




Universitetet
i Stavanger

DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

MASTEROPPGAVE

Studieprogram/spesialisering: Konstruksjoner og materialer med fordypning i byggkonstruksjoner	Vårsemesteret, 2018 Åpen / Konfidensiell
Forfatter: Kim Halvard M. Aronsen	 (signatur forfatter)
Fagansvarlig: Jasna B. Jakobsen Veileder(e): Jasna B. Jakobsen (UiS) / Bruno Villoria (Statens vegvesen)	
Tittel på masteroppgaven: Analyse av vind- og responsmålinger av en hengebro med hovedvekt på sammenhengen mellom brotårnets og brodekkets svingninger Engelsk tittel: Analysis of wind and response data of a suspension bridge with emphasis on the relationship between the bridge tower and the bridge deck fluctuations	
Studiepoeng: 30	
Emneord: Hengebro Konstruksjonsdynamikk Måledata Middelvind Responsspektra Turbulensintensitet	Sidetall: 97 + vedlegg: 38 Stavanger, 14.06.2018

Forord

Denne masteroppgaven er den avsluttende delen av mastergraden konstruksjoner og materialer med fordypning i byggkonstruksjoner ved Universitetet i Stavanger. Oppgaven omhandler innhenting og studering av måledata ved Lysefjordbrua i Forsand kommune, for å så gjøre en analyse av den dynamiske responsen til broen. Valget av oppgave er basert på min interesse for naturlaster og konstruksjonsdynamikk hvor Prof. Jasna B. Jakobsen foreleste.

Måledataene er benyttet for å analysere de dynamiske lastene ved broen, hvor denne oppgaven hovedsakelig fokuserer på akselerasjonene fra brodekket og det nordvestlige brotårnet til broen. Som et matematisk og grafisk hjelpemiddel er MATLAB benyttet for alle resultatfigurer presentert i oppgaven.

I forbindelse med oppgaven vil jeg først og fremst takke min veileder Prof. Jasna B. Jakobsen for veiledning gjennom både møter og e-post samt henvisning til relevante fagfolk som kunne bidra med hjelp. Jeg vil også rette en stor takk til postdoktor Etienne Cheynet for god veiledning og tålmodighet i forbindelse med spørsmål rundt MATLAB og måledataene som er benyttet. I tillegg vil jeg takke Prof. Jonas T. Snæbjørnsson og postdoktor Jungao Wang for deres veiledninger og gode diskusjoner som har vært til stor nytte.

Jeg vil også takke Statens vegvesen for muligheten til å skrive denne oppgaven, der Bruno Villoria var kontaktperson. Til slutt vil jeg takke min kjæreste, medstudenter og familie for støtten gjennom tykt og tynt i løpet av mine fem år her ved Universitetet i Stavanger.

UiS, Stavanger, 14.06.18

Kim Halvard Midtvik Aronsen

Sammendrag

Denne masteroppgaven er en studie av de dynamiske responsene induisert av vind på hengebroen Lysefjordbrua. Mer spesielt er responsen mellom brodekkets vertikale retning og det nordvestlige brotårnets i broens lengderetning analysert, med formål om å finne en sammenheng mellom responsene i de ulike broelementene. I samarbeid med Statens vegvesen og deres prosjekt «Ferjefri E39» har Universitetet i Stavanger montert flere målesensorer på broen, hvor de første sensorene ble montert i 2013. Dermed har det vært en kontinuerlig overvåking av broens dynamiske oppførsel gjennom snart 5 år.

Lysefjordbrua er en ett-spenns hengebro med en total lengde på 639 m og et hovedspenn på 446 m. Brotårnene er 102 m høye, hvor hvert brotårn består av to betongsøyler som er festet sammen med tverrbjelker. Broen er også modellert i elementmodell-programmet Abaqus, gjort av postdoktor J. Wang. Resultatene fra modellen ved to ulike tilfeller med middelvind, ett med kraftig vind og ett med svak vind, er sammenliknet med målte resultater ved tilsvarende middelvinder.

