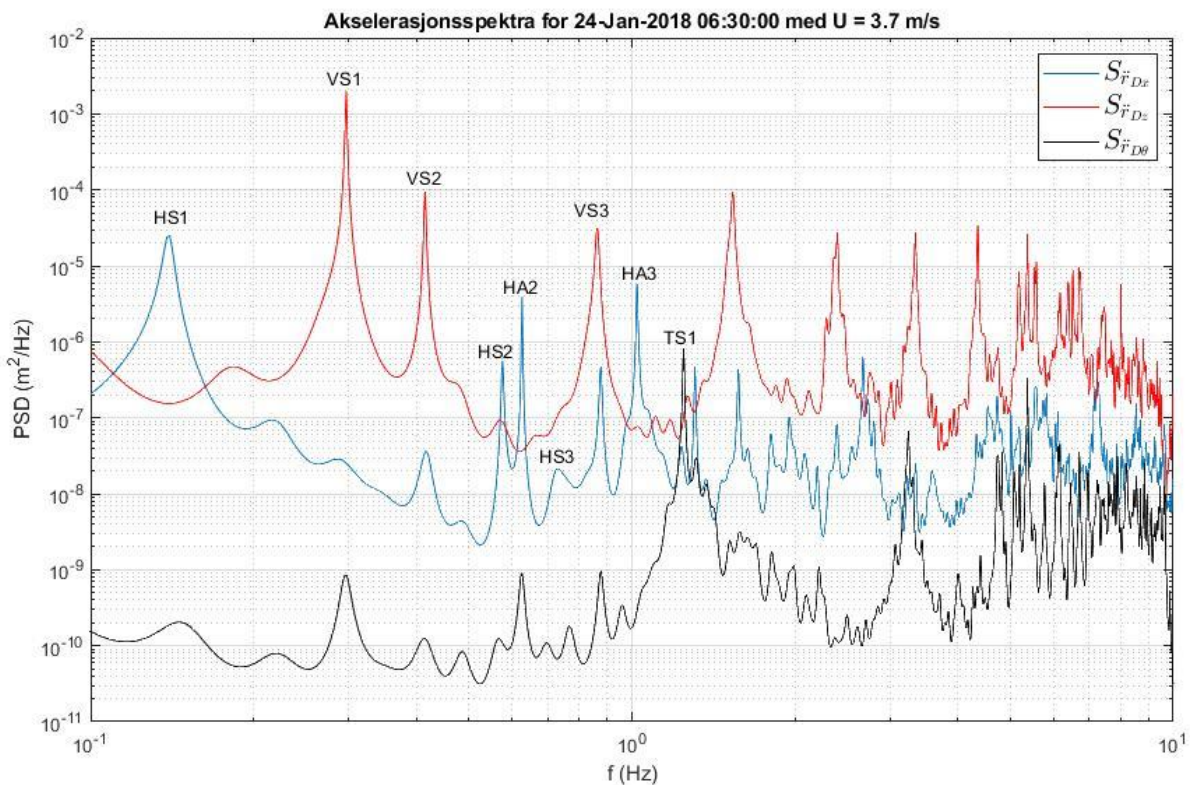


Figur 5.16 Horisontal vindhastighet og vindretning under tidsserie på 100 sekunder.

### 5.3 Spektraltetthet/akselerasjonsspektre

Ved å ta utgangspunkt i tidsseriene brukt tidligere med trafikk og lite vind, og tidsserien med mye vind er det beregnet Power spektraltetthet (PSD). For beregningene er MATLAB funksjonen «pburg» brukt, som er en funksjon etter Burgs metode til utregning av spektraltetthet, se kapittel 3.5.2 og vedlegg for MATLAB koder. Samplingsfrekvensen er 25 Hz. Det er sett på akselerasjonsspektra for både brodekket og brotårnet.

#### 5.3.1 Tidsserie med trafikk og lite vind



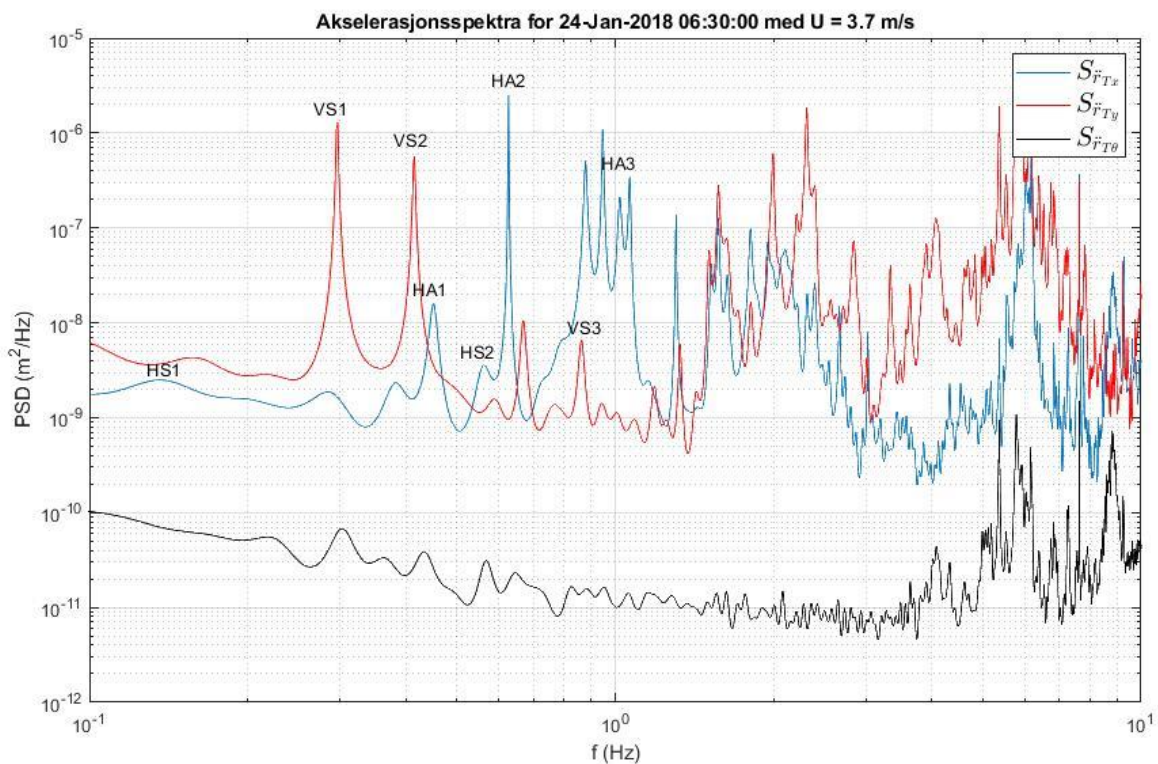
Figur 5.17 Akselerasjonsspektra for brodekket fra tidsintervallet 06.30-06.40 den 24.01.18.

Figur 5.17 viser akselerasjonsspektra for brodekket i vertikal og horisontal retning, og rotasjon om langsgående broakse i et tilfellet med trafikk og lite vind på logaritmiske akser. De ulike egenfrekvensene fra tabell 4.1 er markert inn i grafen. Ut fra figuren kan man se hvordan energien av vindhastigheten blir fordelt utover ulike frekvenser, akselerometerene plassert ved H18 fanger opp alle vertikale og horisontale symmetriske modene i samsvarer med verdiene fra tabell 4.1 for brodekket.

Figur 5.18 viser akselerasjonsspektra til brotårn i tversgående og langsgående retning for brodekket og torsjon om vertikal akse. I R. Steigen sin masteroppgave ble det sett på egenfrekvenser og svingeformer analysert ut fra dataprogrammet ABAQUS, her ble det kjørt

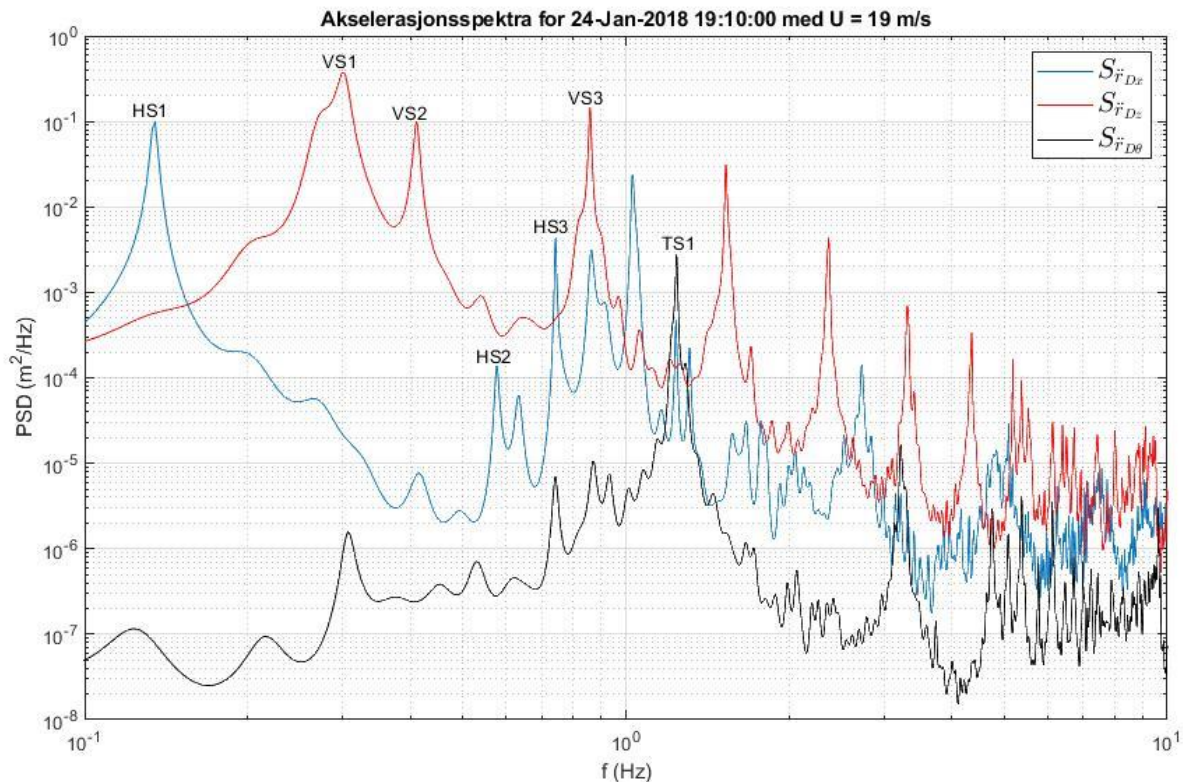
analyser hvor svingeformen til brodekket og kablene ble sett på mot hverandre, her kom det fram at i horisontal retning var det kun i den 1. symmetriske og asymmetriske svingeform at brodekket og kablene delte svingeform. I 2. og 3. symmetriske og asymmetriske svingeform hadde brodekket lite bevegelse i forhold til kablene [19]. Ut fra figur 5.18 kan det observeres egenfrekvens til brotårnet (HS2, HA2 og HA3) som ifølge Steigen er frekvenser hvor dekket beveger seg lite men kablene mye, dette vil drive tårnet i bevegelser hvor tårnbevegelsene kommer av «rene kabel-svingeformer».

Ut fra figur 5.17 og figur 5.18 kan det observeres en sammenheng mellom den vertikale responsen til brodekket og brotårnets respons i langsgående retning for brodekket, da man ser at begge har topper rundt 0.3 Hz (VS1) og 0.4 Hz (VS2), som stemmer med observasjonene i kapittel 5.2.1 om de vertikale bevegelsene til brodekket overføres til brotårnets respons i retning langs broen.



Figur 5.18 Akselerasjonsspektra for brotårnet fra tidsintervallet 06.30-06.40 den 24.01.18.

### 5.3.2 Tidsserie med mye vind

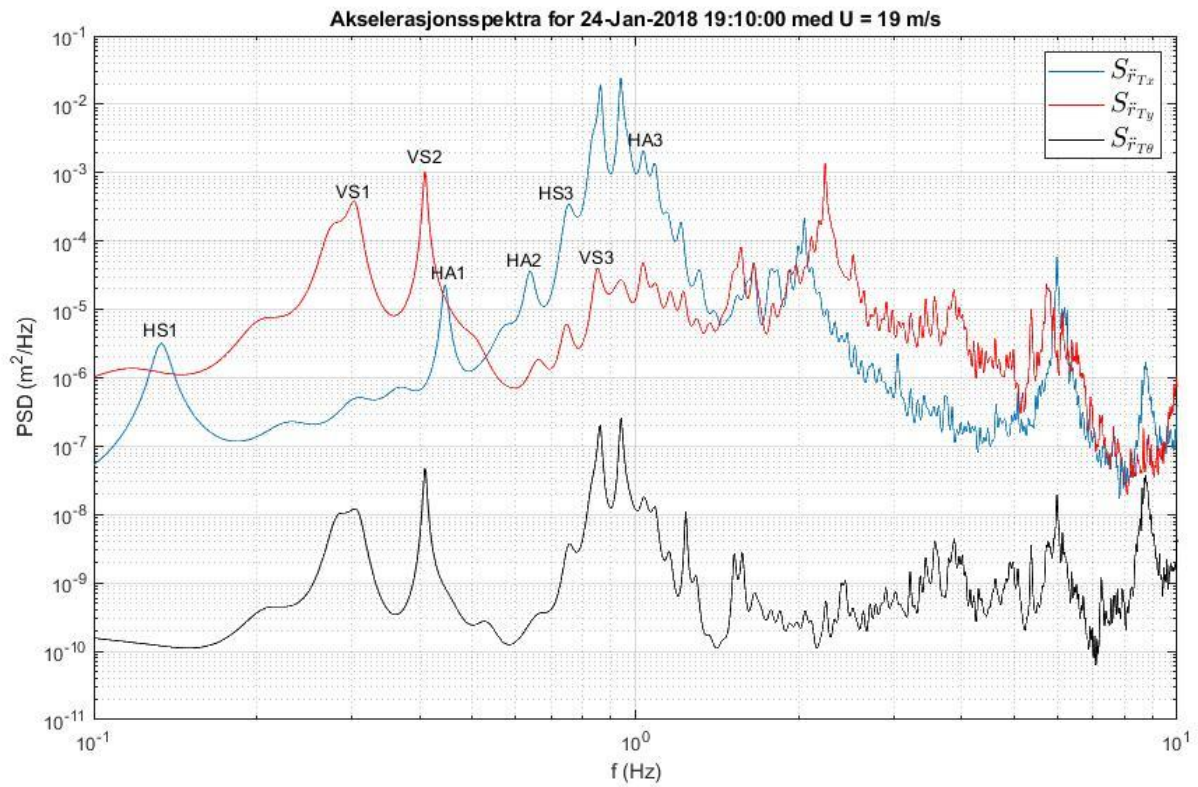


Figur 5.19 Akselerasjonsspektra for brodekket fra tidsintervallet 19.10-19.20 den 24.01.18.

Figur 5.19 viser den dynamiske responsen for brodekket under tidsintervall med kraftig vind. Fra grafen er det likt som i tilfellet med trafikk og lite vind markert inn de symmetrisk horisontale-, vertikale- og torsjonsvingeformene som stemmer overens med verdiene i Tabell 4.1.

Figur 5.20 viser akselerasjonsspektra for brotårnet under forhold med kraftig vind. I brotårnet er alle de symmetriske vertikale egenfrekvenser ut fra tabell 4.1 blitt registrert. Likt som i tilfellet med trafikk og lite vind er brotårnets egenfrekvens HS3, HA2 og HA3 registrert, disse kan som nevnt tidligere knyttes til rene kabel svingninger, og relateres til tårnbevegelser som blir dratt av ren kabelkraft og ikke brodekket. Det kan og observeres et par topper som ikke er nevnt i tabell 4.1 over broens egenfrekvenser, dette kan tolkes som brotårnets egenfrekvens uavhengig av broen.

Resultatene fra de ulike tidsseriene viser at egenfrekvensen er lik både for brodekket og brotårnet i begge tidsseriene, men for begge tilfellene er størrelsen på spektraltettheten (PSD) lavere i tidsserien med trafikk og lite vind. I begge tilfellene er det samsvar mellom de analyserte og de beregnede verdiene fra tabell 4.1 for egenfrekvenser.



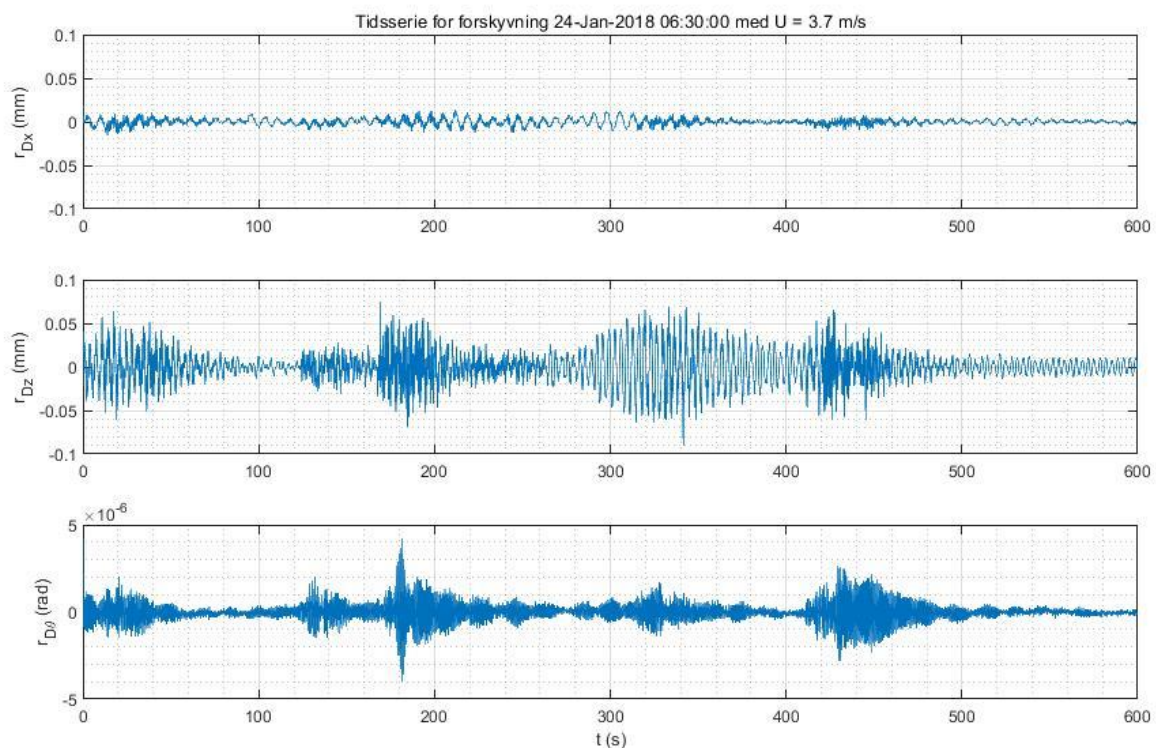
Figur 5.20 Akselerasjonsspektra for brotårnet fra tidsintervallet 19.10-19.20 den 24.01.18.

## 5.4 Forskyvning og spektra

Forskyvningen til brodekket og brotårnet er funnet ved hjelp av dobbelintegrering av akselerasjonsdataen og regnet ut ved hjelp av integralfunksjonen «cumtrapz» i MATLAB. Forskyvningen er filtrert for å fjerne støy ved hjelp av funksjonen «filter1» fra file Exchange [20], det er valgt et høy-pass filter med en «cut-off» frekvens på 0.08 Hz for alle frihetsgrader, for å fjerne de lave frekvensene. Ved å bruke filter slettes en del av de større forskyvningene som ligger på lav frekvens, dette kan føre til at beregnet forskyvningen er lavere enn de faktiske forskyvningene som oppstår på broen.

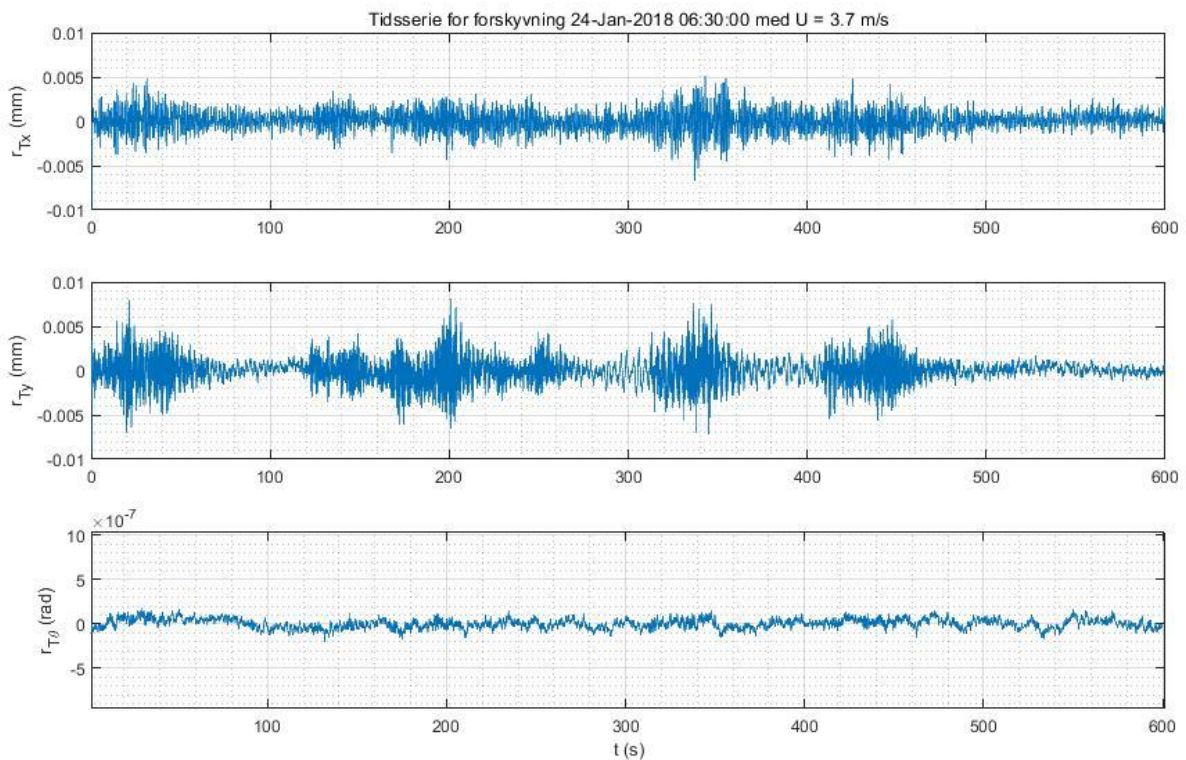
### 5.4.1 Tidsserie med trafikk og lite vind

Figur 5.21 viser forskyvning til brodekket under påvirkning av trafikk og lite vind, det er tatt fra samme tidsserie som ble brukt ved akselerasjonsresponsen og spektraltettheten. Her vises forskyvning i mm i horisontal og vertikal retning, torsjon rundt langsgående broakse vises i radianer. Slik som med akselerasjonsresponsen ser man at utslaget er som forventet størst i vertikal retning for brodekket, og tilnærmet ingen bevegelse i horisontal retning. Her ser en samme mønster som ved akselerasjonsresponsen, hvor forskyvningen spontant øker ved kortvarig, forbigående trafikklast og holder seg rolig ellers under forhold med lite vind.