Måledata fra en periode på 35 dager i starten av 2017 er brukt som grunnlag for analysen gjort i denne oppgaven. Ved hjelp av MATLAB er rådataene prosessert, analysert og lagret som .mat filer som er selve grunnlaget for alle resultater presentert, der det i denne oppgaven hovedsakelig er fokusert på 10 minutters intervaller for den dynamiske responsen. Det er valgt ut ett 10 minutters intervall for dagen med høyest middelvindhastighet, og tilsvarende ett 10 minutters intervall for dagen med en svakere middelvindhastighet.

Analysen av den dynamiske responsen for brodekket omfatter akselerasjonene i retningene vertikalt, lateralt og torsjon om broens lengderetning. For brotårnet omfatter akselerasjonene i retningene langsgående med broen, lateralt og torsjon om broens lengderetning. Selve sammenlikningen mellom de ulike broelementenes responser er gjort ved å se på responsspektra, der teorien som spektraltetthet er benyttet. I beregningene er Burgs metode benyttet for estimering av power spektraltetthet, eller PST.

Basert på resultatene som er presentert i denne oppgaven er det en reell målbar sammenheng mellom responsen i den vertikale retningen for brodekket og responsen broens lengderetning for brotårnet. Korrelasjonen var høyest for tilfellet med kraftig vind og den første vertikale symmetriske svingeformen (VS1) var den svingeformen hvor sammenhengene var størst mellom de ulike broelementene.

Innhold

Forord	I
Sammendrag	II
Innhold	III
Notasjon	VI
Forkortelser og definisjoner	VIII
Figurliste	IX
Tabelliste	XIII
1 Introduksjon	1
1.1 Ryfylke og dets transportsystem.....	1
1.2 Broer med kabelsystem.....	2
1.2.1 Hengebroer.....	3
1.2.1.1 Lysefjordbrua.....	4
1.3 Problemstillinger.....	6
1.4 Avgrensinger.....	7
1.5 Oppgavestruktur.....	8
2 Vindteori	9
2.1 Middelvindprofiler.....	10
2.1.1 Logaritmisk lov profil.....	10
2.1.2 Power lov profil.....	11
2.1.3 Vindbeskrivelse i NS-EN 1991-1-4.....	12
2.1.4 Vindbeskrivelse i NORSOK N-003.....	13
2.2 Statisk vind.....	15
2.3 Signalbehandling.....	17
2.3.1 Sannsynlighetstetthet.....	17
2.3.2 Korrelasjon.....	19
2.3.3 Tidsskala og integral lengdeskala.....	21
2.3.4 Fourier-analyse.....	22

2.3.5	Spektra	24
2.3.6	Estimat for spektraltetthet	27
2.3.6.1	Nyquistfrekvens	27
2.3.6.2	Welch-metoden	27
2.3.6.3	Burgs metode	28
2.4	Dynamisk vind	29
2.4.1	Turbulens	29
2.4.2	Flutter	32
2.4.3	Virvelinduserte vibrasjoner	33
2.4.4	Galoppering	35
2.4.5	Buffeting	37
3	Case-studie: Lysefjordbrua	38
3.1	Geometri	38
3.1.1	Brobjelke	38
3.1.2	Hengekabler	39
3.1.3	Hovedkabler	39
3.1.4	Brotårn	40
3.1.5	Forankring	42
3.2	Instrumentering	43
3.2.1	Anemometere og værstasjon	44
3.2.2	Akselerometere og GPS-sensor	45
3.2.3	Datainnsamling	47
3.3	Nøkkelparametere	48
3.4	Egenfrekvenser	49
4	Resultater og diskusjon	50
4.1	Vind	50
4.2	Turbulensintensitet	58
4.3	Respons	60
4.3.1	Akselerasjoner	60
4.3.1.1	Brodekke	61

4.3.1.2	Brotårn.....	63
4.3.2	Abaqus-modell.....	64
4.3.3	Spektraltetthet.....	65
4.3.3.1	Brodekke.....	65
4.3.3.2	Brotårn.....	69
4.3.4	Sammenheng mellom brotårn og brodekke.....	71
5	Konklusjon.....	81
5.1	Videre studier.....	81
	Referanser.....	82

Vedlegg:

Vedlegg A: Tegninger fra Statens vegvesen

Vedlegg B: Abaqus-modell

Vedlegg C: Matlab-rutiner

Notasjon

Modifiserte bokstaver:

Prikker over symboler (f.eks. \dot{r} , \ddot{r}) indikerer tidsderiverte, dvs. d/dt , d^2/dt^2 .

Linje (–) over variabel (f.eks. \bar{U}) indikerer dens gjennomsnittsverdi.

Indekser:

Indeks x, y eller z refererer til den korresponderende konstruksjonsaksen.

u, v eller w refererer til turbulenskomponenter.

D, L, M refererer til hhv. drag, løft og moment.

max, min er forkortelser for hhv. maksimum og minimum.

Latinske bokstaver:

A	Areal, tverrsnittsareal
B	Tverrsnittsbredde
C, \mathbf{C}	Dempningskoeffisient eller matrise som inneholder dempningskoeffisient
D	Tverrsnittsdybde
E	Elastisitetsmodul
e	Eksentrisitet, avstand mellom skjærsenter og tyngdepunkt
I_u, I_v, I_w	Turbulensintensitet til strømkomponentene u, v og w
I_y, I_z	Treghetsmoment iht. y - eller z -akse
K, \mathbf{K}	Stivhet, stivhetsmatrise
m, \mathbf{M}	Masse, massematrise
Re	Reynolds tall
St	Strouhals tall
S	Responsspektrum
t, T	Tid, lengden på tidsserien
U	Momentan vindhastighet i hovedstrømsretningen
u	Fluktuerende langsgående horisontal vindhastighet-komponent
v	Fluktuerende lateral horisontal vindhastighet-komponent
w	Fluktuerende vertikal vindhastighet-komponent
X, Y, Z	Kartesiske globale koordinater
x, y, z	Kartesiske lokale koordinater

z_0	Ruhetslengde
z_{min}	Minimumshøyde for bruk i logaritmisk vindprofil
z_h	«Nullpunktets forskyvning»

Greske bokstaver:

α	Angrepsvinkel
β	Konstant, koeffisient
γ	Sikkerhetsfaktor
δ	Inkrementell forskyvningsoperator
ζ eller ζ	Dempningsforhold eller dempningsforhold-matrise
ν	Kinematisk viskositet
ρ	Lufttetthet
σ, σ^2	Standardavvik, varians
τ	Tidssteg

Symboler med både greske og latinske bokstaver:

Δt	Tidssteg
Δx	Lengdesteg

Forkortelser og definisjoner

Forkortelse	Definisjon
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, TA2, TA3	1., 2. og 3. asymmetriske torsjonssvingeform
TS1, TS2, TS3	1., 2. og 3. symmetriske torsjonssvingeform
PST	Power spektraltetthet
AR	Auto-regressiv modell
[#]	Referansehenvisning til referansenr. #
[#, s. x]	Referansehenvisning for figurer/bilder fra side x fra referansenr. #

Figurliste

Figur 1.1 Oversiktsbilde over Ryfylke	1
Figur 1.2 Tacoma Narrows Bridge før kollaps	2
Figur 1.3 Tacoma Narrows Bridge etter kollaps	2
Figur 1.4 Hengebro, basert på Gimsing og Georgakis sin illustrasjon	3
Figur 1.5 Lysefjordbrua.....	4
Figur 1.6 Oversikt over Lysefjordbrua (topp) og tverrsnittet av broens brokasse (bunn)	5
Figur 1.7 Oppgavestrukturen for denne oppgaven.....	8
Figur 2.1 Vindhastigheten og turbulensprofiler	9
Figur 2.2 Sammenlikning av nevnte middelvindprofiler, laget i MATLAB	14
Figur 2.3 Middelvindlast i koordinatsystem for vind og konstruksjon, modifisert.....	15
Figur 2.4 Tidsserie for horisontalvind, Lysefjordbrua (10 min.)	17
Figur 2.5 Normalfordeling	18
Figur 2.6 Histogram for u-komponent, inkludert normalfordeling, mellom 00:00-00:10 den 02.03.17 med $\bar{U} = 5.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	18
Figur 2.7 Forskjellen på uavhengige og korrelerte målinger	19
Figur 2.8 Autokorrelasjon	19
Figur 2.9 Normalisert horisontalt vindspektrum, av von Karman (1948).....	25
Figur 2.10 Normalisert vertikalt vindspektrum, av Busch og Panofsky (1968)	25
Figur 2.11 Fluidstrømning forbi en sylinder	33
Figur 2.12 Endring av strømningsmønster med Reynolds tall.....	34
Figur 2.13 Dynamisk respons av en slank brokonstruksjon under vindpåkjenning.....	37
Figur 3.1 Oversikt over broens elementer, modifisert	38
Figur 3.2 Tverrsnitt av brokasse, illustrasjon.....	39
Figur 3.3 Nordvestlig tårn, sett sørfra.	40
Figur 3.4 Tårnhus, sørlig tårnben.	40
Figur 3.5 Sørlig tårnhus på toppen av nordvestlig brotårn, basert på tegning fra Statens vegvesen	41
Figur 3.6 Tårnsadel i det sørlige tårnbenet.....	41
Figur 3.7 Forankring i fjell, nordvestlig side, basert på tegning fra Statens vegvesen	42
Figur 3.8 Fundamentering i fjell, nordvestlig side	42
Figur 3.9 Instrumentering av Lysefjordbrua, modifisert.....	43
Figur 3.10 Anemometer montert på henger	44