Figur 5.21 Tidsserie for forskyvning til brodekket i tidsrommet 06.30-06.40 den 24.01.18. De ulike retningene som er vist (fra topp til bunn) er lateral (x), vertikal (z) og torsjonal om langsgående akse( $\theta$ )

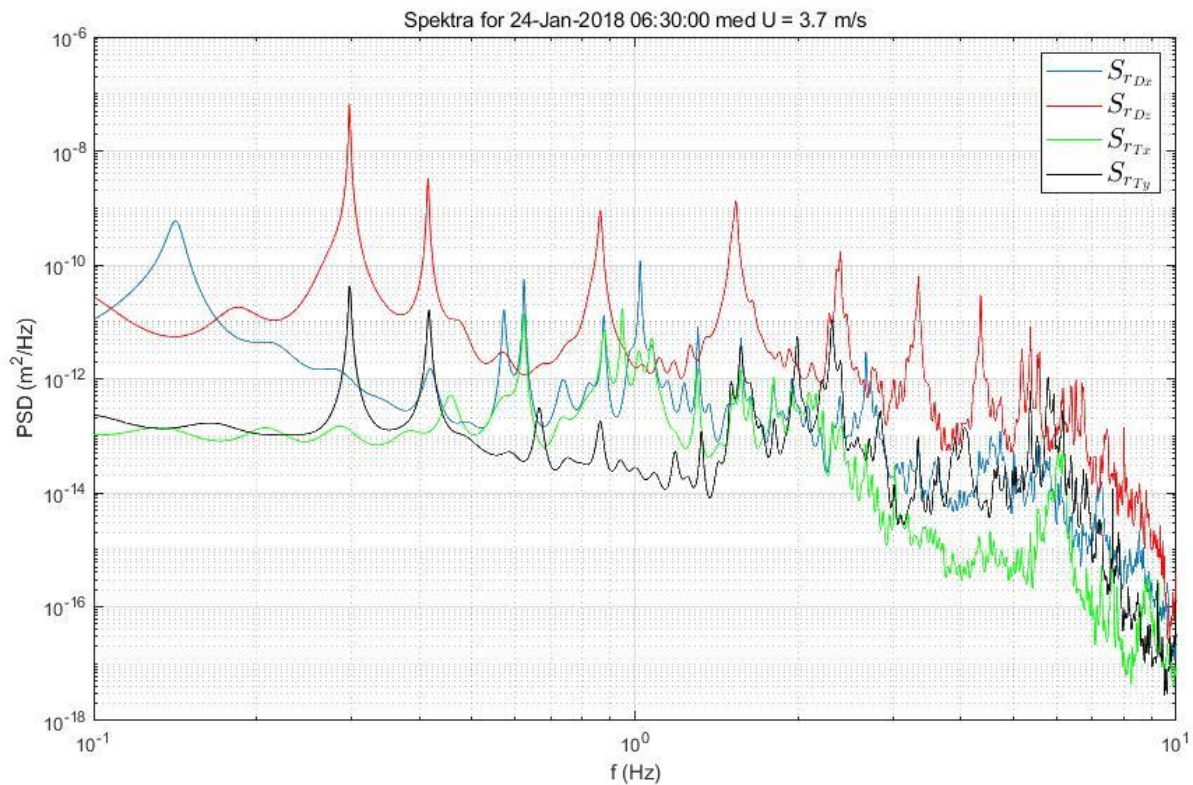
Figur 5.22 viser forskyvninger til brotårnet i tversgående og langsgående retning langs brodekket, og torsjon om brotårnets vertikale akse. Forskyvningen i langsgående retning har sammenheng med bevegelsene til brodekket i vertikal retning da akselerasjonstoppene oppstår ved samme tidspunkt. Noe som også kom fram i analysene om akselerasjonsrespons under forhold med trafikk og lite vind. Forskyvningen i langsgående retning til broaksen er noe større enn forskyvningen i tversgående retning. I alle tilfeller for brodekket og brotårnet er bevegelsene minimale, noe som kan stemmer overens med teorien i kapittel 3.1 om ulike faktorer som må til for å skape bevegelse i broen, blant annet energi fra høy nok vindhastighet til å danne bevegelse, i dette tilfellet er et tunge kjøretøy som skaper mest bevegelse i broen.



Figur 5.22 Tidsserie for forskyvning til brotårnet i tidsrommet 06.30-06.40 den 24.01.18. De ulike retningene som er vist (fra topp til bunn) er lateral (x), langsgående(y) og torsjonal om vertikal akse( $\theta$ )

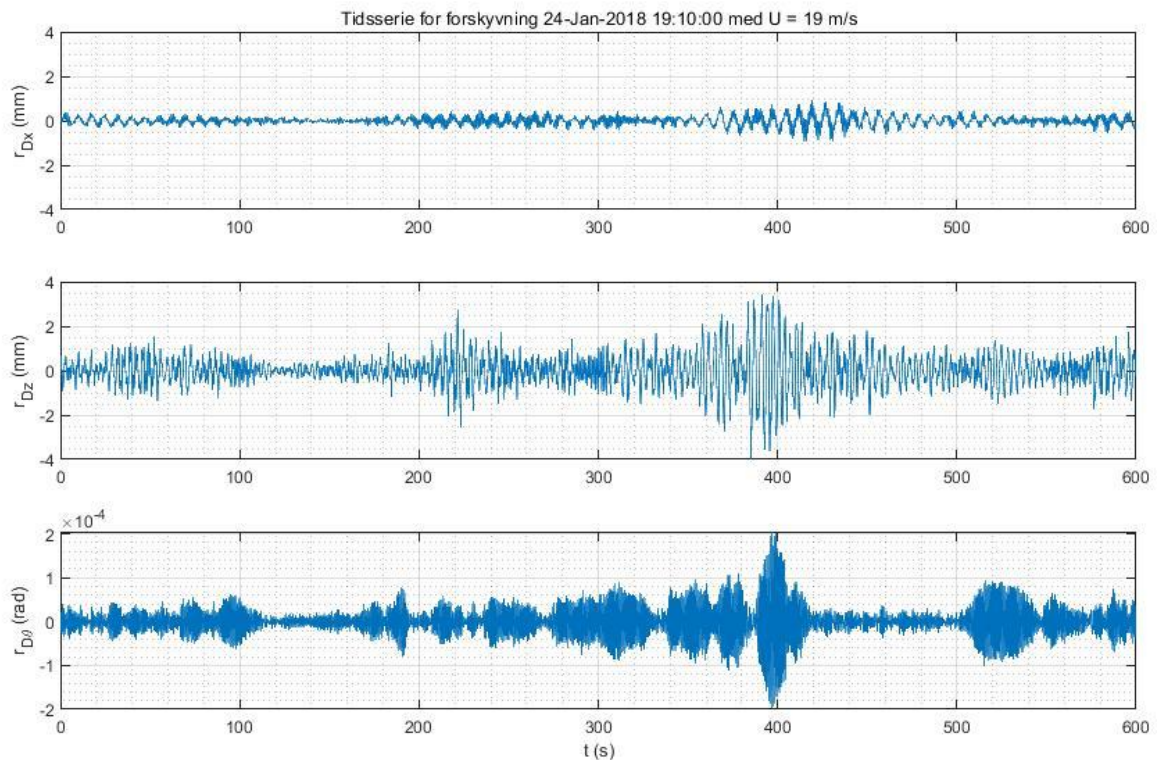


Figur 5.23 viser spektraltetthet for den vertikale og horisontale retningen til brodekket og brotårnets bevegelser på tvers og langsgående med brodekket under tidsserien med trafikk og lite vind. Ut fra analysen kan det tolkes en sammenheng mellom brodekkets vertikale respons og brotårnets langsgående respons på de relevante egenfrekvensene. De første responstoppe for brodekket vertikale respons og brotårnets langsgående ligger begge på rundt 0.3 Hz (VS1) og 0.4 Hz (VS2).



Figur 5.23 Spektra for forskyvning fra tidsrommet 06.30-06.40 den 24.01.18. Både vertikal og horisontal bevegelse i brodekket, og brotårnets lateral og langsgående retning langs brodekket.

## 5.4.2 Tidsserie med mye vind

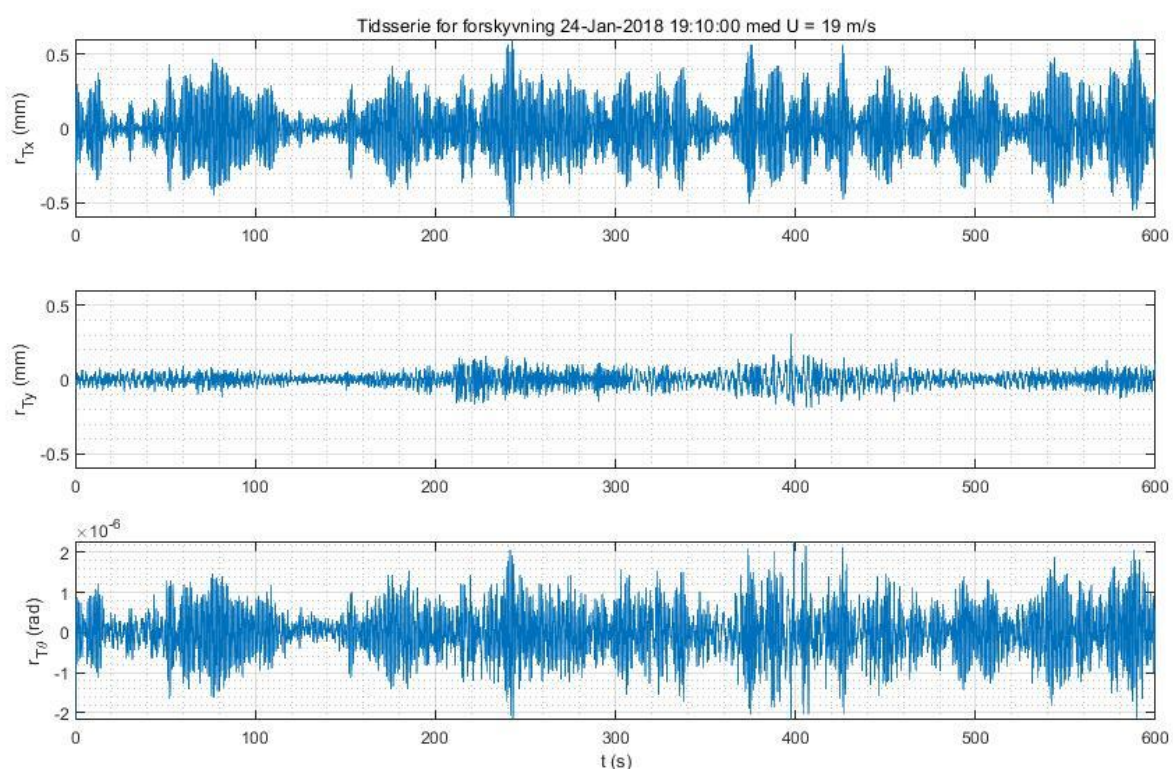


Figur 5.24 Tidsserie for forskyvning til brodekket i tidsrommet 19.10-19.20 den 24.01.18. De ulike retningene som er vist (fra topp til bunn) er lateral (x), vertikal (z) og torsjonal om langsgående akse( $\theta$ )

Figur 5.24 viser forskyvningen til brodekket under forhold med mye vind. Fra figur 5.21 og figur 5.24 ser man at den vertikale forskyvningen til brodekket er større under kraftig vindbelastning enn under trafikkbelastning og lite vind. Under kraftig vind er forskyvningen opp mot 4 mm, mens under trafikkbelastning er den 0.1 mm.

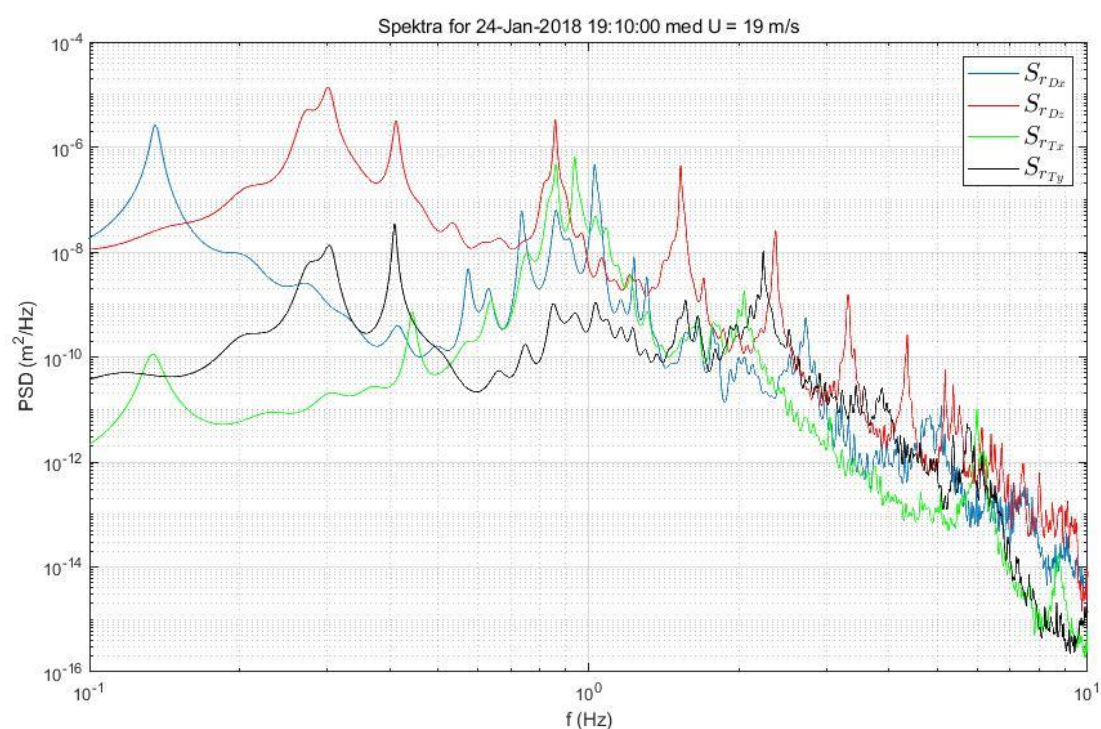
Den horisontale forskyvningen til brodekket er mindre enn den vertikale i begge tilfeller, men også i horisontale forskyvningen kan det observeres et større utslag under kraftig vind, der forskyvningen går opp mot 1 mm, under påvirkning av trafikk og lite vind går forskyvningen opp mot 0.02 mm, som er tilnærmet ingen bevegelse.

På figur 5.25 ser man forskyvningen til brotårnet under påvirkning av høy vindhastighet. Her ser man at ulikt tilfellet med trafikk og lite vind er det den brotårnets tversgående retningen av brodekket som har størst forskyvning. Da den laterale forskyvningen går opp mot 0.5 mm, ligger den langsgående forskyvningen til brotårnet rundt 0.2 mm. Ved å sammenligne torsjonen av vertikal akse fra tidsserien med trafikk og lite vind som ligger rundt  $3 \cdot 10^{-7}$  rad, mot tidsserien med mye vind som har en forskyvning opp mot  $2 \cdot 10^{-4}$  rad, kan man også se at bevegelsene er større under forhold med mye vind kontra trafikkpåkjenning.



Figur 5.25 Tidsserie for forskyvning til brotårnet i tidsrommet 19.10-19.20 den 24.01.18. De ulike retningene som er vist (fra topp til bunn) er lateral (x), langsgående (y) og torsjonal om vertikal akse( $\theta$ )

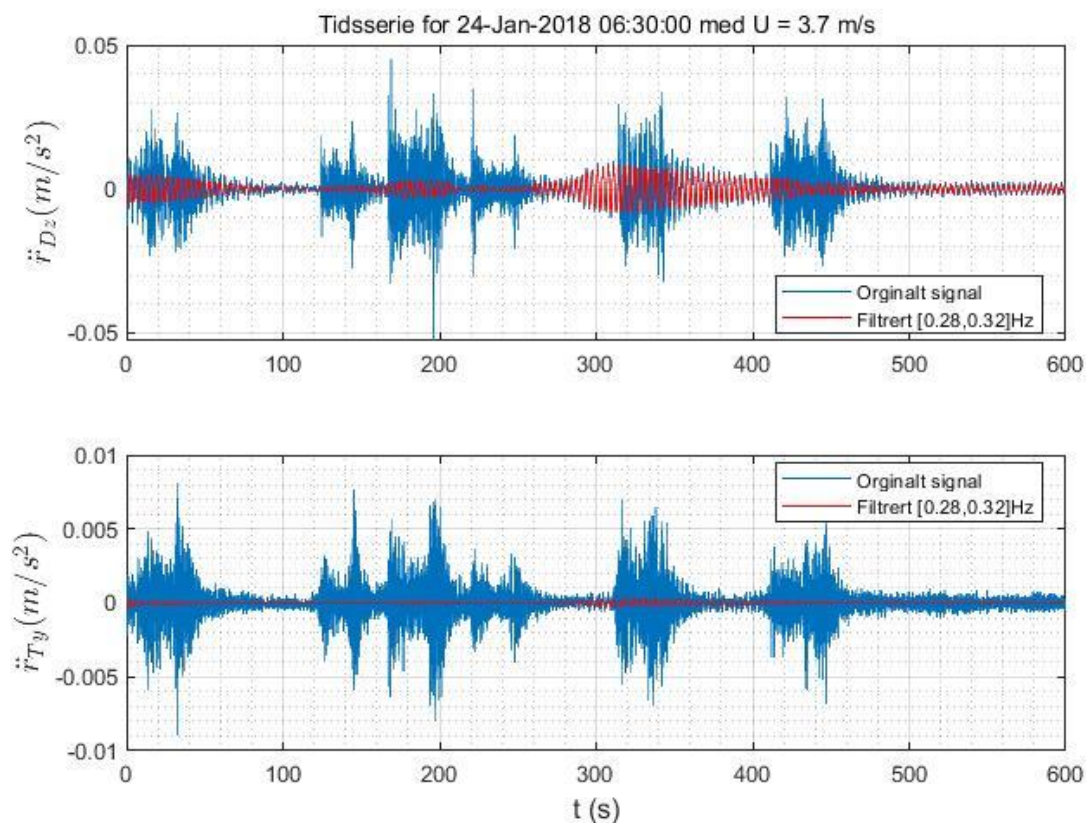
Figur 5.26 presenterer spektrum for tidsserien med kraftig vind, her ser man sammenheng mellom brotårnets respons i lengderetningen av broen og brodekkets vertikale respons, der likt tilfellet med trafikk og lite vind kan tolkes en sammenheng mellom de relevante egenfrekvensene, begge har topper når frekvensen er ca. 0.3 Hz (VS1) og 0.4 Hz (VS2). Den horisontale bevegelsen til brodekket og brotårnet har også samme første frekvenstopp ved ca. 0.13 Hz (HS1). Frekvenstoppene stemmer overens med tidligere presenterte analyser og verdiene i Tabell 4.1. Verdiene for spektraltetthet er under tilfellet med mye vind er høyere enn under tilfellet med trafikk og lite vind.



Figur 5.26 Spektra for forskyvning fra tidsrommet 19.10-19.20 den 24.01.18. Både vertikal og horisontal bevegelse i brodekket, og brotårnets lateral og langsgående retning langs brodekket.

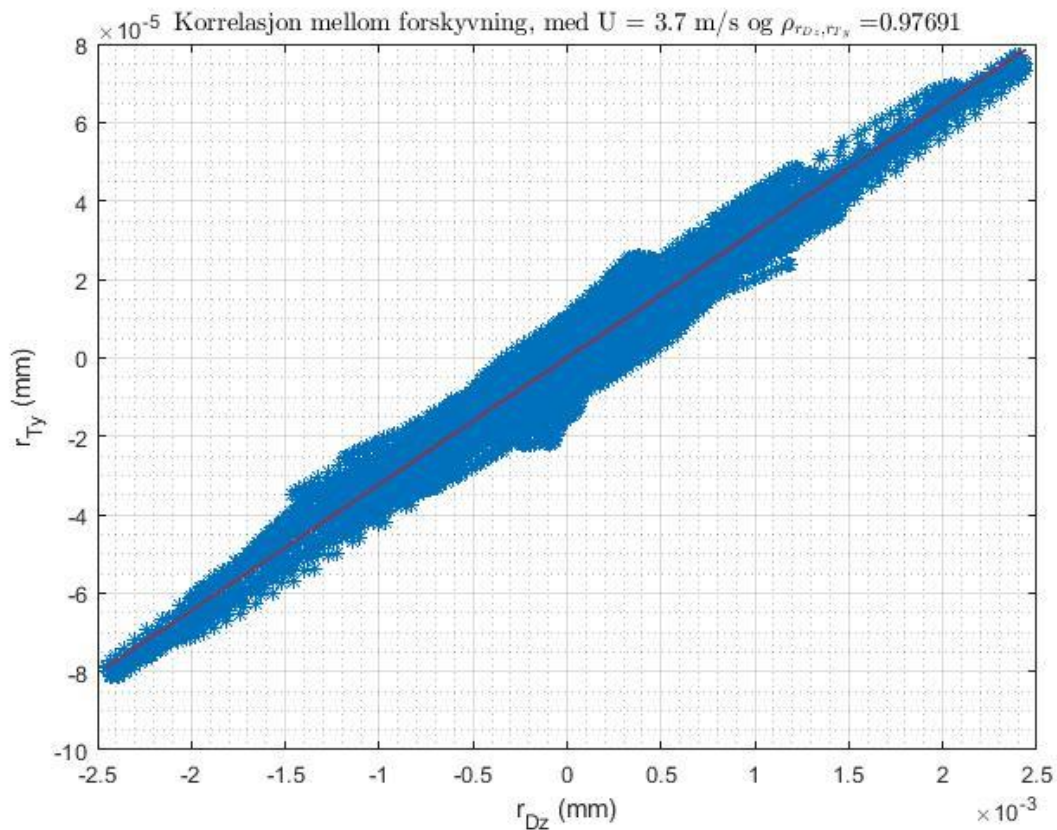
### 5.4.3 Korrelasjon

Det er utført en analyse for å se på korrelasjonen mellom brodekkets vertikale forskyvning og brotårnets forskyvning langsgående med brodekket. Her er det sett på de samme to tidsintervall som i analysene tidligere, en tidsserie med trafikk og lite vind og en tidsserie med mye vind. Før analysen ble gjennomført, ble måledataene båndpassfiltrert ved hjelp av MATLAB funksjonen «fir1» for å fjerne unødvendig støy og fokusere på området rundt frekvens på 0.3 Hz (VS1). Frekvensområdet er valg etter resultatene i spektraltettheten for forskyvning i de to valgte retningene, da både de vertikale forskyvningene til brodekket og brotårnets bevegelse langs brodekkets lengderetning hadde egenfrekvens innenfor dette området. Forskyvningene er plottet mot hverandre i et spredningsplot for å vise lineær sammenheng og korrelasjon mellom forskyvningene. I figur 5.27 er det presentert opprinnelig signal ved akselerasjon for brodekket og brotårnet, sammen med et filtrert signal av akselerasjonen til samme tidsserie.