Figur 3.11 Anemometer montert på stang over henger.....	44
Figur 3.12 Værstasjon, type Vaisala WXT520	45
Figur 3.13 Akselerometer i brokasse.....	45
Figur 3.14 Plassering av akselerometer i brokasse	45
Figur 3.15 Akselerometer i tårn, nordlig tårnben.....	46
Figur 3.16 Akselerometer i tårn, sørlig tårnben.	46
Figur 3.17 RTK-GPS, base-antenne.....	46
Figur 3.18 RTK-GPS, «rover»-antenne	46
Figur 4.1 Oversikt over den horisontale totale middelvinden ($\bar{H}_{10\min}$), for hele analyseperioden.....	51
Figur 4.2 Oversikt over horisontal total middelvind den 07.02.17, med $\bar{H}_{\text{dag}} = 10.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	52
Figur 4.3 3t-intervall kl. 09:00-12:00 den 07.02.17, med $\bar{H}_{10\min} = 12.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	53
Figur 4.4 Tidsserier for vind ved H08 09:10-09:20 den 07.02.17, med $\bar{U} = 17.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	54
Figur 4.5 Tidsserier for mellom 09:16:20-09:17:00 den 07.02.17, med $\bar{U} = 17.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	55
Figur 4.6 Vindrose for H08 den 06-08.02.17	56
Figur 4.7 Vindrose for H08 den 07.02.17, med $\bar{U}_{\text{dag}} = 17.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	56
Figur 4.8 Vindrose for H08 den 10.03.17, med $\bar{U}_{\text{dag}} = 1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	56
Figur 4.9 Histogram over horisontal turbulens fra vindmålingene mellom 09:10-09:20 ved 07.02.17, med $\bar{U} = 17.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	57
Figur 4.10 Turbulensintensitet mot middelvind, med trendlinje, for 07.02.17.....	58
Figur 4.11 Oversikt over turbulensintensiteter og middelvindhastigheter for 3 dager	59
Figur 4.12 Tidsserier for akselerasjon for alle akselerometrene installert i brokassen, 09:10-09:20 den 07.02.17, med $\bar{U} = 17.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. De ulike retningene som er vist (fra topp til bunn) er lateral (x), langsgående (y), vertikal (z) og torsjonal om langsgående akse (θ).....	61
Figur 4.13 Tidsserier for akselerasjon for alle akselerometer-parene installert i brokassen, 00:00-00:10 den 10.03.17, med $\bar{U} = 1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. De ulike retningene som er vist (fra topp til bunn) er lateral (x), langsgående (y), vertikal (z) og torsjon om langsgående akse (θ).	62
Figur 4.14 Tidsserier for akselerasjoner for akselerometer-paret installert i brotårnet, 09:10-09:20 den 07.02.17, med $\bar{U} = 17.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. De ulike retningene som er vist (fra topp til bunn) er langsgående (x), lateral (y), vertikal (z) og torsjon om langsgående akse (θ).	63
Figur 4.15 Akselerasjonsspektra for alle akselerometer-parene installert i brokassen med logaritmisk skala på y-aksen, 09:10-09:20 den 07.02.17, med $\bar{U} = 17.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. De ulike retningene som er vist (fra topp til bunn) er lateral (x), vertikal (z) og torsjon om langsgående akse (θ).	65