Figur 5.27 Sammenligning mellom filtrert og opprinnelig respons for brodekkets vertikale retning og for brotårnets langsgående retning for tidsserien 06.30-06.40 den 24.01.18

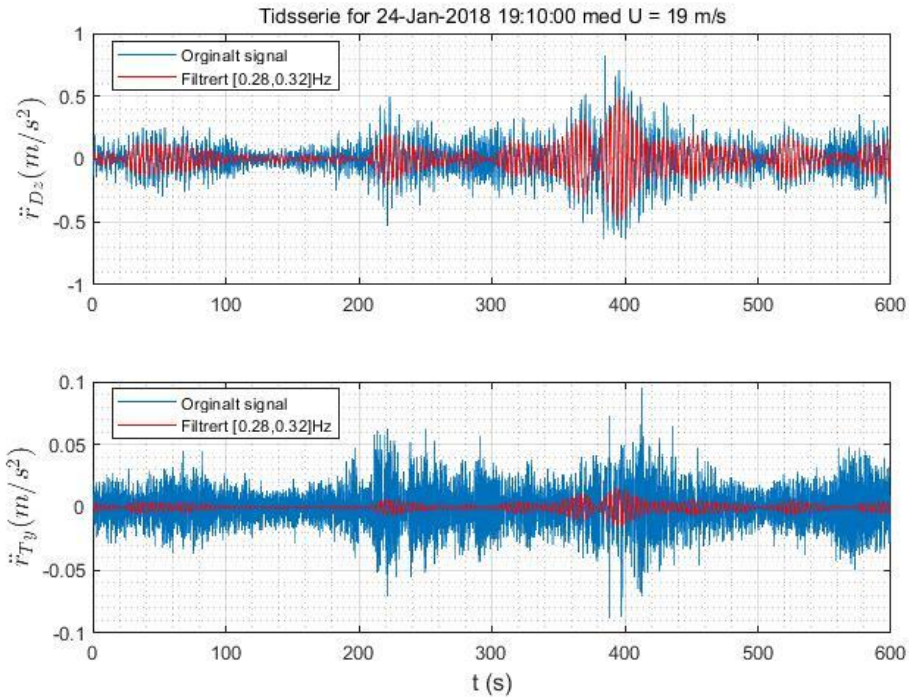
Figur 5.28 viser at i tilfellet med trafikk og lite vind er korrelasjonskoeffisienten 0.97691. Her vises en positiv samvariasjon og lineær sammenheng mellom de to brokomponentene.



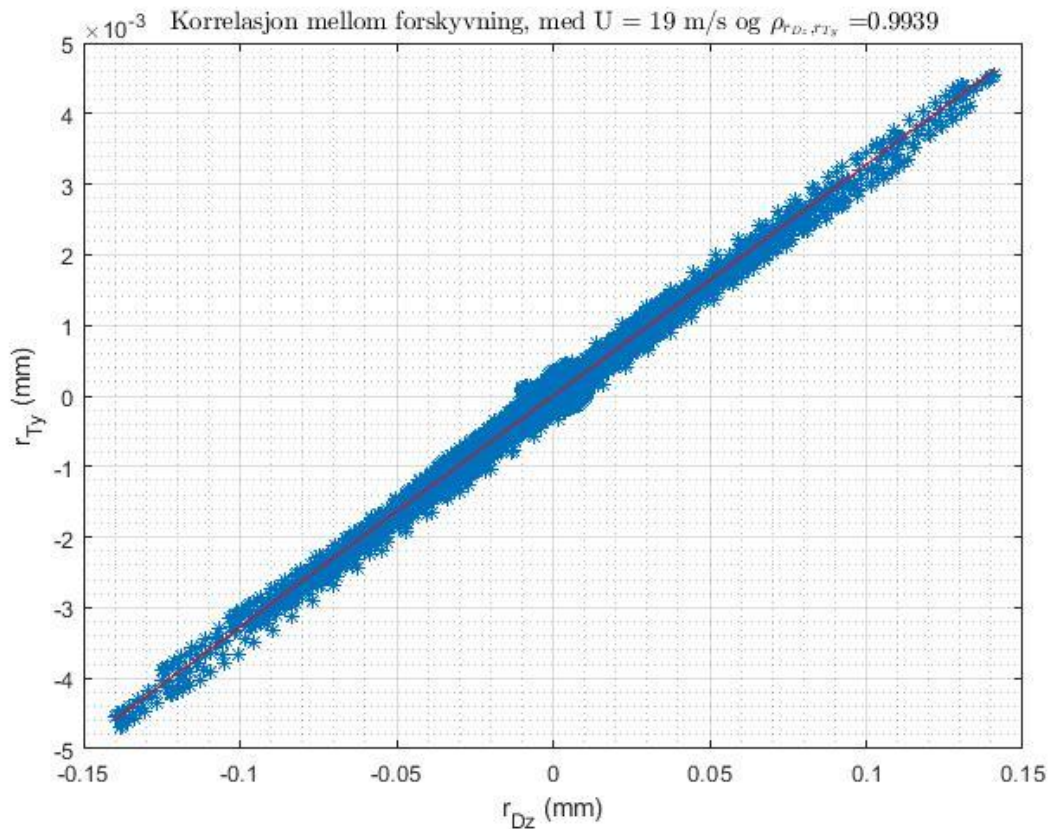
Figur 5.28 Korrelasjon mellom forskyvning til brodekkets vertikale bevegelse og brotårnets langsgående bevegelse under tidsrommet 06.30-06.40 den 24.01.18

Figur 5.29 viser forskjellen mellom originalt signal og det filtrerte signalet som brukes til å beregne korrelasjon mellom brodekket og brotårnet under forhold med mye vind. Figur 5.30 viser en lineær sammenheng mellom brodekkets vertikale bevegelse og brotårnets horisontale bevegelse under forhold med mye vind, og en korrelasjonskoeffisienten på 0.9939.

Da korrelasjonskoeffisientene for begge tilfellene er nær 1, kan det tolkes som det er en positiv sammenheng mellom bevegelsene til brodekket vertikale bevegelse og brotårnets bevegelse langsgående med broaksen. Korrelasjonskoeffisienten er noe lavere i tilfellet med trafikk og lite vind, dette kan komme av mindre bevegelse i broen på grunn av lite vind, som nevnt i kapittel 3.1 trengs det en høy nok vindhastighet til for å ha nok energi til å danne bevegelse.



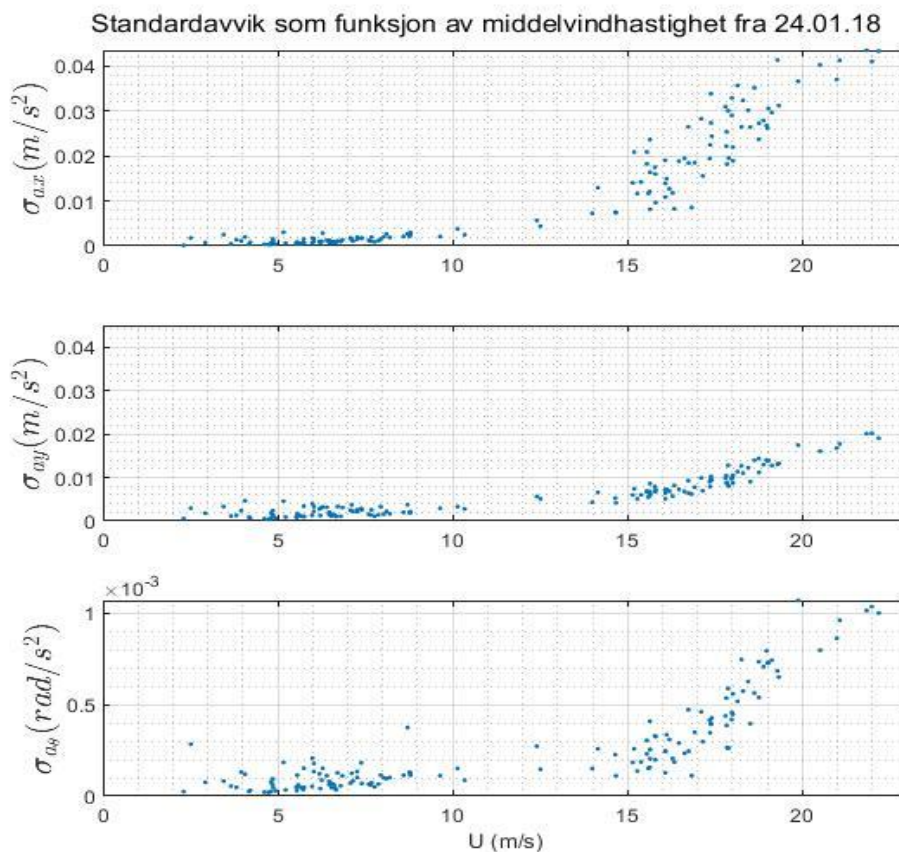
Figur 5.29 Sammenligning mellom filtrert og opprinnelig respons for brodekkets vertikale retning og for brotårnets langsgående retning for tidsserien 19.10-19.20 den 24.01.18



Figur 5.30 Korrelasjon mellom forskyvning til brodekkets vertikale bevegelse og brotårnets langsgående bevegelse under tidsrommet 19.10-19.20 den 24.01.18

## 5.5 Standardavvik av tårnakselerasjon ved ulike vindhastigheter

Det er utført analyse av standardavvik som funksjon av middelvindhastigheten fra den 24.01.18. Måledata gjennom dagen er delt i sekvenser med varighet på 10 minutter. For hver sekvens er middelvindhastigheten og standardavviket til brotårnakselerasjon beregnet. Det er tatt standardavvik av brotårn akselerasjonene i tversgående og langsgående retning langs brodekket og til rotasjonsakselerasjonen om den vertikale akse til brotårnet. Dette var en dag med variert vind, noe som viser igjen i figur 5.31 hvor det observeres variasjon i middelvindhastigheten gjennom dagen, hvert punkt på plottet representerer en sekvens på 10 minutter. Ut fra figuren ser man at bevegelsene er minimale under forhold med lite vind, men øker jevnt når vindhastighet overstiger ca. 15 m/s. Da spesielt brotårnets akselerasjon i tversgående retning for brodekket og rotasjonen om brotårnets vertikale akse. Responsen til brotårnet i langsgående retning er noe mindre enn de to andre analyserte retningene.



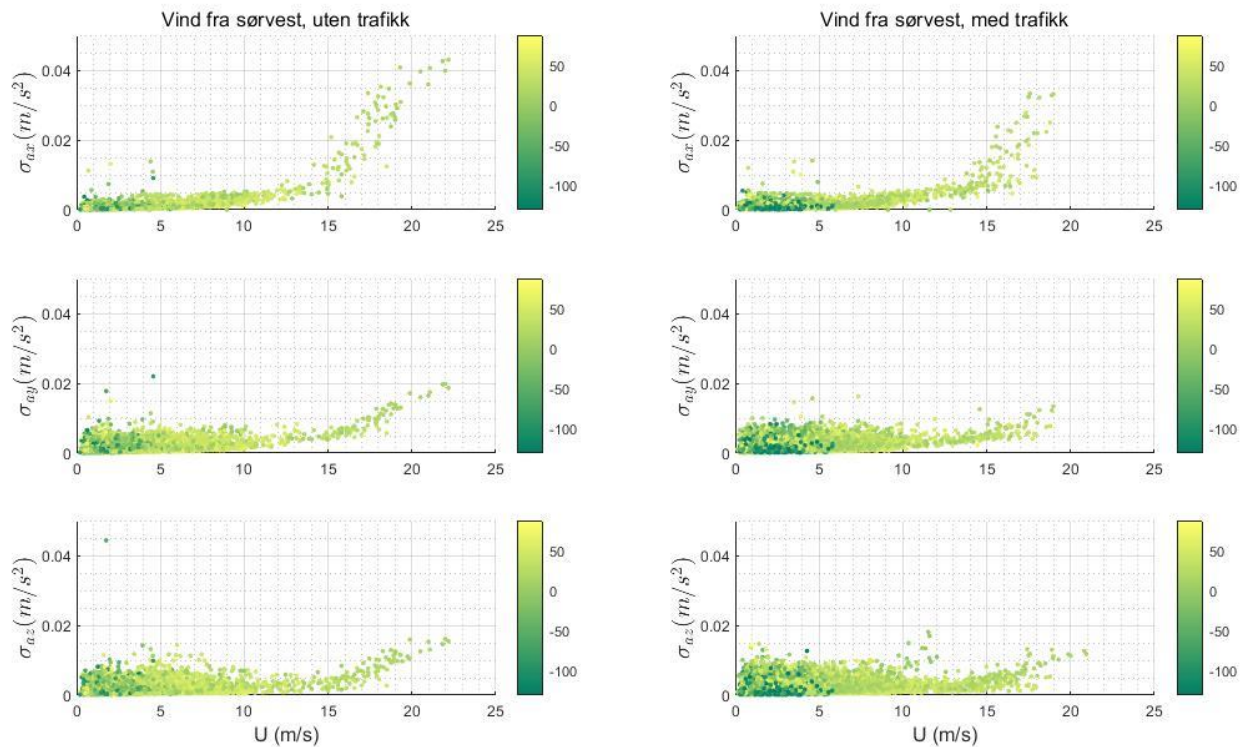
Figur 5.31 Standardavvik av akselerasjon fra brotårn den 24.01.18. De ulike retningene som er vist (fra topp til bunn) er lateral (x), langsgående (y) og torsjonal om vertikal akse( $\theta$ )



## 5.6 Standardavvik fra lengre tidsperiode

Det er i tillegg valgt å analysere data over en lengre måleperiode, måledataen som er brukt er registrert i perioden 10.07.17 – 29.06.18. Måledata gjennom perioden er delt i sekvenser med varighet på 10 minutter. For hver sekvens er horisontal middelvindhastigheten og standardavviket til brotårnakselerasjon beregnet. Standardavviket er regnet ut etter det er brukt funksjonen «trend» i MATLAB. Hensikten er å se på sammenhengen mellom brodekket horisontale bevegelser gjennom middelvindhastighet og brotårnets bevegelser ved hjelp fra standardavvik av akselerasjon til brotårnet over en lengre tidsperiode. Middelvindhastigheten er registrert ved anemometer plassert ved H18 på brodekket. Akselerasjonen til brotårnets respons er registrert ved hjelp av akselerometrene plassert på det nordvestlige tårnet. Det er som sagt i kapittel 4.1 to vindretninger som treffer brodekket, nordøst og sørvest. Det er tatt analyser av broresponen fra begge vindretningene. I denne analysen er det tatt hensyn til «yaw» vinkelen, her er  $0^\circ$  vinkelrett på den langsgående aksen til brodekket, både fra sørvest og nordøst siden, alt etter hvor analysen utføres. Det er utført to analyser fra hver vindretning, en hvor man har lagt inn kriteriet om trafikk har betydning på akselerasjonen, og en uten. Trafikkbetydning og «yaw» ( $\beta$ ) vinkel er tatt høyde for ved hjelp av koder i MATLAB utviklet av postdoktor Etienne Cheynet, se vedlegg B for MATLAB koder.

## 5.6.1 Vind fra sørvest



Figur 5.32 Standardavvik av akselerasjon som funksjon av middelvindhastighet. Fra tidsperiode juli 2017 til juni 2018

Figur 5.32 viser hvilken effekt vindhastigheten har på responsen til brotårnet, både med og uten trafikk betydning. Standardavvik av akselerasjonen er blitt målt i både x-, y- og z-aksen til brotårnet, som vil si langsgående langs brodekke, på tvers med brodekket og vertikalt med brodekket. Det viser største bevegelser når middelvindhastigheten (U) blir større enn 15 m/s for alle retninger, som vil si at når vinden øker, øker også svingningene i brotårnet.

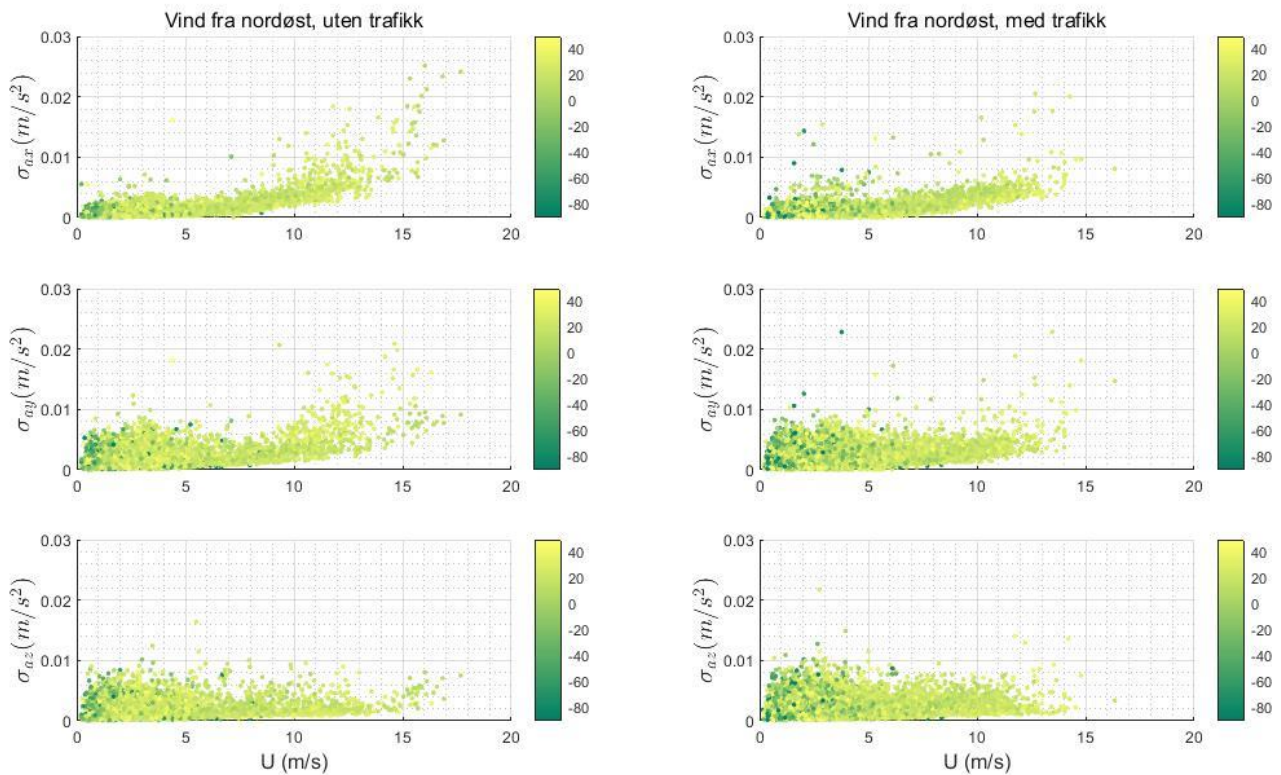
Standardavviket til akselerasjonene er størst i brotårnets bevegelser tversgående med brodekke. Figuren viser hvor «intense» brotårnet responderer uttrykt som standardavvik av akselerasjon som en funksjon av middelvindhastighet registrert på brodekket midt på brospennet.

Videre så kan man se fra fargeskalaen på figuren at de største avvikene til akselerasjonen oppstår når vindens angrepsvinkelen «yaw» nærmer seg 0°, som vil si at responsen er størst når vinden treffer vinkelrett på brodekket. Dette gjelder for tårnbevegelsene i alle retningene.

Ut fra figur 5.32 kan en også se at trafikk ikke har stor betydning for akselerasjonen til brotårnet, men at vinden blir den dominerende kraften for bevegelsene til brotårnet, lik som konklusjonen tidligere i kapittel 5.2 hvor man så på 10 minutters sekvens med trafikk og lite vind og 10 minutters sekvens med mye vind.

## 5.6.2 Vind fra nordøst

På samme måte som vind fra sørvest, er det sett på vind fra nordøst. Standardavvik til de samme aksene på brotårnet er blitt analysert, og angrepsvinkelen og trafikkpåvirkning er tatt høyde for. Man kan fra figur 5.33 se at resultatene er i stor grad de samme som når vinden treffer broen fra sørvest, men litt lavere verdier av standardavvik. Noe som indikerer at vind fra sørvest fører til noe større bevegelser i brotårnet enn vind fra nordøst. Standardavviket til tårnbevegelsene i tversgående og langsgående retning for brodekket øker også i dette tilfellet når vinden kommer opp i hastighet mellom 10-15 m/s, her kan det også observeres at vinden fra nordøst ikke har like høy middelvindhastighet, som vinden fra sørvest. Også i dette tilfellet er standardavvikene høyest når angrepsvinkelen til vinden står ca. vinkelrett på brodekket.

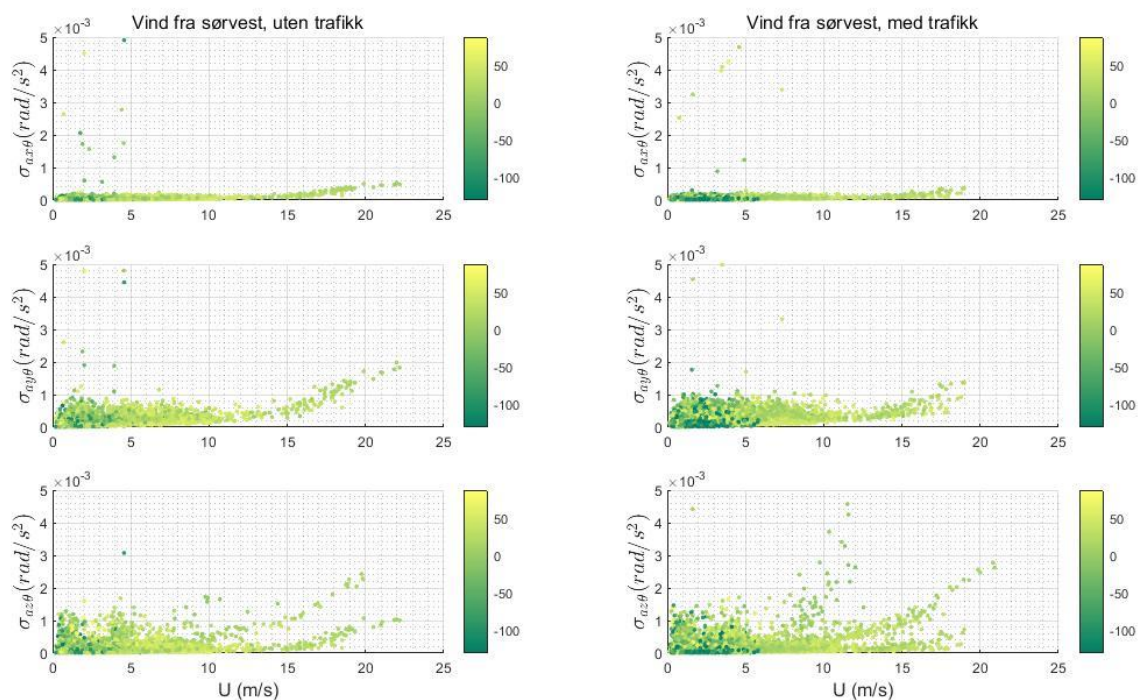


Figur 5.33 Standardavvik av akselerasjon som funksjon av middelvindhastighet. Fra tidsperiode juli 2017 til juni 2018

### 5.6.3 Rotasjon om tårnakser

Her er det også tatt utgangspunkt i den horisontale middelvindhastigheten som treffer brodekke ved sensor H18, og skaper vertikale bevegelser i brodekket.