Figur 4.16 Akselerasjonsspektra for H09 nær det nordvestlige brotårnet med logaritmisk skala på y-aksen, 09:10-09:20 den 07.02.17, med $\bar{U} = 17.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ mellom 0-2 Hz. De ulike retningene som er vist (fra topp til bunn) er lateral (x) vertikal (z) og torsjon om langsgående akse (θ).	66
Figur 4.17 Akselerasjonsspektra for H18 nær midten av broen med logaritmisk skala på y-aksen, 09:10-09:20 den 07.02.17, med $\bar{U} = 17.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ mellom 0-2 Hz. De ulike retningene som er vist (fra topp til bunn) er lateral (x) vertikal (z) og torsjon om langsgående akse (θ). ..	67
Figur 4.18 Akselerasjonsspektra for alle akselerometer-parene installert i brokassen med logaritmisk skala på y-aksen, 00:00-00:10 den 10.03.17, med $\bar{U} = 1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. De ulike retningene som er vist (fra topp til bunn) er lateral (x), vertikal (z) og torsjon om langsgående akse (θ).	67
Figur 4.19 Akselerasjonsspektra for H09 nær det nordvestlige brotårnet med logaritmisk skala på y-aksen, 00:00-00:10 den 10.03.17, med $\bar{U} = 1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ mellom 0-2 Hz. De ulike retningene som er vist (fra topp til bunn) er lateral (x) vertikal (z) og torsjon om langsgående akse (θ). ..	68
Figur 4.20 Akselerasjonsspektra for H18 nær midten av broen med logaritmisk skala på y-aksen, 00:00-00:10 den 10.03.17, med $\bar{U} = 1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ mellom 0-2 Hz. De ulike retningene som er vist (fra topp til bunn) er lateral (x) vertikal (z) og torsjon om langsgående akse (θ).	68
Figur 4.21 Akselerasjonsspektra for akselerometer-paret installert i brotårnet med logaritmisk skala på y-aksen, 09:10-09:20 den 07.02.17, med $\bar{U} = 17.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. De ulike retningene som er vist (fra topp til bunn) er langsgående med brobanen (x), lateral (y) og torsjon om langsgående akse (θ).	69
Figur 4.22 Lateral svingeform for det nordvestlige brotårnet, her til høyre i figuren. Laget av postdoktor J. Wang i Abaqus.	70
Figur 4.23 Sammenlikning av akselerasjonsspektra for brotårnet i broens lengderetning og brodekkets vertikale respons (ved H09 og H18) med logaritmisk skala på y-aksen, 09:10-09:20 den 07.02.17, med $\bar{U} = 17.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	71
Figur 4.24 Tidsserier; sammenlikning mellom filtrert og opprinnelig respons for brotårnet i broens lengderetning og brodekkets vertikale retning (H18), for VS1 ved 09:10-09:20 den 07.02.17, med $\bar{U} = 17.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	72
Figur 4.25 Filtrert signal for VS1 for brodekkets vertikale respons (H18) og brotårnets respons i lengderetningen, ved 09:10-09:20 den 07.02.17, med $\bar{U} = 17.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	72
Figur 4.26 Tidsserier; sammenlikning mellom filtrert og opprinnelig respons for brotårnet i broens lengderetning og brodekkets vertikale retning (H18), for VS2 ved 09:10-09:20 den 07.02.17, med $\bar{U} = 17.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	73