Her ser man på brotårnets rotasjonsbevegelser rundt de tre aksene til tårnet; på tvers med brodekket, langsgående med brodekket og vertikalt med brodekket. Det er også her valgt å se på responsen i de ulike vindretningene sørvest og nordvest. Det er tatt hensyn til trafikken betydning og vindens angrepvinkel «yaw».

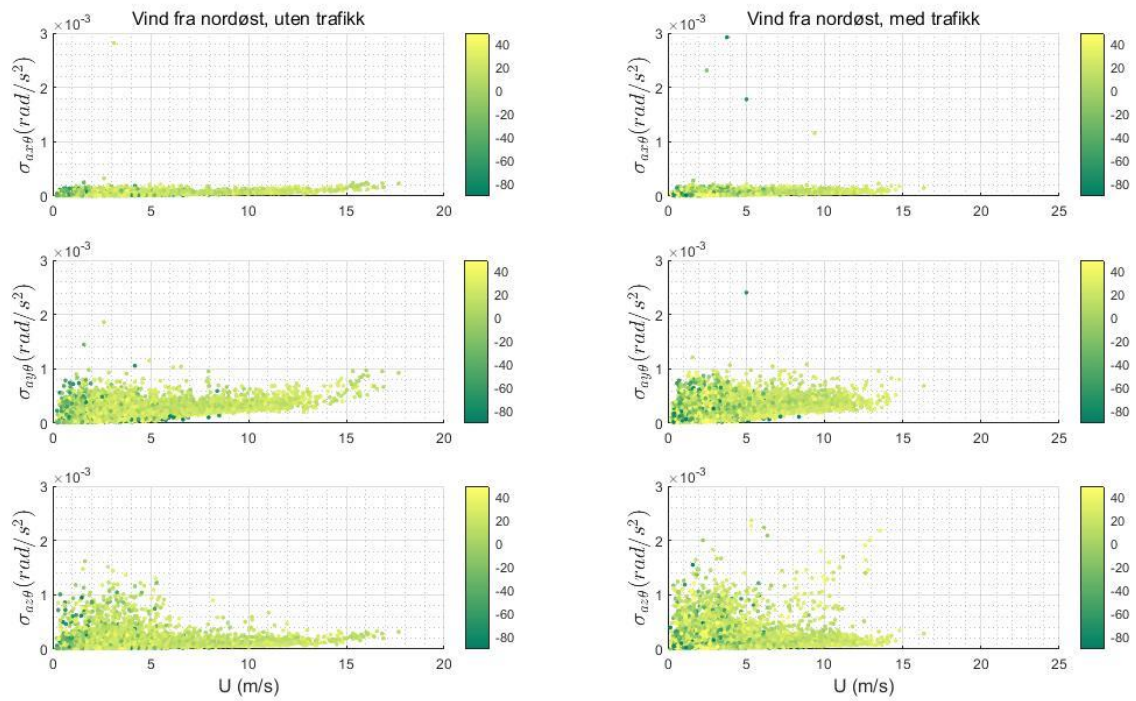


Figur 5.34 Standardavvik av akselerasjon. Rotasjon om henholdsvis x, y og z-aksen til brotårnet. Vind fra sørvest.

Fra figur 5.34 ser man standardavvikene til akselerasjonen når tårnet roterer om de ulike aksene x, y og z når vinden kommer fra sørvest. Her er det størst avvik i rotasjon om x- og z-aksen til brotårnet, og lite respons i rotasjonen om y-aksen. I tilfellet hvor trafikk er tatt høyde for kan en se en økt bevegelse i tårnrotasjon om vertikal akse under lavere vindforhold enn rotasjon om andre akser. Dette kan komme av tunge kjøretøy som gir vertikallast på en side, noe som gir rotasjon i brodekket, som føres videre via kablene til brotårnet.

Figur 5.35 viser standardavvikene til akselerasjonen til tårnrotasjonene når vinden kommer fra nordøst, her er det lave verdier av standardavvik i alle retninger. Også med vind fra nordøst kan en observere samme trend i rotasjonen om vertikal akse i tilfellet med trafikk som nevnt ovenfor i analysen om tårnrotasjon med vind fra sørvest, hvor det kan tolkes som økt bevegelser i tilfeller med lavere vindhastighet. Fra tidligere har vi sett at vinden fra nordøst

ikke kommer opp i samme vindhastighet som vinden fra sørvest. Da det ikke er så mange tilfeller med middelvindhastighet over 15 m/s i middelvindhastighet i vind fra nordøst, som når vinden kommer fra sørvest.



Figur 5.35 Standardavvik av akselerasjon. Rotasjon om henholdsvis x, y og z-aksen til brotårnet. Vind fra Nordøst.

## 6 Konklusjon

I denne oppgaven er det sett på sammenhengen mellom brotårnet og brodekkets svingninger, og hvordan brotårnets bevegelser endres med vindhastigheten. Dette ble utført ved å se på tidligere måledata fra sensorene utplassert på Lysefjordbroen, og analysere disse ved hjelp av MATLAB. Det er blitt utført forskjellige analyser, det er sett på akselerasjonsrespons, forskyvning, spektraltetthet og korrelasjon over korte tidsserier. Det er valgt å se på brodekkets vertikale og horisontale respons, og torsjon om langsgående akse til brodekket. Brotårnets respons i retningen langsgående og tversgående med broens lengdeakse, og torsjon om brotårnets vertikale akse. Det er i tillegg tatt analyser av standardavvik av brotårnets akselerasjon mot middelvindhastighet for både en dag, og over en lengre tidsperiode.

Ut fra analysene fra akselerasjonsresponsen viser det at vind har større utslag for broens svingninger enn trafikkbelastning. Under forhold med trafikk og lite vind viste sammenheng mellom tårn og kabelkraften forårsaket av vibrasjoner i brodekket grafisk bedre, enn under forhold med mye vind. Ved økt vind økte brotårnet bevegelser i både tversgående og langsgående retning for brodekket, da spesielt i tversgående retning for broaksen. Den økte bevegelsen i tversgående retning kan skyldes at kablene ikke lenger har den samme dominerende kraften lenger.

De presenterte resultatene dokumenterer sammenheng mellom brodekkets vertikale bevegelse og brotårnets bevegelse i broens lengderetning. Korrelasjonskoeffisienten viste en positiv samvariasjon i både tidsserien med trafikk og lite vind og tidsserien med mye vind, da de vertikale bevegelsene til brodekket fører til endring i kabelkreftene, og dermed «drar» tårnet med seg i bevegelsene langs broaksen. Analysen av spektraltetthet viste sammenheng mellom de vertikale symmetriske svingeformen for brodekket midt på brospennet og bevegelsene til brotårnet på de relevante egenfrekvensene.

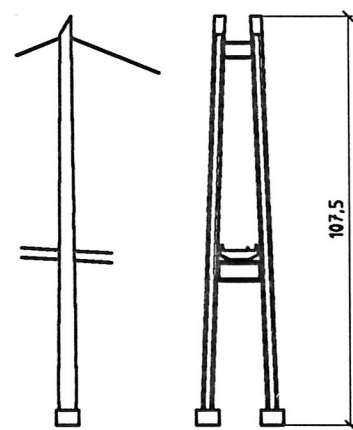
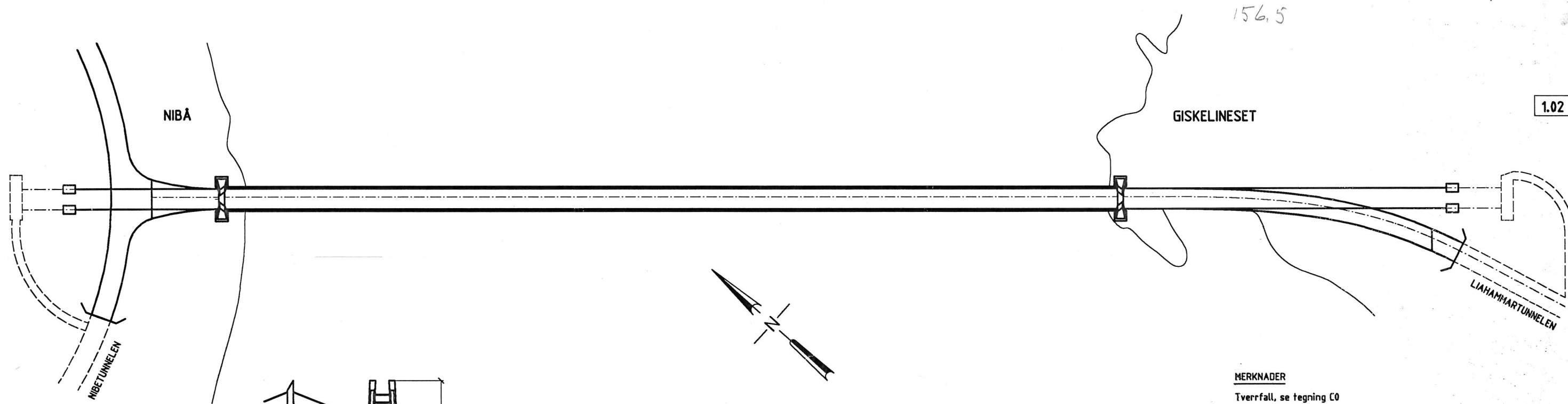
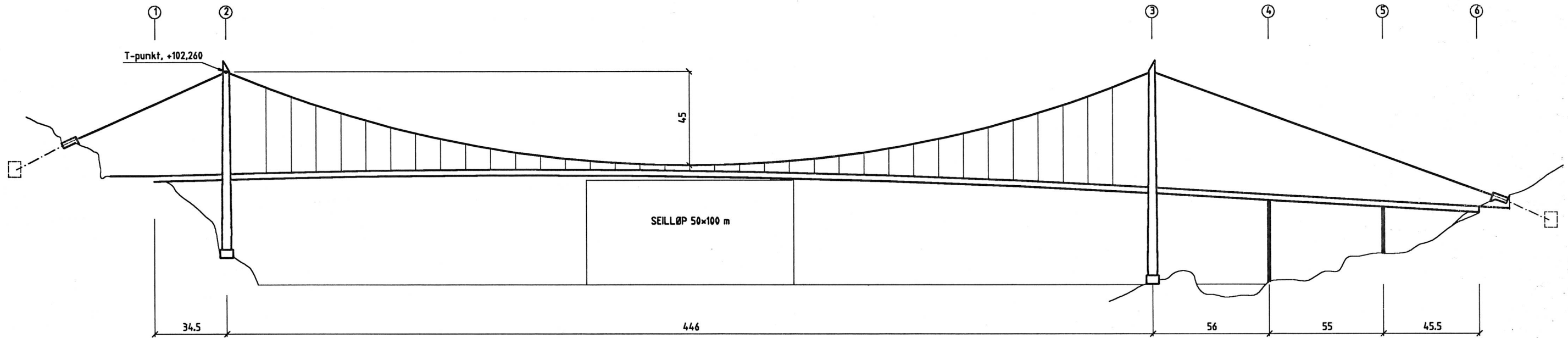
Resultatene fra analysene med standardavvik som funksjon av middelvind viste hvordan brotårnet responderte på bevegelsene til brodekket, her viste det en sammenheng med lite bevegelse under forhold med lite vind, med en jevn økning når vindhastigheten oversteg 15 m/s, da spesielt brotårnet respons i tversgående retning for brodekket.

## Referanser

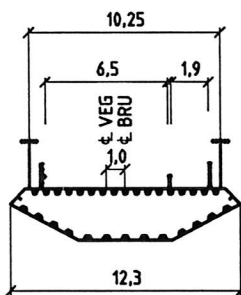
- [1] broer.no. (2019). *Hengebroer*. Hentet fra: <http://broer.no/liste/hengebroer/> Lastet ned: 25.05.2019
- [2] J. B. Jakobsen, "Lecture notes from environmental loads; Wind load on structures," UiS, Stavanger 2013.
- [3] Y. L. Xu, *Wind Effects on Cable-Supported Bridges*. Singapore: John Wiley & Sons Inc, 2013.
- [4] Google maps. (2019). *Lysefjordbroen*. Hentet fra: <https://www.google.com/maps/@58.9239108,6.1007071,14.96z> Lastet ned: 09.05.2019
- [5] N. J. Gimsing and C. T. Georgakis, *Cable supported bridges : concept and design*, 3rd ed. ed. Chichester, U.K.: John Wiley & Sons, 2012.
- [6] J. T. Snæbjörnsson, J. B. Jakobsen, E. Cheynet, and J. Wang, "Full-scale monitoring of wind and suspension bridge response," *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 276, pp. 1-13. doi: 10.1088/1757-899X/276/1/012007
- [7] J. D. Holmes, *Wind loading of structures*, 3. utg. London: Taylor & Francis, 2015.
- [8] Statens vegvesen. (2018). *Ferjefri E39*. Hentet fra: <https://www.vegvesen.no/Vegprosjekter/ferjefriE39> Lastet ned: 02.05.2019
- [9] broer.no. (2019). *Hengebroer: Lengste spenn*. Hentet fra: <http://broer.no/liste/hengebroer/spenn> Lastet ned: 21.04.2019
- [10] C. Dyrbye and S. O. Hansen, *Wind loads on structures*. Chichester: Wiley, 1997.
- [11] N. Standard, *Eurokode 1: Laster på konstruksjoner = Eurocode 1: Actions on structures. Part 1-4: General actions. Wind actions : Del 1-4 : Allmenne laster. Vindlaster* (Eurocode 1: Actions on structures. Part 1-4: General actions. Wind actions). Lysaker: Standard Norge, 2009.
- [12] E. Simiu and R. H. Scanlan, *Wind effects on structures : fundamentals and applications to design*, 3rd ed. ed. New York: Wiley, 1996.
- [13] Statens vegvesen, *Håndbok N400: Bruprosjektering*. 2015.
- [14] H. Wenzel, *Health monitoring of bridges*. Chichester: John Wiley & Sons Inc, 2009.
- [15] H. G. Bu, X. B. Huang, J. Wang, and X. Chen, "Detection of Fabric Defects by Auto-Regressive Spectral Analysis and Support Vector Data Description," *Textile Research Journal*, vol. 80, no. 7, pp. 579-589, 2010.
- [16] E. Cheynet, m. Universitetet i Stavanger Institutt for konstruksjonsteknikk og, and S. Universitetet i, "Wind-induced vibrations of suspension bridge : a case study in full-scale," no. 326, University of Stavanger, Faculty of Science and Technology, Department of Mechanical and Structural Engineering and Materials Science, Stavanger, 2016.
- [17] (2019). *Gill Instruments: meteorological technology*. Hentet fra: <http://gillinstruments.com/products/anemometer/windmaster.htm#sonicanemometer> Lastet ned: 18.04.2019
- [18] K. H. Aronsen, "Analyse av vind- og responsmålinger av en hengebro med hovedvekt på sammenheng mellom brotårnets og brodekkets svingninger," Faculty of Science and Technology, Department of Mechanical and Structural Engineering and Materials Science, Universitetet i Stavanger, 2018.
- [19] R. Steigen, "Modeling and analyzing a suspension bridge in light of deterioration of the main cable wires," Master Mechanical and Structural Engineering, Faculty of Science and Technology, Department of Mechanical and Structural Engineering and Materials Science, Universitetet i Stavanger, 2011.
- [20] C. Greene. (2015). *filter1*. Hentet fra: <https://se.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/53534-filter1> Lastet ned: 21.05.2019

# Vedlegg A

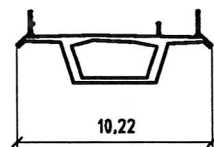
Profilnr	0.000	10.500	45.000	268.000	491.000	501.866	626.271	636.349	647.500	688.176
Horisontalkurvatur				R=∞		A=157.738		R=200	A=101.81	R=∞
Vertikalkurvatur	25.71‰			R=5250						
Kotehøyde	52.31	52.58	53.465	54.472		46.001				36.74



TÅRN SØR  
Mål 1:1000



TVERRSNITT HENGESPENN  
Mål 1:200



TVERRSNITT VIADUKT  
Mål 1:200

MERKNADER  
Tverrfall, se tegning C0

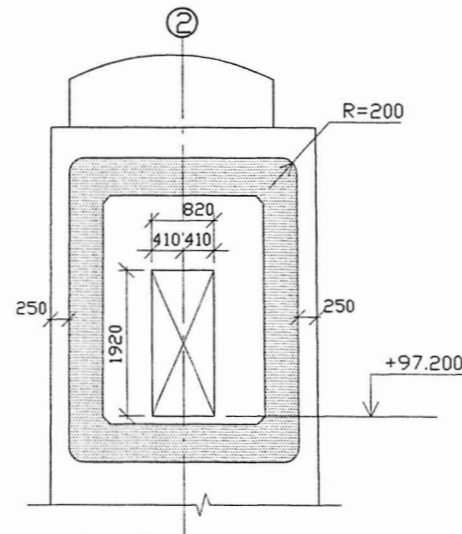
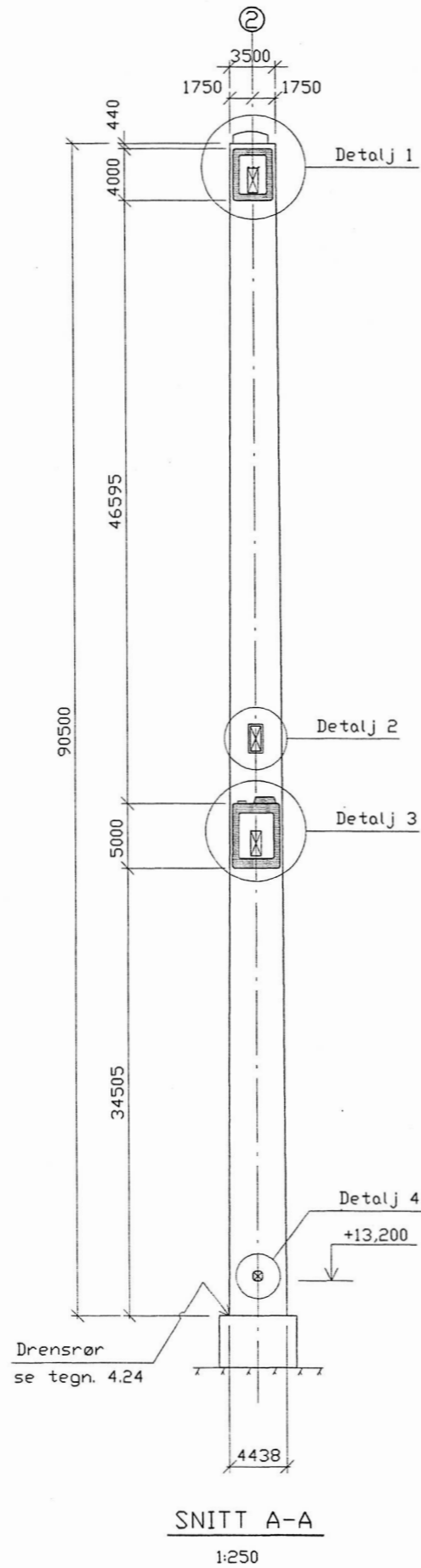
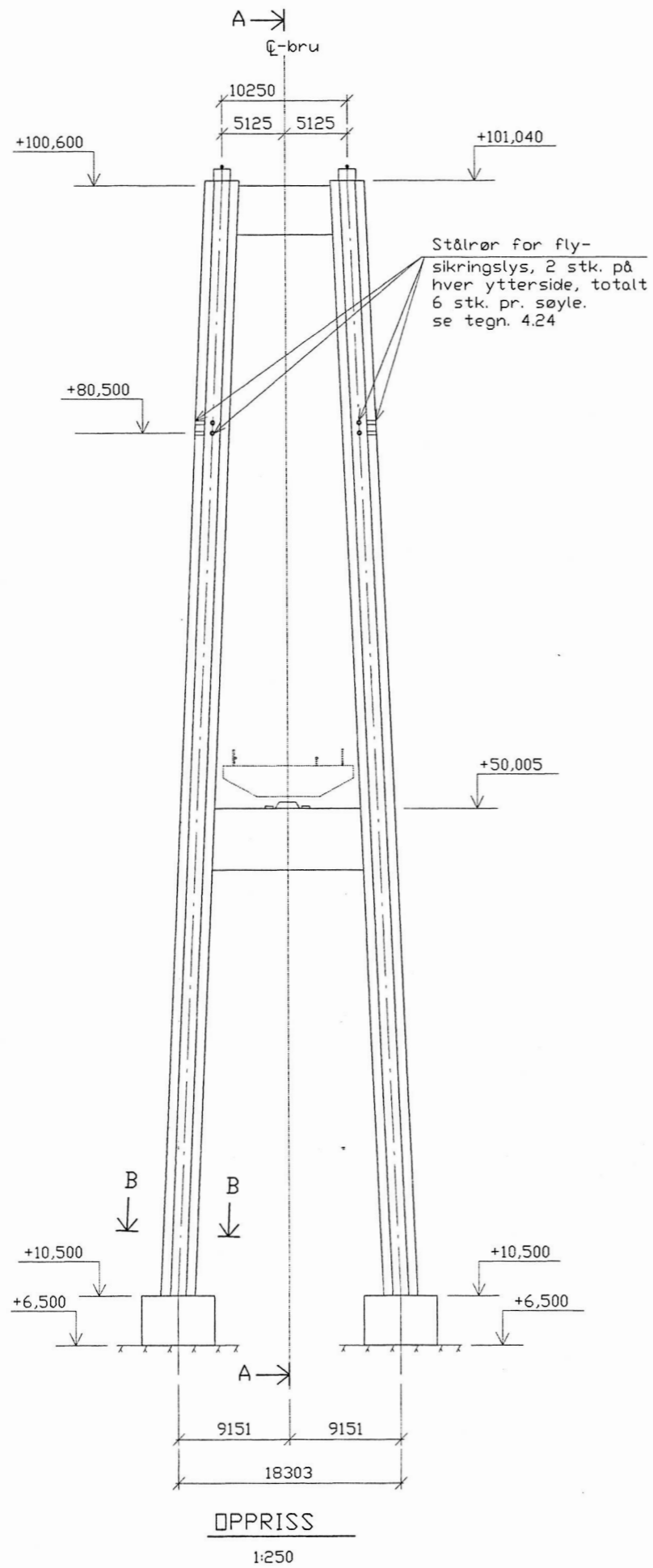
Dato	Revisjon	Merke	Revisjon	Kfr.
13.02.96	Arbeidstegning	D	PHS	JTJ
01.02.96	Stålanbud	C	PHS	
14.12.95	Gangbaneløp, kotehøyde	B	PHS	
18.09.95	Planumskote ved søndre tårn	A	PHS	
17.06.95	Anbud	Q	PHS	
<b>STATENS VEGVERKEN</b>				
Målestokk	Tegnr.	PHS	03.02.96	
1:200	Kfr.	JTJ	14.02.96	
1:1000	Trac.	PHS	03.02.96	
Mål 1	Kfr.	PHS	14.02.96	
m	PL	PHS		
Ersattningsfor/av: blad nr 136				
Blad nr.	Tegn. nr.	Rev.		
1.02	33/94	D		
Ident: LY-102 Acc nr: 163				

Oversikt  
Viadukt alt. 2: Betong

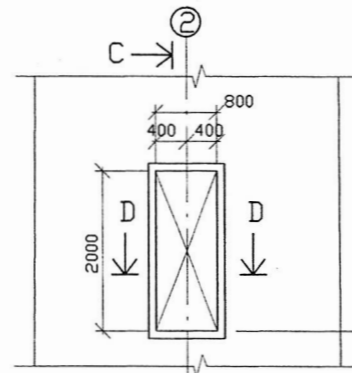
Vegdirektoratets bruavdeling, Oslo, den 14.02.96  
Hans Thomas Øderud (sign)

Arne Vangsnes (sign)

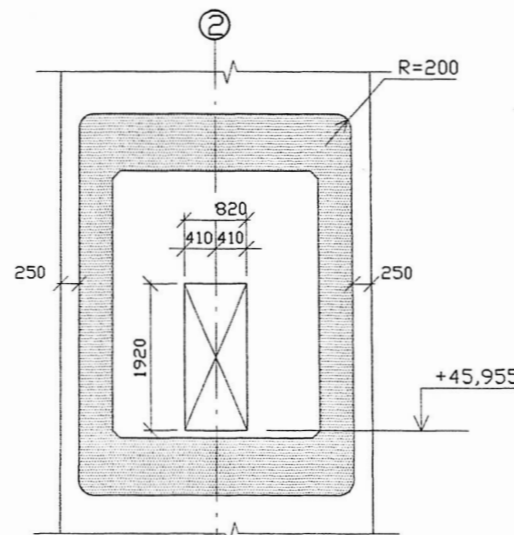




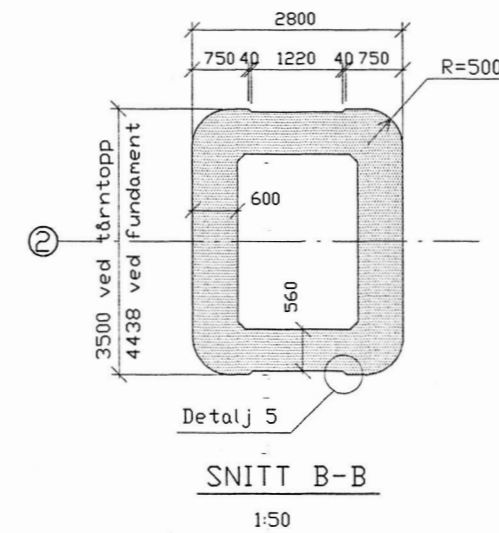
DETALJ 1  
Dørutsparinger, topprigel  
begge søyler  
1:50



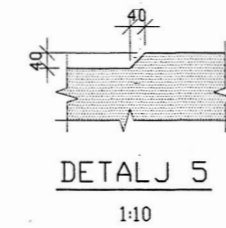
DETALJ 2  
Dørutsparing, kun  
tårnsøyle vest  
1:50



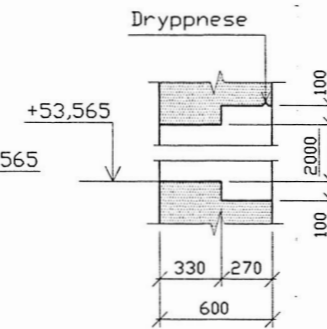
DETALJ 3  
Dørutsparinger, planumsrigel  
begge tårnsøyler  
1:20



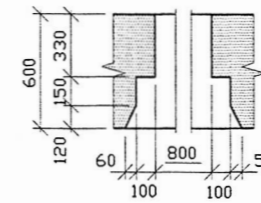
SNITT B-B  
1:50



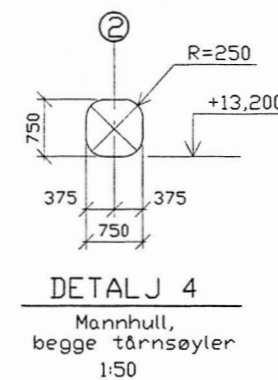
DETALJ 5  
1:10



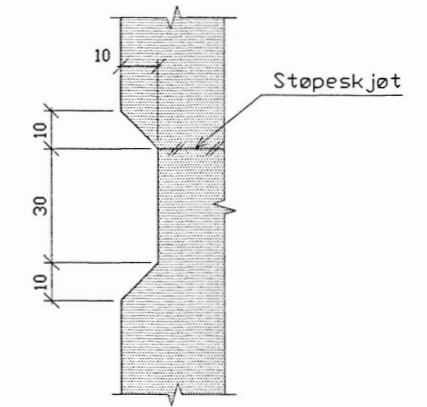
SNITT C-C  
1:20



SNITT D-D  
1:20



DETALJ 4  
Mannhull,  
begge tårnsøyler  
1:50



RILLE VED STØPE-  
SKJØT I SØYLER  
1:1

**MERKNADER**

Miljøklasse MA NS,3473  
Kontrollklasse Utvidet kontroll NS 3420  
Utvendige hjørner på tårnsøyler avrundes med radius R=500 mm.  
Innvendig avfasing: 100 mm.  
Utvendige hjørner på rigler avrundes med radius R=200 mm.  
Innvendig avfasing: 100 mm.  
Vertikale hjørner på fundament avrundes med R= 500 mm

**BETONG**

Fundament  
Fasthetsklasse: C35  
Masseforhold: m≤0,50  
D<sub>100</sub> = 27 mm, D<sub>100</sub> = 16 mm ved tett armering  
Porevolum: 5±1,5%  
Søyler og rigler  
Fasthetsklasse: C55  
Masseforhold: m≤0,40  
D<sub>100</sub> = 27 mm, D<sub>100</sub> = 16 mm ved tett armering  
Porevolum: 4±1,0%

**ARMERING**

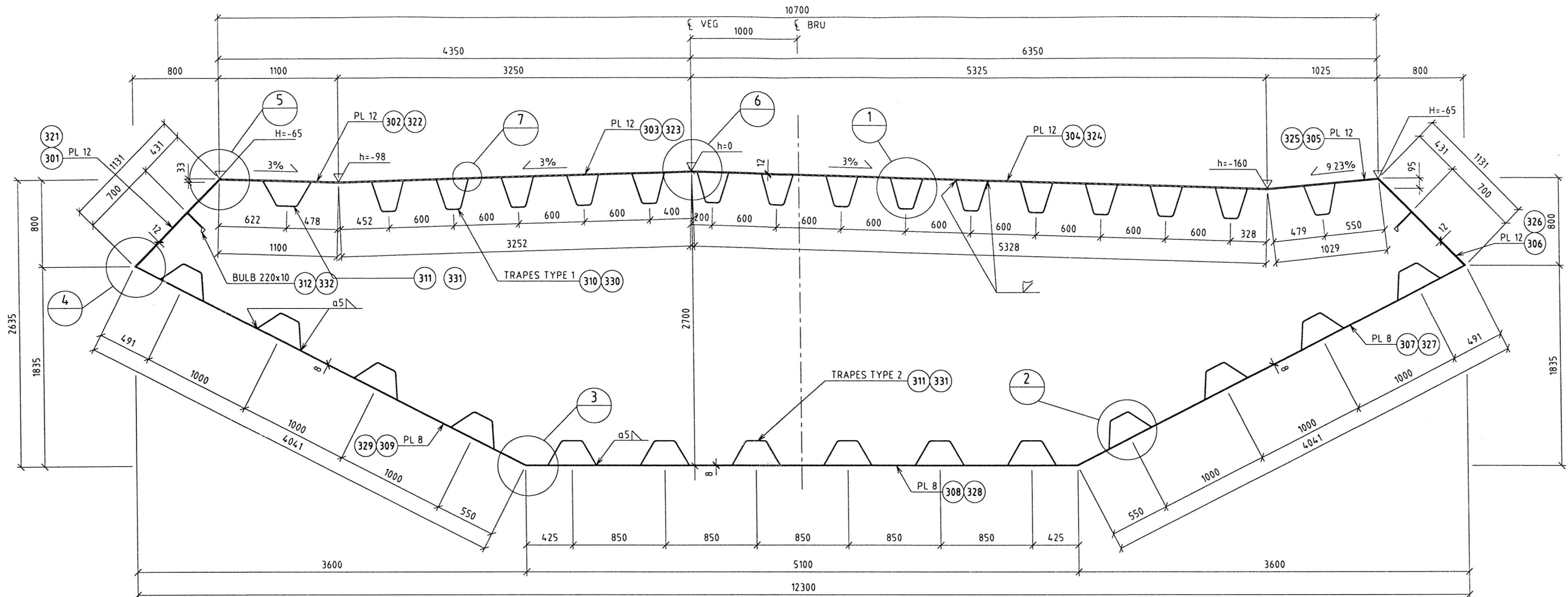
Slakkarmering K500 TE  
Spennarmering:  
Flytekræft F<sub>0,2</sub> er den kraft i kabelen som tilsvarer flytespenning, eller den spenningen som gir 0,2 % permanent tøyning i stålet  
Rigler: F<sub>0,2</sub> = 2004 kN pr kabel  
Oppspenningskraft 0,8xF  
Fjellanker: F<sub>0,2</sub> = 3173 kN pr kabel  
Oppspenningskraft 0,7xF

**HENVISNINGER**

Topp- og planumsrigel, se blad nr. 4.07 og 4.08  
Armering søyler, se blad nr. 4.05, 4.06 og 4.11  
Fundament, se blad nr. 4.03  
Innstøpingsgods, se teg. 4.24

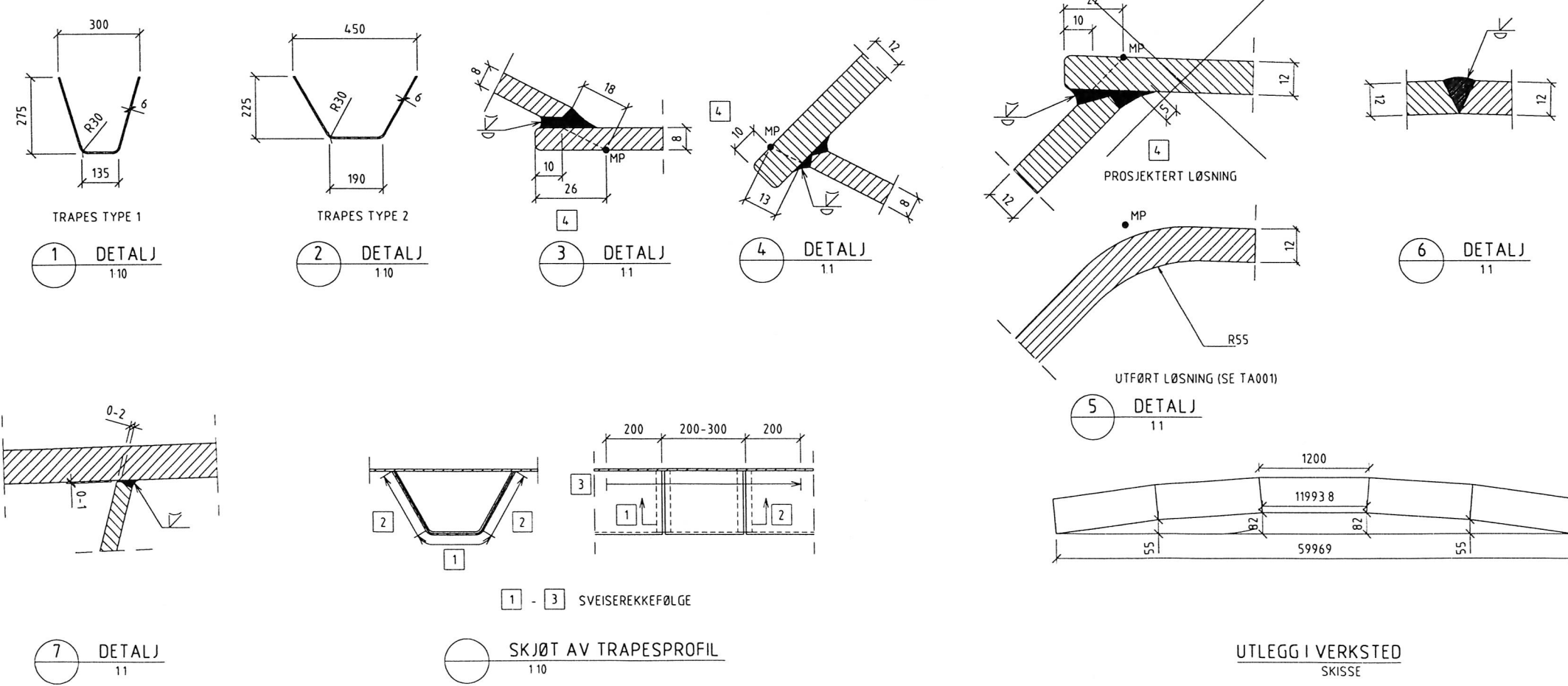
01.07.97	Som bygget	D	EL	LBB																														
23.05.96	Dørutsparing, Div rørutsp	C	EL	LBB																														
25.10.95	Arbeids-tegning	B	SW	OK																														
18.09.95	Fundamentplassering, Koteh. pl. rigel	A	PHS																															
29.06.95	Anbud	O	PHS																															
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Dato</th> <th>Revisjon</th> <th>Merke</th> <th>Rettst</th> <th>Kfr</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="5"><b>STATENS VEGVESEN</b></td> </tr> <tr> <td>Målestokk</td> <td>1:250</td> <td>Tegn.</td> <td>08.03.95</td> <td>PHS</td> </tr> <tr> <td>Blad nr</td> <td>150</td> <td>Ktr.</td> <td>10.95</td> <td>OK</td> </tr> <tr> <td>Mål i mm</td> <td>1:10.11</td> <td>Trac.</td> <td>08.03.95</td> <td>TOJ</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Ktr. Pl.</td> <td>10.95</td> <td>PHS</td> </tr> </tbody> </table>					Dato	Revisjon	Merke	Rettst	Kfr	<b>STATENS VEGVESEN</b>					Målestokk	1:250	Tegn.	08.03.95	PHS	Blad nr	150	Ktr.	10.95	OK	Mål i mm	1:10.11	Trac.	08.03.95	TOJ			Ktr. Pl.	10.95	PHS
Dato	Revisjon	Merke	Rettst	Kfr																														
<b>STATENS VEGVESEN</b>																																		
Målestokk	1:250	Tegn.	08.03.95	PHS																														
Blad nr	150	Ktr.	10.95	OK																														
Mål i mm	1:10.11	Trac.	08.03.95	TOJ																														
		Ktr. Pl.	10.95	PHS																														
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4.01</td> <td>129/95</td> <td>D</td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	4.01	129/95	D																								
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
4.01	129/95	D																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11-1737</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	11-1737																										
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
11-1737																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4.01</td> <td>129/95</td> <td>D</td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	4.01	129/95	D																								
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
4.01	129/95	D																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11-1737</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	11-1737																										
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
11-1737																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4.01</td> <td>129/95</td> <td>D</td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	4.01	129/95	D																								
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
4.01	129/95	D																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11-1737</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	11-1737																										
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
11-1737																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4.01</td> <td>129/95</td> <td>D</td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	4.01	129/95	D																								
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
4.01	129/95	D																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11-1737</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	11-1737																										
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
11-1737																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4.01</td> <td>129/95</td> <td>D</td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	4.01	129/95	D																								
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
4.01	129/95	D																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11-1737</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	11-1737																										
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
11-1737																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4.01</td> <td>129/95</td> <td>D</td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	4.01	129/95	D																								
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
4.01	129/95	D																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11-1737</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	11-1737																										
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
11-1737																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4.01</td> <td>129/95</td> <td>D</td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	4.01	129/95	D																								
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
4.01	129/95	D																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11-1737</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	11-1737																										
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
11-1737																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4.01</td> <td>129/95</td> <td>D</td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	4.01	129/95	D																								
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
4.01	129/95	D																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11-1737</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	11-1737																										
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
11-1737																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4.01</td> <td>129/95</td> <td>D</td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	4.01	129/95	D																								
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
4.01	129/95	D																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11-1737</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	11-1737																										
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
11-1737																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4.01</td> <td>129/95</td> <td>D</td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	4.01	129/95	D																								
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
4.01	129/95	D																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11-1737</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	11-1737																										
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
11-1737																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4.01</td> <td>129/95</td> <td>D</td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	4.01	129/95	D																								
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
4.01	129/95	D																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11-1737</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	11-1737																										
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
11-1737																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4.01</td> <td>129/95</td> <td>D</td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	4.01	129/95	D																								
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
4.01	129/95	D																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11-1737</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	11-1737																										
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
11-1737																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4.01</td> <td>129/95</td> <td>D</td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	4.01	129/95	D																								
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
4.01	129/95	D																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11-1737</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	11-1737																										
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
11-1737																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4.01</td> <td>129/95</td> <td>D</td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	4.01	129/95	D																								
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
4.01	129/95	D																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11-1737</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	11-1737																										
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
11-1737																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4.01</td> <td>129/95</td> <td>D</td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	4.01	129/95	D																								
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
4.01	129/95	D																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11-1737</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	11-1737																										
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
11-1737																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4.01</td> <td>129/95</td> <td>D</td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	4.01	129/95	D																								
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
4.01	129/95	D																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11-1737</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	11-1737																										
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
11-1737																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4.01</td> <td>129/95</td> <td>D</td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	4.01	129/95	D																								
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
4.01	129/95	D																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11-1737</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	11-1737																										
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
11-1737																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4.01</td> <td>129/95</td> <td>D</td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	4.01	129/95	D																								
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
4.01	129/95	D																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11-1737</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	11-1737																										
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
11-1737																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4.01</td> <td>129/95</td> <td>D</td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	4.01	129/95	D																								
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
4.01	129/95	D																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11-1737</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	11-1737																										
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
11-1737																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4.01</td> <td>129/95</td> <td>D</td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	4.01	129/95	D																								
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
4.01	129/95	D																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11-1737</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	11-1737																										
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
11-1737																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4.01</td> <td>129/95</td> <td>D</td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	4.01	129/95	D																								
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
4.01	129/95	D																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11-1737</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	11-1737																										
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
11-1737																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4.01</td> <td>129/95</td> <td>D</td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	4.01	129/95	D																								
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
4.01	129/95	D																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11-1737</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	11-1737																										
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
11-1737																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4.01</td> <td>129/95</td> <td>D</td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	4.01	129/95	D																								
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
4.01	129/95	D																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11-1737</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	11-1737																										
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
11-1737																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4.01</td> <td>129/95</td> <td>D</td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	4.01	129/95	D																								
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
4.01	129/95	D																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11-1737</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	11-1737																										
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
11-1737																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4.01</td> <td>129/95</td> <td>D</td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	4.01	129/95	D																								
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
4.01	129/95	D																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11-1737</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	11-1737																										
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
11-1737																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4.01</td> <td>129/95</td> <td>D</td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	4.01	129/95	D																								
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
4.01	129/95	D																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11-1737</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	11-1737																										
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
11-1737																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4.01</td> <td>129/95</td> <td>D</td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	4.01	129/95	D																								
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
4.01	129/95	D																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11-1737</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	11-1737																										
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
11-1737																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4.01</td> <td>129/95</td> <td>D</td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	4.01	129/95	D																								
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
4.01	129/95	D																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11-1737</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	11-1737																										
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
11-1737																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4.01</td> <td>129/95</td> <td>D</td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	4.01	129/95	D																								
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
4.01	129/95	D																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11-1737</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	11-1737																										
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
11-1737																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4.01</td> <td>129/95</td> <td>D</td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	4.01	129/95	D																								
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
4.01	129/95	D																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11-1737</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	11-1737																										
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
11-1737																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4.01</td> <td>129/95</td> <td>D</td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	4.01	129/95	D																								
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
4.01	129/95	D																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11-1737</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	11-1737																										
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
11-1737																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4.01</td> <td>129/95</td> <td>D</td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	4.01	129/95	D																								
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
4.01	129/95	D																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11-1737</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	11-1737																										
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
11-1737																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4.01</td> <td>129/95</td> <td>D</td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	4.01	129/95	D																								
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
4.01	129/95	D																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11-1737</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	11-1737																										
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
11-1737																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4.01</td> <td>129/95</td> <td>D</td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	4.01	129/95	D																								
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
4.01	129/95	D																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11-1737</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	11-1737																										
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
11-1737																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4.01</td> <td>129/95</td> <td>D</td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	4.01	129/95	D																								
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
4.01	129/95	D																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11-1737</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	11-1737																										
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
11-1737																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4.01</td> <td>129/95</td> <td>D</td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	4.01	129/95	D																								
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
4.01	129/95	D																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11-1737</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	11-1737																										
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
11-1737																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4.01</td> <td>129/95</td> <td>D</td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	4.01	129/95	D																								
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
4.01	129/95	D																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11-1737</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	11-1737																										
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
11-1737																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4.01</td> <td>129/95</td> <td>D</td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	4.01	129/95	D																								
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
4.01	129/95	D																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11-1737</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	11-1737																										
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
11-1737																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4.01</td> <td>129/95</td> <td>D</td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	4.01	129/95	D																								
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
4.01	129/95	D																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11-1737</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	11-1737																										
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
11-1737																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4.01</td> <td>129/95</td> <td>D</td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	4.01	129/95	D																								
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
4.01	129/95	D																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11-1737</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	11-1737																										
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
11-1737																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4.01</td> <td>129/95</td> <td>D</td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	4.01	129/95	D																								
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
4.01	129/95	D																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11-1737</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	11-1737																										
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
11-1737																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4.01</td> <td>129/95</td> <td>D</td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	4.01	129/95	D																								
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
4.01	129/95	D																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11-1737</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	11-1737																										
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
11-1737																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4.01</td> <td>129/95</td> <td>D</td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	4.01	129/95	D																								
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
4.01	129/95	D																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11-1737</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	11-1737																										
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
11-1737																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4.01</td> <td>129/95</td> <td>D</td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	4.01	129/95	D																								
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
4.01	129/95	D																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blad nr</th> <th>Tegn nr</th> <th>Rev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11-1737</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Blad nr	Tegn nr	Rev	11-1737																										
Blad nr	Tegn nr	Rev																																
11-1737																																		