Figur 4.27 Filtrert signal for VS2 for brodekkets vertikale respons (H18) og brotårnets respons i broens lengderetning, ved 09:10-09:20 den 07.02.17, med $\bar{U} = 17.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	73
Figur 4.28 Tidsserier; sammenlikning mellom filtrert og opprinnelig respons for brotårnet i broens lengderetning og brodekkets vertikale retning (H18), for VS3 ved 09:10-09:20 den 07.02.17, med $\bar{U} = 17.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	74
Figur 4.29 Filtrert signal for VS3 for brodekkets vertikale respons (H18) og brotårnets respons i broens lengderetning, ved 09:10-09:20 den 07.02.17, med $\bar{U} = 17.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	74
Figur 4.30 Sammenlikning av akselerasjonsspektra for brotårnet i broens lengderetning og brodekkets vertikale respons (ved H09 og H18) med logaritmisk skala på y-aksen, 00:00-00:10 den 10.03.17, med $\bar{U} = 1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	75
Figur 4.31 Filtrert signal for VS1 for brodekkets vertikale respons (H18) og brotårnets respons i broens lengderetning, ved 00:00-00:10 den 10.03.17, med $\bar{U} = 1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	75
Figur 4.32 Filtrert signal for VS2 for brodekkets vertikale respons (H18) og brotårnets respons i broens lengderetning, ved 00:00-00:10 den 10.03.17, med $\bar{U} = 1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	76
Figur 4.33 Filtrert signal for VS3 for brodekkets vertikale respons og brotårnets respons i broens lengderetning, ved 00:00-00:10 den 10.03.17, med $\bar{U} = 1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	76
Figur 4.34 Sammenlikning av akselerasjonsspektra for brotårnet (torsjon om broens langsgående retning) og brodekke (torsjon om langsgående akse, ved H09 og H18) med logaritmisk skala på y-aksen, 09:10-09:20 den 07.02.17, med $\bar{U} = 17.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	77
Figur 4.35 Sammenlikning av akselerasjonsspektra for brotårnet (torsjon om broens langsgående akse) og brodekke (torsjon om broens langsgående akse, ved H09 og H18) med logaritmisk skala på y-aksen, 00:00-00:10 den 10.03.17, med $\bar{U} = 1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	77
Figur 4.36 Filtrert responsspektrum for VS1, med $\bar{U} = 17.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	78
Figur 4.37 Filtrert responsspektrum for VS2, med $\bar{U} = 17.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	78
Figur 4.38 Filtrert responsspektrum for VS3, med $\bar{U} = 17.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	79

Tabelliste

Tabell 1.1 Verdens lengste hengebroer, basert på.....	3
Tabell 2.1 Terrengruhetskategorier med tilhørende parametre.....	13
Tabell 3.1 Oversikt over sensorer installert på broen.....	47
Tabell 3.2 Nøkkelparametere for Lysefjordbrua.....	48
Tabell 3.3 Sammenlikning av egenfrekvensene for broen.....	49
Tabell 4.1 Sammenlikning av lineær sammenheng mellom brodekkets og brotårnets respons, med målte data ($\bar{U} = 17.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) og Abaqus-modell.	79