C:\Arkiv\Steel\5871\8-02-sb.dwg Med Aug 09 14:09:06 2000



8 02

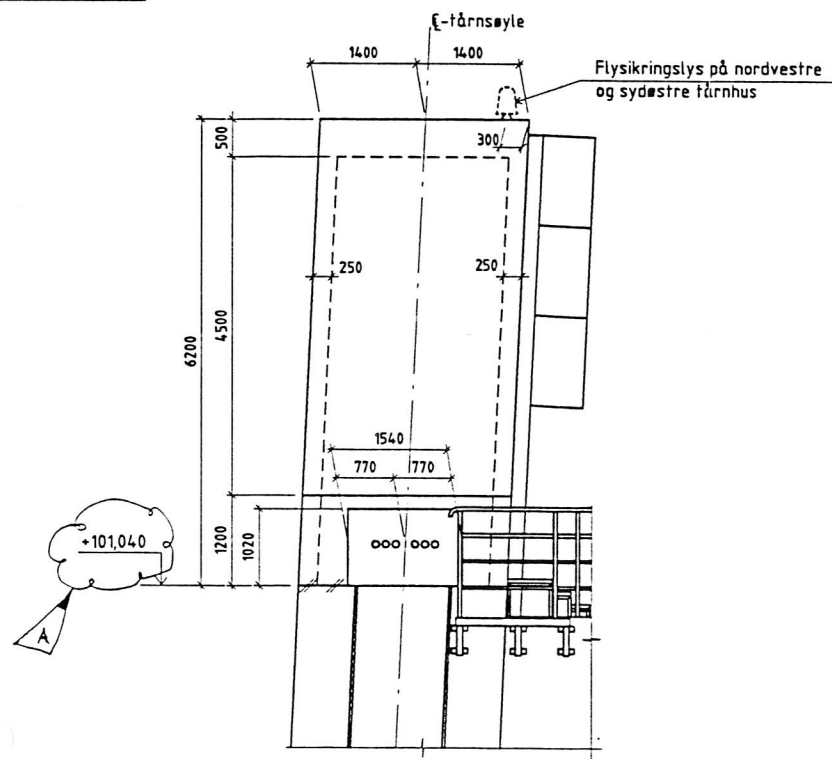
A SNITT  
1:20



- MERKNADER**
- MÅL ER GITT TIL MÅLEPUNKT, MP, YTERKANT KASSE
  - BUTTSVEISER, DETALJ 6, KAN ALTERNATIVT UTFØRES MOT KERAMISK BAKLEGG
  - SKJØT AV TRAPESPROFILER UTFØRES MED BUTTSVEIS MED BAKLEGG BAKLEGG HEFTES I SVEISEFUGEN
  - OVERLENGDER PÅ PANELER BESTEMMES AV ENTREPRENØR I FORBINDELSE MED UTARBEIDELSE AV VERKSTEDTEGNINGER OG SVEISEPROSEDYRER
- SOM BYGD MERKNADER**
- FOR UTFORMING AV SVEISERFUGER OG SVEISER VISES TIL VERKSTEDSTEGNINGER OG SVEISEPROSEDYRER

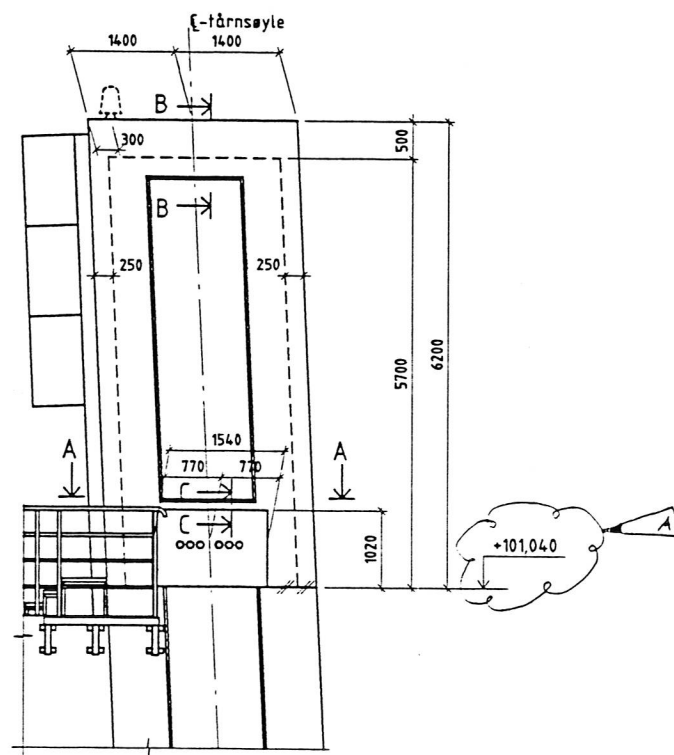
20 07 00	SOM BYGD	SB	LRE	DIY
05 07 96	STIVER FLYTTET	B	DIY	LRE
02 07 96	ARBEIDSTEGNING	A	DIY	LRE
01 02 96	STÅLANBUD	0	GBJ	LRE
Data		Revisjon	Merke	Reffer
		1:20	Tegn. 10 95	LRE
		1:10	etr. 07 96	DIY
		MP i mm	Trac. 10 95	GBJ
			etr.-m. 07 96	PHS
<b>STATENS VEGVESEN</b>				
<b>LYSEFJORDBRUA</b>				
<b>ROGALAND</b>				
<b>STÅLKASSE</b>				
<b>TYPISK TVERRSNITT</b>				
Br. nr.				
8 02		Tegn. nr.	381/95	
		Rev. SB		
Filnavn 5871/8-02-sb				
Vegdirektoratets bruavdeling, Oslo den 02 07 96				
Arne Vangnes (sign)		Per Helge Styngstad (sign)		
		<b>AAS-JAKOBSEN</b>		
		DR ING A AS - JAKOBSEN AS Lisekræmmerg. 2383 Sula Telefon 3295544		

UTLEGG I VERKSTED  
SKISSE



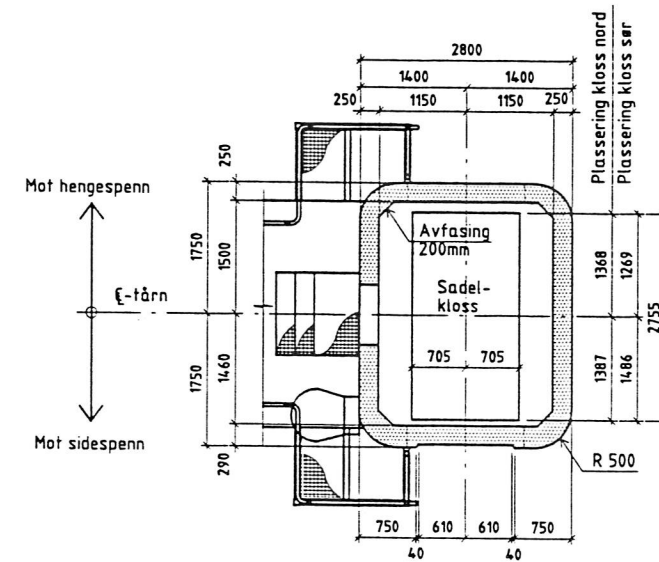
OPPRISS SETT FRA HENGESPENN

1:50



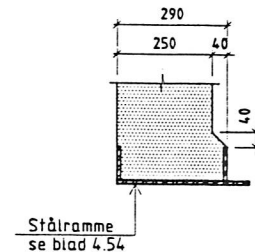
OPPRISS SETT FRA SIDESPENN

1:50



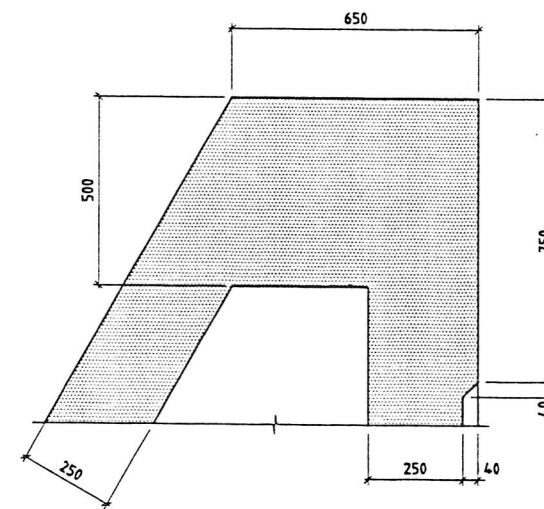
SNITT A-A

1:50



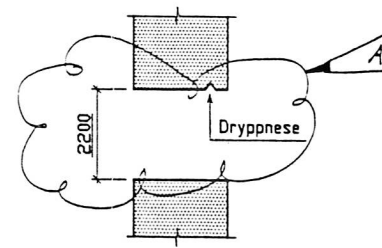
SNITT C-C

1:10



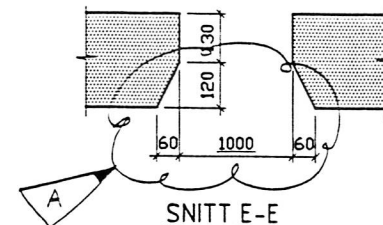
SNITT B-B

1:10



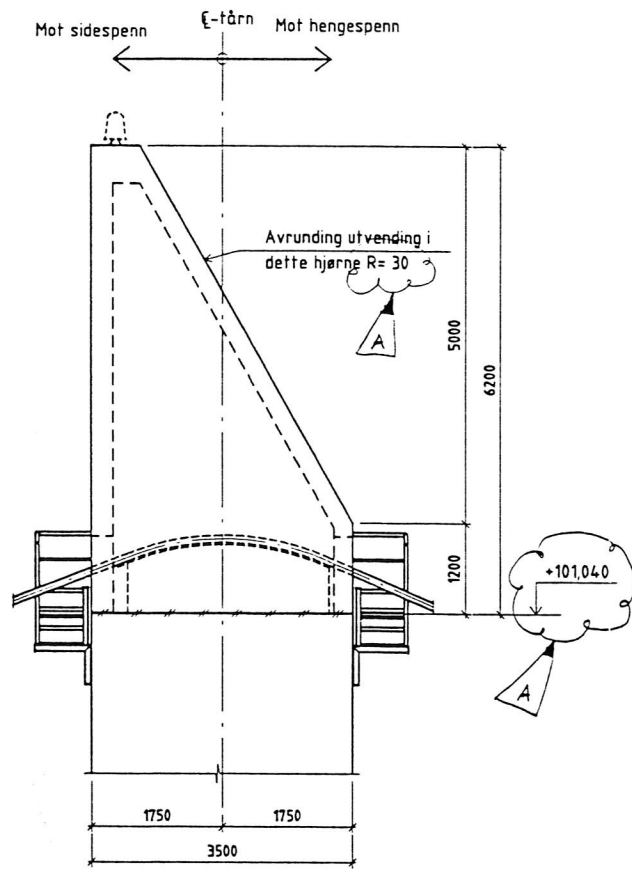
SNITT D-D

1:10



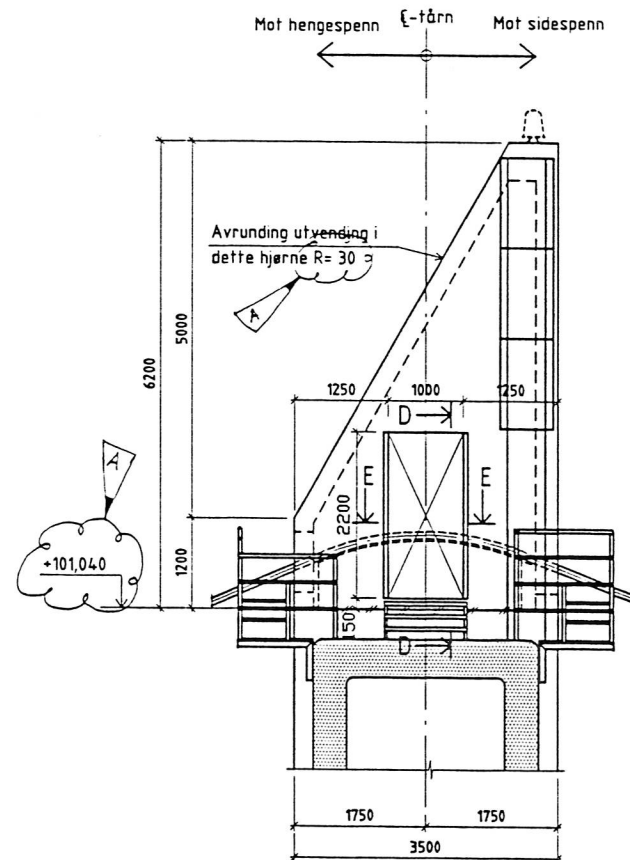
SNITT E-E

1:10



OPPRISS SETT FRA UTSIDEN AV BRUA

1:50



OPPRISS SETT FRA C-BRU

1:50

**MERKNADER**

Mjøkklass: MA NS 3473  
Kontrollklasse: Utvidet kontroll NS 3420

Der ikke annet er angitt skal utvendige hjørner avrundes R=30  
Horisontale flater og flater med mindre fall enn 80 grader impregneres med Scansian 240 eller likeverdig impregnering.

**BETONG**

Fasthetsklasse: C35  
Masseforhold: m<0.50  
D<sub>max</sub> = 16mm  
Porevolum: 5-1.5%

**ARMERING**

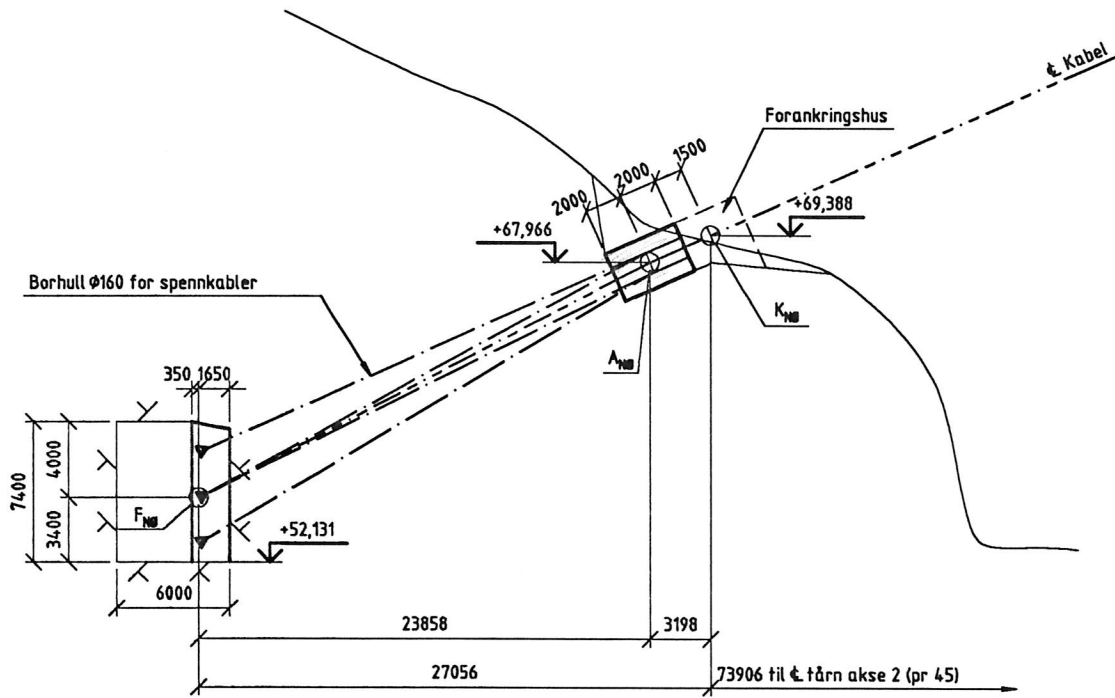
Slakkarmering K500 TE  
Overdekning: utvendig 50mm  
innvendig 40mm

**HENVISNINGER**

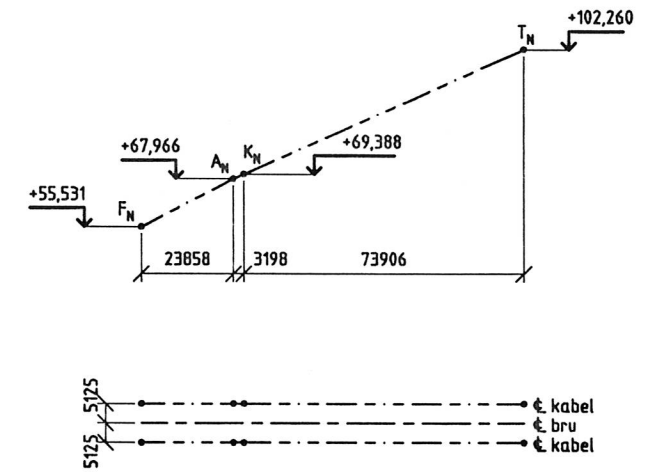
Armeringstegninger, blad nr. 4.51, 4.52 og 4.53  
Tetting ved kabelgjennomføring. Dør til hus, blad nr. 4.54  
Rekkverk og plattform til tårntopp, blad nr. 4.55  
Tårn, Innstøpningsgods, blad nr. 4.24

04.10.96	Arbeidstegning	A	LBB	SW
01.02.96	Stålanbud	0	LBB	PHS
Statsbygg		Statsbygg		Stat.
<b>STATENS VEVESEN</b>		Prosjekt	12 95	SW
<b>LYSEFJORDBRUA</b>		1:50	01 96	LBB
<b>ROGALAND</b>		Mål i mm	12 95	EL
			10 96	PHS
Hus på tårntopp		Blad nr.	11-1737	
Formtegning		Blad nr.	4.50	
		Tegnr. nr.	239/95	
		Rev.		A
Vegdirektoratets bruavdeling, Oslo den 7/10-96		Prosjekt LY-4-50		
A. Vangsnes (sign.)		P.H. Slyngstad (sign.)		

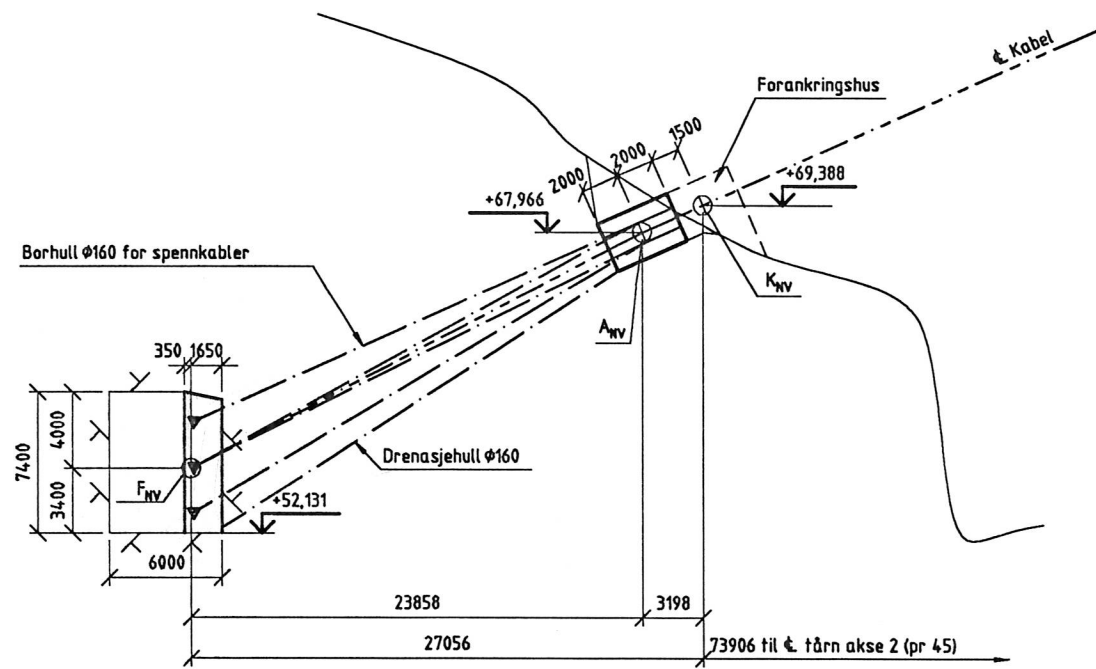
4.50



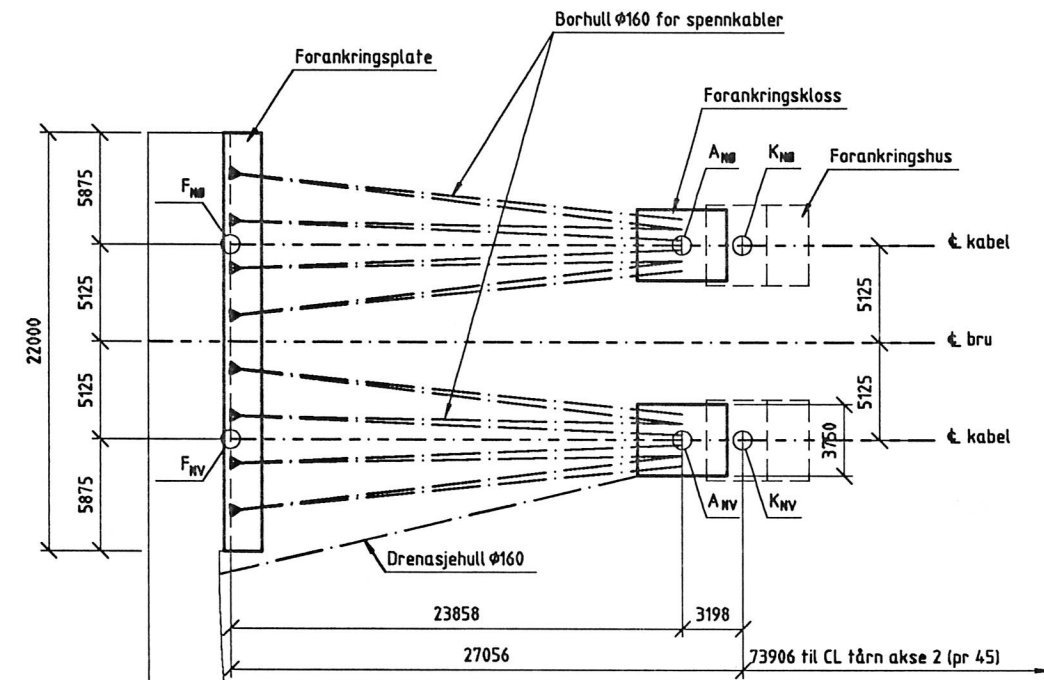
**OPPRISS NORD-ØST**  
1: 200



**OVERSIKT**  
1: 1000



**OPPRISS NORD-VEST**  
1: 200



Adkomsttunnel

**GRUNNRIS**  
1: 200

5.01

23.04.96	Arbeidstegning	A	PHS	
18.03.96	Mål endret	1	PHS	
18.06.95	Anbud	0	PHS	
Dato		Revisjon	Navn	Stillet
<b>STATENS VEGVESSEN</b>		Målestokk 1: 1000 1: 200	Tegn. 01.95	PHS
<b>LYSEFJORDBRUA</b>		PHS I	Rev. 04.96	LBB
<b>ROGALAND</b>		PHS I	Tegn. 01.95	PHS
<b>Forankring nord</b>		Dr. nr. 11-1737	Tegn. nr.	Rev.
<b>Oversikt</b>		5.01	52195	A
Plan. LY-5-01				

Vegdirektoratets brøvdøling, Oslo den 23/4-96

Arne Vangsnes (sign.)

Per Helge Slyngstad (sign.)

# Vedlegg B

## Differanse mellom målinger av anemometer ved H18

```
% Vind på begge sider av broen. vind fra 200 deg.
% 24 januar 2018
clc; close all; clearvars;
load('timeSeriesWind_SSW.mat')

figure ('position',[90,90,900,600])
subplot(3,1,1)
A = corrcoef(u_H18W,u_H18E);
U = mean(u_H18W); %Gjennomsnittlig vindhastighet
U1 = mean(u_H18E);
Suw = std(u_H18W); %standardavvik
Sue = std(u_H18E);
Iuw = (Suw/U)*100; % Turbulensintensitet i prosent
Iue = (Sue/U1)*100;
plot(newT,u_H18W,newT,u_H18E)
ylabel('u (m/s)')
xlim([0,100])
legend('H18W','H18E','location','best')
sgtitle('Differanse mellom målesensorer for tidsserie fra 24.01.18')
title(['\rho_{u}_{W},\rho_{u}_{E} = ',num2str(A(2),4),', I_{u,H18W} = ',
num2str(Iuw,4),'\%',', I_{u,H18E} = ',
num2str(Iue,4),'\%', '$'],'interpreter','latex','fontsize',12)
grid on; grid minor;

subplot(3,1,2)
A = corrcoef(v_H18W,v_H18E);
Svw = std(v_H18W); %standardavvik
Sve = std(v_H18E);
Ivw = (Svw/U)*100; % Turbulensintensitet
Ive = (Sve/U1)*100;
plot(newT,v_H18W,newT,v_H18E)
ylabel('v (m/s)')
xlim([0,100])
legend('H18W','H18E','location','best')
title(['\rho_{v}_{W},\rho_{v}_{E} = ',num2str(A(2),4),', I_{v,H18W} = ',
num2str(Ivw,4),'\%',', I_{v,H18E} = ',
num2str(Ive,4),'\%', '$'],'interpreter','latex','fontsize',12)
grid on; grid minor;

subplot(3,1,3)
A = corrcoef(w_H18W,w_H18E);
SwW = std(w_H18W);
Swe = std(w_H18E);
Iww = (SwW/U)*100; % Turbulensintensitet
Iwe = (Swe/U1)*100;
plot(newT,w_H18W,newT,w_H18E)
xlim([0,100])
xlabel('t (s)')
ylabel('w (m/s)')
legend('H18W','H18E','location','best')
title(['\rho_{w}_{W},\rho_{w}_{E} = ',num2str(A(2),4),', I_{w,H18W} = ',
num2str(Iww,4),'\%',', I_{w,H18E} = ',
num2str(Iwe,4),'\%', '$'],'interpreter','latex','fontsize',12)
grid on; grid minor;
set(gcf, 'color', 'w')
```

```

figure ('position',[90,90,1000,200])
plot(newT,Dir_H18W,newT,Dir_H18E)
xlim([0,100])
ylabel('Vindretning ({\circ})')
xlabel('t (s)')
legend('H18W','H18E','location','best')
grid on; grid minor;
set(gcf, 'color', 'w')

%% 28 januar 2018. Vind treffer vinkelrett på broen
clc; close all; clearvars;
load('timeSeriesWind_West.mat')

figure ('position',[90,90,900,600])
subplot(3,1,1)
A = corrcoef(u_H18W,u_H18E);
U = mean(u_H18W); %Gjennomsnittlig vindhastighet
U1 = mean(u_H18E);
Suw = std(u_H18W); %standardavvik
Sue = std(u_H18E);
Iuw = (Suw/U)*100; % Turbulensintensitet i prosent
Iue = (Sue/U1)*100;
plot(newT,u_H18W,newT,u_H18E)
ylabel('u (m/s)')
xlim([0,100])
legend('H18W','H18E','location','best')
sgtitle('Differanse mellom målesensorer for tidsserie fra 28.01.18')
title(['\rho_{u}_{W}, {u}_{E} = ', num2str(A(2),4), ', I_{u,H18W} = ',
num2str(Iuw,4), '\%', ', I_{u,H18E} = ',
num2str(Iue,4), '\%', '$'], 'interpreter','latex','fontsize',12)
grid on; grid minor;

subplot(3,1,2)
A = corrcoef(v_H18W,v_H18E);
Svw = std(v_H18W); %standardavvik
Sve = std(v_H18E);
Ivw = (Svw/U)*100; % Turbulensintensitet
Ive = (Sve/U1)*100;
plot(newT,v_H18W,newT,v_H18E)
ylabel('v (m/s)')
xlim([0,100])
legend('H18W','H18E','location','best')
title(['\rho_{v}_{W}, {v}_{E} = ', num2str(A(2),4), ', I_{v,H18W} = ',
num2str(Ivw,4), '\%', ', I_{v,H18E} = ',
num2str(Ive,4), '\%', '$'], 'interpreter','latex','fontsize',12)
grid on; grid minor;

subplot(3,1,3)
A = corrcoef(w_H18W,w_H18E);
Sww = std(w_H18W);
Swe = std(w_H18E);
Iww = (Sww/U)*100; % Turbulensintensitet
Iwe = (Swe/U1)*100;
plot(newT,w_H18W,newT,w_H18E)
xlim([0,100])
xlabel('t (s)')
ylabel('w (m/s)')
legend('H18W','H18E','location','best')

```

```

title(['$ \rho_{\{w\}_{W},\{w\}_{E}} = ', num2str(A(2),4), ', I_{w,H18W} = ', num2str(Iww,4), '\%', ', I_{w,H18E} = ', num2str(Iwe,4), '\%', '$'], 'interpreter', 'latex', 'fontsize', 12)
grid on; grid minor;
set(gcf, 'color', 'w')

```

```

figure ('position', [90,90,1000,200])
plot(newT, Dir_H18W, newT, Dir_H18E)
xlim([0,100])
ylabel('Vindretning ({\circ})')
xlabel('t (s)')
legend('H18W', 'H18E', 'location', 'best')
grid on; grid minor;
set(gcf, 'color', 'w')

```

## Akselerasjon, vindhastighet og vindretning for brodekket og brotårnet:

```

%% Mye vind 24.01.18
clc;
close all;
clearvars;
load('24.01.18.mat') % Henter data fra .mat fil
ind = 115; %tilfeldig tidsserie med mye vind (manuelt valgt)

% brodekket
figure ('position', [90,90,1000,600])
set(gcf, 'color', 'w')
subplot(3,1,1)
s = std(Aox0(ind,:));
plot(t, squeeze(Aox0(ind,:)), t, ones(length(t),1)*s, 'r-', t, ones(length(t),1)*(-s), 'r-')
sgtitle(['Tidsserie for akselerasjon ' datestr(time(ind)), ' med U = ', num2str(nanmean(H0(ind,:),2), ' m/s'], 'FontSize', 12, 'Fontweight', 'normal')
ylabel('$\ddot{r}_{Dx}$ (m/s^2)', 'Interpreter', 'latex', 'FontSize', 14)
title(['$ \sigma_{\ddot{r}_{Dx}} = ', num2str(std(Aox0(ind,:)),2), ' m/s^2 $'], 'interpreter', 'latex', 'fontsize', 13)
ylim([-0.7,0.7])
grid on; grid minor;

subplot(3,1,2)
s=std(Aoz0(ind,:));
plot(t, squeeze(Aoz0(ind,:)), t, ones(length(t),1)*s, 'r-', t, ones(length(t),1)*(-s), 'r-')
ylabel('$\ddot{r}_{Dz}$ (m/s^2)', 'Interpreter', 'latex', 'FontSize', 14)
title(['$ \sigma_{\ddot{r}_{Dz}} = ', num2str(std(Aoz0(ind,:)),2), ' m/s^2 $'], 'interpreter', 'latex', 'fontsize', 13)
grid on; grid minor;
ylim([-0.7,0.7])

subplot(3,1,3)
s=std(Aot0(ind,:));
plot(t, squeeze(Aot0(ind,:)), t, ones(length(t),1)*s, 'r-', t, ones(length(t),1)*(-s), 'r-')
ylabel('$\ddot{r}_{D\theta}$ (rad/s^2)', 'Interpreter', 'latex', 'FontSize', 14)
title(['$ \sigma_{\ddot{r}_{D\theta}} = ', num2str(std(Aot0(ind,:)),2), ' rad/s^2 $'], 'interpreter', 'latex', 'fontsize', 13)
xlabel('t(s)', 'FontSize', 14)
grid on; grid minor;

```

```

% brotårn
figure ('position',[90,90,1000,600])
set(gcf, 'color', 'w')
subplot(3,1,1)
s=std(Aox_Tower(ind,:));
plot(t,squeeze(Aox_Tower(ind,:)),t,ones(length(t),1)*s,'r-
',t,ones(length(t),1)*(-s),'r-')
sgtitle(['Tidsserie for akselerasjon ' datestr(time(ind)),' med U =
',num2str(nanmean(H0(ind,:),2),'
m/s'],'FontSize',12,'Fontweight','normal')
ylabel('$\ddot{x}$ (m/s^2)','$','Interpreter','latex','FontSize',14)
title(['$\sigma_{\ddot{x}} = ',num2str(std(Aox_Tower(ind,:),2),'
m/s^2 $'],'interpreter','latex','fontSize',13)
ylim([-0.2,0.2])
grid on; grid minor;

subplot(3,1,2)
s=std(Aoy_Tower(ind,:));
plot(t,squeeze(Aoy_Tower(ind,:)),t,ones(length(t),1)*s,'r-
',t,ones(length(t),1)*(-s),'r-')
ylabel('$\ddot{y}$ (m/s^2)','$','Interpreter','latex','FontSize',14)
title(['$\sigma_{\ddot{y}} = ',num2str(std(Aoy_Tower(ind,:),2),'
m/s^2 $'],'interpreter','latex','fontSize',13)
ylim([-0.2,0.2])
grid on; grid minor;

subplot(3,1,3)
s=std(Aot_Tower_z(ind,:));
plot(t,squeeze(Aot_Tower_z(ind,:)),t,ones(length(t),1)*s,'r-
',t,ones(length(t),1)*(-s),'r-')
ylabel('$\ddot{\theta}$ (rad/s^2)','$','Interpreter','
latex','FontSize',14)
title(['$\sigma_{\ddot{\theta}} =
',num2str(std(Aot_Tower_z(ind,:),2),' rad/s^2
$'],'interpreter','latex','fontSize',13)
xlabel('t(s)','FontSize',14)
grid on; grid minor;

%Vindhastighet og retning
figure ('position',[90,90,1000,600])
set(gcf, 'color', 'w')
A = mean(H0(ind,:));
subplot(2,1,1)
plot(t,squeeze(H0(ind,:)),t,ones(length(t),1)*A)
legend('H','U')
title(['Horisontal vindhastighet ' datestr(time(ind)),' med U =
',num2str(nanmean(H0(ind,:),2),'
m/s'],'FontSize',12,'Fontweight','normal')
ylabel('H_{10 min}(m/s)')
grid on; grid minor;

subplot(2,1,2)
R = mean(Dir0(ind,:));
plot(t,Dir0(ind,:),t,ones(length(t),1)*R)
legend('H18','Middel')
title(['Vindretning for '
datestr(time(ind))'],'FontSize',12,'Fontweight','normal')
ylabel('(\circ)')
xlabel('t(s)','FontSize',13)

```



```

grid on; grid minor;

%% Trafikk og lite vind 24.01.18

clc;
close all; clearvars;
load('24.01.18.mat')
ind = 40; %Tidsserie med lite vind og mye trafikk (manuelt valgt)

% brodekket
figure ('position',[90,90,1000,600])
set(gcf, 'color', 'w')
subplot(3,1,1)
plot(t,squeeze(Aox0(ind,:)))
sgtitle(['Tidsserie for akselerasjon ' datestr(time(ind)),' med U = ',num2str(nanmean(H0(ind,:),2),' m/s'],'FontSize',12,'Fontweight','normal')
ylabel('$\ddot{r}_{Dx}$ (m/s^2)$','Interpreter','latex','FontSize',14)
title(['$\sigma_{\ddot{r}_{Dx}}$ = ',num2str(std(Aox0(ind,:),2),' m/s^2 $'],'interpreter','latex','fontSize',13)
grid on; grid minor;
ylim([-0.03,0.03])

subplot(3,1,2)
s=std(Aoz0(ind,:));
plot(t,squeeze(Aoz0(ind,:)),t,ones(length(t),1)*s,'r-','t,ones(length(t),1)*(-s),'r-')
ylabel('$\ddot{r}_{Dz}$ (m/s^2)$','Interpreter','latex','FontSize',14)
title(['$\sigma_{\ddot{r}_{Dz}}$ = ',num2str(std(Aoz0(ind,:),2),' m/s^2 $'],'interpreter','latex','fontSize',13)
grid on; grid minor;
ylim([-0.03,0.03])

subplot(3,1,3)
s = std(Aot0(ind,:));
plot(t,squeeze(Aot0(ind,:)),t,ones(length(t),1)*s,'r-','t,ones(length(t),1)*(-s),'r-')
ylabel('$\ddot{r}_{D\theta}$ (rad/s^2)$','Interpreter','latex','FontSize',14)
title(['$\sigma_{\ddot{r}_{D\theta}}$ = ',num2str(std(Aot0(ind,:),2),' rad/s^2 $'],'interpreter','latex','fontSize',13)
xlabel('t(s)','FontSize',14)
grid on; grid minor;

% brotårn
figure ('position',[90,90,1000,600])
set(gcf, 'color', 'w')
subplot(3,1,1)
s = std(Aox_Tower(ind,:));
plot(t,squeeze(Aox_Tower(ind,:)),t,ones(length(t),1)*s,'r-','t,ones(length(t),1)*(-s),'r-')
sgtitle(['Tidsserie for akselerasjon ' datestr(time(ind)),' med U = ',num2str(nanmean(H0(ind,:),2),' m/s'],'FontSize',12,'Fontweight','normal')
ylabel('$\ddot{r}_{Tx}$ (m/s^2)$','Interpreter','latex','FontSize',14)
title(['$\sigma_{\ddot{r}_{Tx}}$ = ',num2str(std(Aox_Tower(ind,:),2),' m/s^2 $'],'interpreter','latex','fontSize',13)
grid on; grid minor;
ylim([-0.01,0.01])

```

```

subplot(3,1,2)
s = std(Aoy_Tower(ind,:));
plot(t,squeeze(Aoy_Tower(ind,:)),t,ones(length(t),1)*s,'r-
',t,ones(length(t),1)*(-s),'r-')
ylabel('$\ddot{r}_{Ty}$ (m/s^2)$','Interpreter','latex','FontSize',14)
title(['$ \sigma_{\ddot{r}_{Ty}} = ',num2str(std(Aoy_Tower(ind,:)),2),'
m/s^2 $'],'interpreter','latex','fontSize',13)
grid on; grid minor;

```

```

subplot(3,1,3)
s = std(Aot_Tower_z(ind,:));
plot(t,squeeze(Aot_Tower_z(ind,:)),t,ones(length(t),1)*s,'r-
',t,ones(length(t),1)*(-s),'r-')
ylabel('$\ddot{r}_{T\theta}$ (rad/s^2)$','Interpreter',
'latex','FontSize',14)
title(['$ \sigma_{\ddot{r}_{T\theta}} =
',num2str(std(Aot_Tower_z(ind,:)),2),' rad/s^2
$'],'interpreter','latex','fontSize',13)
xlabel('t(s)','FontSize',14)
grid on; grid minor;

```

```

%Vindhastighet og retning
figure('position',[90,90,1000,600])
set(gcf,'color','w')
A = mean(H0(ind,:));
subplot(2,1,1)
plot(t,squeeze(H0(ind,:)),t,ones(length(t),1)*A)
xlim([0,100])
legend('H','U')
title(['Horisontal vindhastighet ' datestr(time(ind)),' med U =
',num2str(nanmean(H0(ind,:)),2),'
m/s'],'FontSize',12,'Fontweight','normal')
ylabel('H_{10 min} (m/s)')
grid on; grid minor;

```

```

subplot(2,1,2)
R = mean(Dir0(ind,:));
plot(t,Dir0(ind,:),t,ones(length(t),1)*R)
xlim([0,100])
legend('H18','Middel')
title(['Vindretning for '
datestr(time(ind))],'FontSize',12,'Fontweight','normal')
ylabel('(\circ)')
xlabel('t(s)','FontSize',13)
grid on; grid minor;

```

## Akselerasjonsspektra ved hjelp av Burg's metode:

```

%% Akselerasjonsspektra for tårn; Burgs metoden
clc; close all; clearvars;
load('24.01.18.mat')
ind = 40; %Tidsserie på 10 min
fs = 25; %Samplingsfrekvens
x = squeeze(Aox_Tower(ind,:)); %Fjerner dimensjoner av lengde 1
y = squeeze(Aoy_Tower(ind,:));
theta = squeeze(Aot_Tower_z(ind,:));
N = size(Aoy_Tower,2);
order = 400; %Order av den autoregressive modellen
[Sx,fx] = pburg(x,order,N,fs); %Power spektraltetthet
[Sy,fy] = pburg(y,order,N,fs);
[St,ft] = pburg(theta,order,N,fs);

```

```

figure ('position',[90,90,1000,600])
set(gcf, 'color', 'w')
loglog(fx,Sx)
hold on
loglog(fy,Sy,'r') %Logaritmisk plot
loglog(ft,St,'k')
hold off
xlim([10^-1,10^1])
xlabel('f (Hz)')
ylabel('PSD (m^2/Hz)')
title(['Akselerasjonsspektra for ' datestr(time(ind)),' med U =
',num2str(nanmean(H0(ind,:),2),' m/s']])
legend(' $ S_{\ddot{r}}_{Tx}$ $',' $ S_{\ddot{r}}_{Ty}$ $',' $
S_{\ddot{r}}_{T\theta}$ $','Interpreter','latex','fontsize',15)
grid on; grid minor;

```

```

%% Akselerasjonsspektra for dekket; Burgs metoden

```

```

clc; close all; clearvars;
load('24.01.18.mat')
ind = 115; %Tidsserie på 10 min
fs = 25;
x = squeeze(Aox0(ind,:));
z = squeeze(Aoz0(ind,:));
theta = squeeze(Aot0(ind,:));
N = size(Aox0,2);
order = 400;
[Sx,fx] = pburg(x,order,N,fs);
[Sz,fz] = pburg(z,order,N,fs);
[St,ft] = pburg(theta,order,N,fs);

```

```

figure ('position',[90,90,1000,600])
set(gcf, 'color', 'w')
loglog(fx,Sx)
hold on
loglog(fz,Sz,'r')
loglog(ft,St,'k')
hold off
xlim([10^-1,10^1])
xlabel('f (Hz)')
ylabel('PSD (m^2/Hz)')
title(['Akselerasjonsspektra for ' datestr(time(ind)),' med U =
',num2str(nanmean(H0(ind,:),2),' m/s']])
legend(' $ S_{\ddot{r}}_{Dx}$ $',' $ S_{\ddot{r}}_{Dz}$ $',' $
S_{\ddot{r}}_{D\theta}$ $','Interpreter','latex','fontsize',15)
grid on; grid minor;

```

## Regne ut forskyvning til tårn:

```

%% Forskyvning til tårn, mye vind

```

```

clc; close all;

```

```

clearvars;

```

```

load('24.01.18.mat')

```

```

ind = 115;

```

```

figure ('position',[90,90,1000,600])

```

```

set(gcf, 'color', 'w')

```

```

velocity = cumtrapz(t,squeeze(Aox_Tower(ind,:))); %Inegrerer akselerasjon

```

```

displacement = cumtrapz(t,detrend(velocity)); %Integrere data og

```

```

fjerner lineær trend

```

```

displ_filter_x = filter1('hp',displacement,'fc',0.08); % Høy-pass filter
for å fjerne lave frekvenser
subplot(3,1,1)
displ_filter_x1=displ_filter_x.*1000; %Gjør forskyvning om fra m til mm
plot(t,displ_filter_x1)
title(['Tidsserie for forskyvning ' datestr(time(ind)),' med U =
',num2str(nanmean(H0(ind,:)),2),' m/s'],'Fontweight','normal')
ylabel('r_{Tx} (mm)')
ylim([-0.6,0.6])
grid on; grid minor;

velocity_y = cumtrapz(t,squeeze(Aoy_Tower(ind,:)));
displacement_y = cumtrapz(t,detrend(velocity_y));
displ_filter_y = filter1('hp',displacement_y,'fc',0.08);
displ_filter_y1=displ_filter_y.*1000;
subplot(3,1,2)
plot(t,displ_filter_y1)
ylim([-0.6,0.6])
ylabel('r_{Ty} (mm)')
xlabel('t (s)')
grid on; grid minor;

velocity = cumtrapz(t,squeeze(Aot_Tower_z(ind,:))); %Inegrerer akselerasjon
displacement = cumtrapz(t,detrend(velocity)); %Integrere data og
fjerner lineær trend
displ_filter_z = filter1('hp',displacement,'fc',0.08); % Høy-pass filter
for å fjerne lave frekvenser
subplot(3,1,3)
plot(t,displ_filter_z)
ylabel('r_{T\theta} (rad)')
xlabel('t (s)')
grid on; grid minor;

%% Forskyvning til tårn, med trafikk og lite vind
clc; close all;
clearvars;
load('24.01.18.mat')
ind = 40;

figure ('position',[90,90,1000,600])
set(gcf, 'color', 'w')
velocity = cumtrapz(t,squeeze(Aox_Tower(ind,:)));
displacement = cumtrapz(t,detrend(velocity));
displ_filter_x = filter1('hp',displacement,'fc',0.08);
subplot(3,1,1)
displ_filter_x1=displ_filter_x.*1000; %Gjør forskyvning om fra m til mm
plot(t,displ_filter_x1)
title(['Tidsserie for forskyvning ' datestr(time(ind)),' med U =
',num2str(nanmean(H0(ind,:)),2),' m/s'],'Fontweight','normal')
ylabel('r_{Tx} (mm)')
ylim([-0.01,0.01])
grid on; grid minor;

velocity_y = cumtrapz(t,squeeze(Aoy_Tower(ind,:)));
displacement_y = cumtrapz(t,detrend(velocity_y));
displ_filter_y = filter1('hp',displacement_y,'fc',0.08);
displ_filter_y1=displ_filter_y.*1000;
subplot(3,1,2)
plot(t,displ_filter_y1)
ylim([-0.01,0.01])
ylabel('r_{Ty} (mm)')

```

```

xlabel('t (s)')
grid on; grid minor;

velocity = cumtrapz(t,squeeze(Aot_Tower_z(ind,:))); %Inegrerer akselerasjon
displacement = cumtrapz(t,detrend(velocity)); %Integrere data og
fjerner lineær trend
displ_filter_z = filter1('hp',displacement,'fc',0.08); % Høy-pass filter
for å fjerne lave frekvenser
subplot(3,1,3)
plot(t,displ_filter_z)
ylabel('r_{T\theta} (rad)')
xlabel('t (s)')
grid on; grid minor;