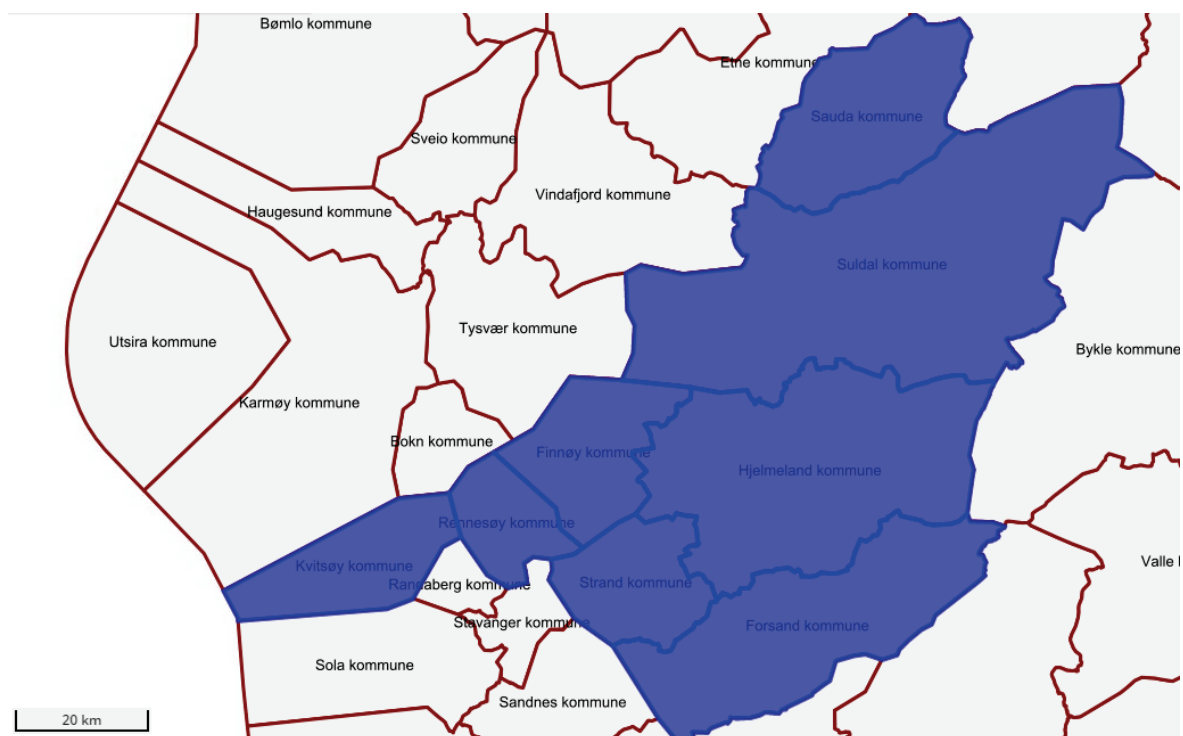
1 Introduksjon

Denne oppgaven omhandler virkningen av vindlast på Lysefjordbrua som er den lengste hengebroen i Rogaland [1]. Broen er lokalisert i Forsand kommune som er en del av området Ryfylke.

1.1 Ryfylke og dets transportsystem

Fra gammelt av gikk trafikken i Ryfylke for det meste på sjøen med lokalbåter. Etter 1960 skjøt vegutbyggingen fart i takt med det økte antall biler. Det førte til at sjøtransporten endret seg ved at lokalbåtene ble erstattet med hurtigbåter og fergeleier. I 1984 ble det satt i gang et arbeid med en ny transportplan for Ryfylke. Planen gikk ut på at man ønsket fergefri forbindelse mellom Nord-Jæren og Ryfylke-kommunene Hjelmeland, Forsand og Strand.

Vegdirektoratet lanserte i midten av 1980-årene Høgsfjorden som et aktuelt sted for fjordkryssing med rørbro. I 1998 gikk så fylkestinget inn for realisering av prosjektet på bestemte vilkår, men prosjektet strandet. I mellomtiden hadde Lysefjordbrua, som denne oppgaven omhandler, blitt bygget og tatt i bruk slik at denne fjorden kunne krysses uten bruk av ferge [2]. Figur 1.1 viser hvilke kommuner Ryfylke omfatter.



Figur 1.1 Oversiktsbilde over Ryfylke, laget ved hjelp av [3]

Først i 2019 skal det etter planen bli fergefri forbindelse mellom Nord-Jæren og de tre nevnte Ryfylke-kommunene. Dette prosjektet blir kalt «Ryfast» og ble vedtatt av Stortinget i 2012 og er planlagt ferdig i 2019 [4]. Hvis «Ryfast» blir ferdig i tide, vil det altså være over 40 år fra idé til virkelighet for en total fergefri forbindelse i dette området.

1.2 Broer med kabelsystem

Ettersom broer med kabelsystem egner seg godt for lange spenn er disse broene, dvs. hengebroer og skråstagsbroer, de mest populære brotypene der hengebroer primært er benyttet for lengre spenn. Broene er fleksible og de har lav dempning og vekt.

Den eldste hengebroen som er bevart, og mest sannsynlig den mest kjente av de første hengebroene er An-Lan-broa i Kuanhsien i Kina som er på verdensarvlisten til UNESCO. Den er over 1000 år gammel og har en totallengde på 320 meter og et hovedspenn på 61 meter. Den regnes å være den eldste hengebroen som fortsatt har trafikk [5].