```

## Forskyvning brodekket:

```

%%Forskyvning brodekket lite vind
clc; close all;
clearvars;
load('24.01.18.mat')
ind = 40;

figure ('position',[90,90,1000,600])
set(gcf, 'color', 'w')
velocity = cumtrapz(t,squeeze(Aox0(ind,:))); %Integrerer data
displacement = cumtrapz(t,detrend(velocity)); %Integrere data og fjerner
lineær trend
displ_filter_x = filter1('hp',displacement,'fc',0.08); % Høy-pass filter
for å fjerne lave frekvenser
subplot(3,1,1)
displ_filter_x1=displ_filter_x.*1000; %Gjør forskyvning om fra m til mm
plot(t,displ_filter_x1)
title(['Tidsserie for forskyvning ' datestr(time(ind)),' med U =
',num2str(nanmean(H0(ind,:),2),' m/s'],'Fontweight','normal')
ylabel('r_{Dx} (mm)')
ylim([-0.1,0.1])
grid on; grid minor;

velocity = cumtrapz(t,squeeze(Aoz0(ind,:)));
displacement = cumtrapz(t,detrend(velocity));
displ_filter_z = filter1('hp',displacement,'fc',0.08);
displ_filter_z1=displ_filter_z.*1000;
subplot(3,1,2)
plot(t,displ_filter_z1)
ylim([-0.1,0.1])
ylabel('r_{Dz} (mm)')
xlabel('t (s)')
grid on; grid minor;

velocity = cumtrapz(t,squeeze(Aot0(ind,:))); %Inegrerer akselerasjon
displacement = cumtrapz(t,detrend(velocity)); %Integrere data og
fjerner lineær trend
displ_filter_t = filter1('hp',displacement,'fc',0.08); % Høy-pass filter
for å fjerne lave frekvenser
subplot(3,1,3)
plot(t,displ_filter_t)
ylabel('r_{T\theta} (rad)')
xlabel('t (s)')
grid on; grid minor;

%% Forskyvning brodekket mye vind

```

```

clc; close all;
clearvars;
load('24.01.18.mat')
ind = 115;

figure ('position',[90,90,1000,600])
set(gcf, 'color', 'w')
velocity = cumtrapz(t,squeeze(Aox0(ind,:)));
displacement = cumtrapz(t,detrend(velocity));
displ_filter_x = filter1('hp',displacement,'fc',0.08);
subplot(3,1,1)
displ_filter_x1=displ_filter_x.*1000; %Gjør forskyvning om fra m til mm
plot(t,displ_filter_x1)
title(['Tidsserie for forskyvning ' datestr(time(ind)),' med U =
',num2str(nanmean(H0(ind,:),2),' m/s'],'Fontweight','normal')
ylabel('r_{Dx} (mm)')
ylim([-4,4])
grid on; grid minor;

velocity = cumtrapz(t,squeeze(Aoz0(ind,:)));
displacement = cumtrapz(t,detrend(velocity));
displ_filter_z = filter1('hp',displacement,'fc',0.08);
displ_filter_z1=displ_filter_z.*1000;
subplot(3,1,2)
plot(t,displ_filter_z1)
ylim([-4,4])
ylabel('r_{Dz} (mm)')
xlabel('t (s)')
grid on; grid minor;

velocity = cumtrapz(t,squeeze(Aot0(ind,:))); %Inegrerer akselerasjon
displacement = cumtrapz(t,detrend(velocity)); %Integrere data og
fjerner lineær trend
displ_filter_t = filter1('hp',displacement,'fc',0.08); % Høy-pass filter
for å fjerne lave frekvenser
subplot(3,1,3)
plot(t,displ_filter_t)
ylabel('r_{T\theta} (rad)')
xlabel('t (s)')
grid on; grid minor;

```

## Spektra for forskyvning:

```

% Spektra for forskyvning
clc; close all;
clearvars;
load('24.01.18.mat')
ind = 115; % Tidsserie

%Bro
velocity = cumtrapz(t,squeeze(Aox0(ind,:)));
displacement = cumtrapz(t,detrend(velocity));
displ_filter_x = filter1('hp',displacement,'fc',0.08);

velocity = cumtrapz(t,squeeze(Aoz0(ind,:)));
displacement = cumtrapz(t,detrend(velocity));
displ_filter_z = filter1('hp',displacement,'fc',0.08);

%Tårn
velocity = cumtrapz(t,squeeze(Aox_Tower(ind,:)));

```

```

displacement = cumtrapz(t,detrend(velocity));
displ_filter_Tx = filter1('hp',displacement,'fc',0.08);

velocity_y = cumtrapz(t,squeeze(Aoy_Tower(ind,:)));
displacement_y = cumtrapz(t,detrend(velocity_y));
displ_filter_Ty = filter1('hp',displacement_y,'fc',0.08);

%Spektra
fs = 25; %Samplingsfrekvens
x = displ_filter_x;
z = displ_filter_z;
xT = displ_filter_Tx;
yT = displ_filter_Ty;
N = size(Aoy_Tower,2);
order = 400;
[Sx,fx] = pburg(x,order,N,fs);
[Sz,fz] = pburg(z,order,N,fs);
[SxT,fxT] = pburg(xT,order,N,fs);
[SyT,fyT] = pburg(yT,order,N,fs);

figure('position',[90,90,1000,600])
set(gcf,'color','w')
loglog(fx,Sx)
hold on
loglog(fz,Sz,'r')
loglog(fxT,SxT,'g')
loglog(fyT,SyT,'k')
hold off
xlim([10^-1,10^1])
grid on; grid minor;
title(['Spektra for ' datestr(time(ind),' med U =
',num2str(nanmean(H0(ind,:),2),' m/s'],'Fontweight','normal')
xlabel('f (Hz)')
ylabel('PSD (m^2/Hz)')
legend('$ S_{\{r\}_{Dx}} $','$ S_{\{r\}_{Dz}} $','$ S_{\{r\}_{Tx}} $','$ S_{\{r\}_{Ty}} $','Interpreter','latex','fontsize',15)

```

## Korrelasjon:

```

% Korrelasjon mellom forskyvning
clc;
close all;
clearvars;
load('24.01.18.mat')
ind = 40;

%Brodekkets forskyvning i vertikal retning
velocity = cumtrapz(t,squeeze(Aoz0(ind,:)));
displacement = cumtrapz(t,detrend(velocity));

%Brotårnets forskyvning i langsgående retning
velocity_y = cumtrapz(t,squeeze(Aoy_Tower(ind,:)));
displacement_y = cumtrapz(t,detrend(velocity_y));

TY = displacement_y;
DZ = displacement;
Delta = t(2)-t(1); %Tidssteg
FN = 1/(2*Delta); %Nyquistfrekvens
fmin = 0.28; %Laveste frekvens
fmax = 0.32; %Høyeste frekvens

```

```

N = 400; %Filtreringsgrad
[b_D,a_D] = fir1(N,[fmin fmax]/FN); %Designfilter
[b_T,a_T] = fir1(N,[fmin fmax]/FN);
filt_D = filtfilt(b_D,a_D,DZ); %Filtrering av respons
filt_T = filtfilt(b_T,a_T,TY);
P = polyfit(filt_D,filt_T,1);
yfit = P(1)*filt_D+P(2);
figure ('position',[90,90,700,500])
plot(filt_D,filt_T,'*')
hold on
plot(filt_D,yfit,'r-')
hold off
A = corrcoef(filt_T,filt_D); %Regner ut korrelasjonskoeffisient
xlabel('r_{Dz} (mm)')
ylabel('r_{Ty} (mm)')
title(['Korrelasjon mellom forskyvning, med U =
',num2str(nanmean(H0(ind,:)),2),' m/s og $ \rho_{\{r\}_{Dz},\{r\}_{Ty}} =
$',num2str(A(2))],'Interpreter','latex','Fontweight','normal')
grid on; grid minor;
set(gcf,'color','w')

```

### Sammenlikning mellom filtrert og opprinnelig respons:

```

% Sammenlikning mellom filtrert og opprinnelig respons
clc; close all; clearvars;
load('24.01.18.mat')
ind = 115;

TY = squeeze(Aoy_Tower(ind,:));
DZ = squeeze(Aoz0(ind,:));
Delta = t(2)-t(1); %Tidssteg
FN = 1/(2*Delta); %Nyquistfrekvens
fmin = 0.28; %Laveste frekvens
fmax = 0.32; %Høyeste frekvens
N = 400; %Filtreringsgrad
[b_D,a_D] = fir1(N,[fmin fmax]/FN); %Designfilter
[b_T,a_T] = fir1(N,[fmin fmax]/FN);
filt_D = filtfilt(b_D,a_D,DZ); %Filtrering av respons
filt_T = filtfilt(b_T,a_T,TY);

figure ('position',[90,90,700,500])
subplot(2,1,1)
plot(t,squeeze(Aoz0(ind,:)),t,filt_D,'r-');
title(['Tidsserie for ' datestr(time(ind)),' med U =
',num2str(nanmean(H0(ind,:)),2),' m/s'],'Fontweight','normal')
legend({'Originalt signal','Filtrert
',num2str(fmin),' ',num2str(fmax),' Hz'],'location','best')
ylabel('$ \ddot{r}_{Dz} (m/s^2) $','interpreter','latex','fontsize',14)
grid on; grid minor;

subplot(2,1,2)
plot(t,squeeze(Aoy_Tower(ind,:)),t,filt_T,'r-');
legend({'Originalt signal','Filtrert
',num2str(fmin),' ',num2str(fmax),' Hz'],'location','best')
ylabel('$ \ddot{r}_{Ty} (m/s^2) $','interpreter','latex','fontsize',14)
xlabel('t (s)','fontsize',12)
grid on; grid minor;

```

### Standardavvik mot middelvindhastighet (kort tidsserie):

```

% Standardavvik mot middelvind, data fra 24.01.18

```



```

clc;
close all;
clearvars;
load('24.01.18.mat')

stdAox_T = std(Aox_Tower,0,2); %Regner standardavvik til akselerasjon
stdAoy_T = std(Aoy_Tower,0,2);
stdAot = std(Aot_Tower_z,0,2);
U = nanmean(H0,2); %Gjennomsnitt, tar bort NaN-verdier

figure ('position',[90,90,600,600])
subplot(3,1,1)
plot(U,stdAox_T, '.')
ylabel('$ \sigma_{ax} (m/s^2) $','Interpreter','latex','fontsize',15)
sgtitle('Standardavvik som funksjon av middelvindhastighet fra
24.01.18','FontSize',12,'Fontweight','normal')
xlim([0,23])
grid on; grid minor;

subplot(3,1,2)
plot(U,stdAoy_T, '.')
ylabel('$ \sigma_{ay} (m/s^2) $','Interpreter','latex','fontsize',15)
xlim([0,23])
ylim([0,0.045])
grid on; grid minor;

subplot(3,1,3)
plot(U,stdAot, '.')
xlabel('U (m/s)')
ylabel('$ \sigma_{\{a\}_{\theta}} (rad/s^2) $','Interpreter','latex','fontsize',15)
xlim([0,23])
grid on; grid minor;
set(gcf, 'color', 'w')

```

## Standardavvik mot middelvindhastighet (et år):

```

%% Vind fra sørvest, med og uten trafikk
clc;
close all; clearvars;
load('juli17juni18.mat')
figure('Position', [30 30 1200 650])
ind = find(meanDir>140&indTraffic==0); %Spesifiserer retning på vind, og om
trafikk har betydning
ind1 = find(meanDir>140&indTraffic==1);

subplot(3,2,1)
x = meanH(ind); %Gjennomsnittlig vindhastighet
y = stdAox_Tower(ind); %Standardavvik akselerasjon
c = meanYaw(ind); %gjennomsnittlig angrepsvinkel vind
markerSize = 8;
scatter(x,y,markerSize, c, 'filled') %plot
ylim([0,0.05])
title('Vind fra sørvest, uten trafikk','fontsize',12,'fontWeight','normal')
ylabel('$ \sigma_{ax} (m/s^2) $','Interpreter','latex','fontsize',14)
grid on; grid minor;
colorbar

subplot(3,2,3)
x = meanH(ind);

```

```

y = stdAoy_Tower(ind);
c = meanYaw(ind);
markerSize = 8;
scatter(x,y,markerSize, c, 'filled')
ylim([0,0.05])
ylabel('$ \sigma_{ay}(m/s^2) $', 'Interpreter', 'latex', 'fontsize', 14)
grid on; grid minor;
colorbar

subplot(3,2,5)
x = meanH(ind);
y = stdAoz_Tower(ind);
c = meanYaw(ind);
markerSize = 8;
scatter(x,y,markerSize, c, 'filled')
ylim([0,0.05])
xlabel('U (m/s)', 'fontsize', 12)
ylabel('$ \sigma_{az}(m/s^2) $', 'Interpreter', 'latex', 'fontsize', 14)
grid on; grid minor;
colorbar

subplot(3,2,2)
x = meanH(ind1);
y = stdAox_Tower(ind1);
c = meanYaw(ind1);
markerSize = 8;
scatter(x,y,markerSize, c, 'filled')
ylim([0,0.05])
xlim([0,25])
title('Vind fra sørvest, med trafikk', 'fontsize', 12, 'fontWeight', 'normal')
ylabel('$ \sigma_{ax}(m/s^2) $', 'Interpreter', 'latex', 'fontsize', 14)
grid on; grid minor;
colorbar

subplot(3,2,4)
x = meanH(ind1);
y = stdAoy_Tower(ind1);
c = meanYaw(ind1);
markerSize = 8;
scatter(x,y,markerSize, c, 'filled')
ylim([0,0.05])
xlim([0,25])
ylabel('$ \sigma_{ay}(m/s^2) $', 'Interpreter', 'latex', 'fontsize', 14)
grid on; grid minor;
colorbar

subplot(3,2,6)
x = meanH(ind1);
y = stdAoz_Tower(ind1);
c = meanYaw(ind1);
markerSize = 8;
scatter(x,y,markerSize, c, 'filled')
ylim([0,0.05])
xlim([0,25])
xlabel('U (m/s)', 'fontSize', 12)
ylabel('$ \sigma_{az}(m/s^2) $', 'Interpreter', 'latex', 'fontSize', 14)
grid on; grid minor;
colorbar
colormap summer
set(gcf, 'color', 'w')

```

```

%% Vind fra nordøst, med og uten trafikk
clc;
close all; clearvars;
load('juli17juni18.mat')
figure('Position', [30 30 1200 650])
ind = find(meanDir<140&indTraffic==0); %Spesifiserer retning på vind, og om
trafikk har betydning
ind1 = find(meanDir<140&indTraffic==1);

subplot(3,2,1)
x = meanH(ind);
y = stdAox_Tower(ind);
c = meanYaw(ind);
markerSize = 8;
scatter(x,y,markerSize, c,'filled')
ylim([0,0.03])
title('Vind fra nordøst, uten trafikk','fontSize',12,'fontWeight','normal')
ylabel('$ \sigma_{ax}(m/s^2) $','Interpreter','latex','fontSize',14)
grid on; grid minor;
colorbar

subplot(3,2,3)
x = meanH(ind);
y = stdAoy_Tower(ind);
c = meanYaw(ind);
markerSize = 8;
scatter(x,y,markerSize, c,'filled')
ylim([0,0.03])
ylabel('$ \sigma_{ay}(m/s^2) $','Interpreter','latex','fontSize',14)
grid on; grid minor;
colorbar

subplot(3,2,5)
x = meanH(ind);
y = stdAoz_Tower(ind);
c = meanYaw(ind);
markerSize = 8;
scatter(x,y,markerSize, c,'filled')
ylim([0,0.03])
xlabel('U (m/s)','fontSize',12)
ylabel('$ \sigma_{az}(m/s^2) $','Interpreter','latex','fontSize',14)
grid on; grid minor;
colorbar

subplot(3,2,2)
x = meanH(ind1);
y = stdAox_Tower(ind1);
c = meanYaw(ind1);
markerSize = 8;
scatter(x,y,markerSize, c,'filled')
ylim([0,0.03])
xlim([0,20])
title('Vind fra nordøst, med trafikk','fontSize',12,'fontWeight','normal')
ylabel('$ \sigma_{ax}(m/s^2) $','Interpreter','latex','fontSize',14)
grid on; grid minor;
colorbar

subplot(3,2,4)
x = meanH(ind1);

```

```

y = stdAoy_Tower(ind1);
c = meanYaw(ind1);
markerSize = 8;
scatter(x,y,markerSize, c, 'filled')
ylim([0,0.03])
xlim([0,20])
ylabel('$ \sigma_{ay}(m/s^2) $', 'Interpreter', 'latex', 'fontsize', 14)
grid on; grid minor;
colorbar

subplot(3,2,6)
x = meanH(ind1);
y = stdAoz_Tower(ind1);
c = meanYaw(ind1);
markerSize = 8;
scatter(x,y,markerSize, c, 'filled')
ylim([0,0.03])
xlim([0,20])
xlabel('U (m/s)', 'fontsize', 12)
ylabel('$ \sigma_{az}(m/s^2) $', 'Interpreter', 'latex', 'fontsize', 14)
grid on; grid minor;
colorbar
colormap summer
set(gcf, 'color', 'w')

```

## Standardavvik av akselerasjon om tårnakser

```

%% vind fra sørvest, med og uten trafikk
clc;
close all; clearvars;
load('juli17juni18.mat')
figure('Position', [30 30 1200 650])
ind = find(meanDir>140&indTraffic==0); %Spesifiserer retning på vind, og om
trafikk har betydning
ind1 = find(meanDir>140&indTraffic==1);

subplot(3,2,1)
x = meanH(ind); %Gjennomsnittlig vindhastighet
y = stdAot_Tower_x(ind); %Standardavvik akselerasjon
c = meanYaw(ind); %gjennomsnittlig angrepsvinkel vind
markerSize = 8;
scatter(x,y,markerSize, c, 'filled') %plot
ylim([0,0.005])
title('Vind fra sørvest, uten trafikk', 'fontsize', 12, 'fontWeight', 'normal')
ylabel('$ \sigma_{ax\theta}(rad/s^2) $', 'Interpreter', 'latex', 'fontsize', 14)
grid on; grid minor;
colorbar

subplot(3,2,3)
x = meanH(ind);
y = stdAot_Tower_y(ind);
c = meanYaw(ind);
markerSize = 8;
scatter(x,y,markerSize, c, 'filled')
ylim([0,0.005])
ylabel('$ \sigma_{ay\theta}(rad/s^2) $', 'Interpreter', 'latex', 'fontsize', 14)
grid on; grid minor;
colorbar

```

```

subplot(3,2,5)
x = meanH(ind);
y = stdAot_Tower_z(ind);
c = meanYaw(ind);
markerSize = 8;
scatter(x,y,markerSize, c, 'filled')
ylim([0,0.005])
xlabel('U (m/s)', 'fontSize',12)
ylabel('$ \sigma_{az\theta}(rad/s^2)$', 'Interpreter', 'latex', 'fontSize',14)
grid on; grid minor;
colorbar

subplot(3,2,2)
x = meanH(ind1);
y = stdAot_Tower_x(ind1);
c = meanYaw(ind1);
markerSize = 8;
scatter(x,y,markerSize, c, 'filled')
ylim([0,0.005])
xlim([0,25])
title('Vind fra sørvest, med trafikk', 'fontSize',12, 'fontWeight', 'normal')
ylabel('$ \sigma_{ax\theta}(rad/s^2)$', 'Interpreter', 'latex', 'fontSize',14)
grid on; grid minor;
colorbar

subplot(3,2,4)
x = meanH(ind1);
y = stdAot_Tower_y(ind1);
c = meanYaw(ind1);
markerSize = 8;
scatter(x,y,markerSize, c, 'filled')
ylim([0,0.005])
xlim([0,25])
ylabel('$ \sigma_{ay\theta}(rad/s^2)$', 'Interpreter', 'latex', 'fontSize',14)
grid on; grid minor;
colorbar

subplot(3,2,6)
x = meanH(ind1);
y = stdAot_Tower_z(ind1);
c = meanYaw(ind1);
markerSize = 8;
scatter(x,y,markerSize, c, 'filled')
ylim([0,0.005])
xlim([0,25])
xlabel('U (m/s)', 'fontSize',12)
ylabel('$ \sigma_{az\theta}(rad/s^2)$', 'Interpreter', 'latex', 'fontSize',14)
grid on; grid minor;
colorbar
colormap summer
set(gcf, 'color', 'w')

%% vind fra nordøst, med og uten trafikk
clc;
close all; clearvars;
load('juli17juni18.mat')

```

```

figure('Position', [30 30 1200 650])
ind = find(meanDir>140&indTraffic==0); %Spesifiserer retning på vind, og om
trafikk har betydning
ind1 = find(meanDir>140&indTraffic==1);

subplot(3,2,1)
x = meanH(ind); %Gjennomsnittlig vindhastighet
y = stdAot_Tower_x(ind); %Standardavvik akselerasjon
c = meanYaw(ind); %gjennomsnittlig angrepsvinkel vind
markerSize = 8;
scatter(x,y,markerSize, c, 'filled') %plot
ylim([0,0.005])
title('Vind fra nordøst, uten trafikk', 'fontSize',12, 'fontWeight', 'normal')
ylabel('$ \sigma_{ax\theta}(\text{rad/s}^2)$', 'Interpreter', 'latex', 'fontSize',14)
grid on; grid minor;
colorbar

subplot(3,2,3)
x = meanH(ind);
y = stdAot_Tower_y(ind);
c = meanYaw(ind);
markerSize = 8;
scatter(x,y,markerSize, c, 'filled')
ylim([0,0.005])
ylabel('$ \sigma_{ay\theta}(\text{rad/s}^2)$', 'Interpreter', 'latex', 'fontSize',14)
grid on; grid minor;
colorbar

subplot(3,2,5)
x = meanH(ind);
y = stdAot_Tower_z(ind);
c = meanYaw(ind);
markerSize = 8;
scatter(x,y,markerSize, c, 'filled')
ylim([0,0.005])
xlabel('U (m/s)', 'fontSize',12)
ylabel('$ \sigma_{az\theta}(\text{rad/s}^2)$', 'Interpreter', 'latex', 'fontSize',14)
grid on; grid minor;
colorbar

subplot(3,2,2)
x = meanH(ind1);
y = stdAot_Tower_x(ind1);
c = meanYaw(ind1);
markerSize = 8;
scatter(x,y,markerSize, c, 'filled')
ylim([0,0.005])
xlim([0,25])
title('Vind fra nordøst, med trafikk', 'fontSize',12, 'fontWeight', 'normal')
ylabel('$ \sigma_{ax\theta}(\text{rad/s}^2)$', 'Interpreter', 'latex', 'fontSize',14)
grid on; grid minor;
colorbar

subplot(3,2,4)
x = meanH(ind1);
y = stdAot_Tower_y(ind1);

```

```

c = meanYaw(ind1);
markerSize = 8;
scatter(x,y,markerSize, c, 'filled')
ylim([0,0.005])
xlim([0,25])
ylabel('$ \sigma_{ay\theta}(rad/s^2)$', 'Interpreter', 'latex', 'fontsize', 14)
grid on; grid minor;
colorbar

subplot(3,2,6)
x = meanH(ind1);
y = stdAot_Tower_z(ind1);
c = meanYaw(ind1);
markerSize = 8;
scatter(x,y,markerSize, c, 'filled')
ylim([0,0.005])
xlim([0,25])
xlabel('U (m/s)', 'fontsize', 12)
ylabel('$ \sigma_{az\theta}(rad/s^2)$', 'Interpreter', 'latex', 'fontsize', 14)
grid on; grid minor;
colorbar
colormap summer
set(gcf, 'color', 'w')

```