Den første kjente kollapsen på grunn av vind på en bro med kabelsystem var Dryburgh Abbey Bridge i Skottland, satt opp i 1817. Broen var en skråstagsbro for fotgjengere med et hovedspenn på 79 m. Kollapsen skjedde i januar 1818 under en storm da støttene røk. Denne hendelsen, sammen med kollapsen til Nienburg (over elven Saale i Tyskland) i 1824, førte til at man unngikk å bygge kabelstøttede broer i mer eller mindre enn et århundre [6].



Figur 1.2 Tacoma Narrows Bridge før kollaps [7, s. 17]



Figur 1.3 Tacoma Narrows Bridge etter kollaps [7, s. 17]

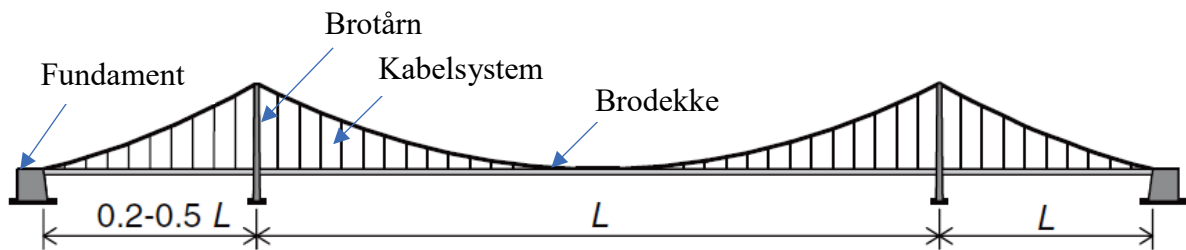
Den kanskje mest kjente broen som har kollapset, frem til i dag, er hengebroen Tacoma Narrows Bridge i 1940. Hovedspennet til broen var på 853 m, og kollapset på grunn av såkalt torsjonsflutter, som omtales i kapittel 2.4.2, ved en moderat vindhastighet (19 m/s) [7].

1.2.1 Hengebroer

Man kan dele opp broens konstruksjon i fire hovedkomponenter, som vist i Figur 1.4:

- (1) Brodekke
- (2) Kabelsystem som holder brodekket
- (3) Brotårn
- (4) Fundament

Hengebro-systemet består av en parabolisk hovedkabel og vertikale hengekabler som er festet i brodekket fra hovedkabelen. Det mest vanlige oppsettet av en hengebro er tre spenn; et hovedspenn mellom tårnene samt to mindre spenn på endene av broen.



Figur 1.4 Hengebro, basert på Gimsing og Georgakis sin illustrasjon [6, s. 2]

Figur 1.4 viser en typisk tre-spenns hengebro, hvor både sidespenn og hovedspenn bæres av hovedkabelen. I de fleste tilfeller er disse broene symmetriske, dvs. at sidespennene er av lik lengde. Det kan derimot være spesielle forhold og terreng som kan føre til at man må ha ulik sidespennslengde. For de ulike broene man bygger i dag egner hengebroer seg best for å krysse lange spenn, og kan brukes til over 2 km lange spenn [6]. I tabellen nedenfor er broene med de lengste eksisterende hovedspennene listet:

Tabell 1.1 Verdens lengste hengebroer, basert på [8]

#	Originalt navn	Hovedspenn [m]	Land	Åpningsår
1	Akashi Kaikyō Bridge	1991	Japan	1998
2	Xihoumen Bridge	1650	Kina	2009
3	Storebæltsbroen	1624	Danmark	1998
4	Osman Gazi Bridge	1550	Tyrkia	2016
5	Yi Sun-sin Bridge	1545	Sør-Korea	2012

6	Humber Bridge	1410	England	1981
7	Yavuz Sultan Selim Bridge	1408	Tyrkia	2015
8	Tsing Ma Bridge	1337	Hong Kong	1997
9	Hardangerbrua	1310	Norge	2013
10	Verrazano-Narrows Bridge	1298	USA	1964

Tabell 1.1 viser de 10 lengste trafikkerte hengebroene i verden i dag. Det er allerede broer under bygging som kommer inn på denne listen etter hvert, blant annet «Çanakkale 1915 Bridge» i Tyrkia med sitt 2023 meter lange hovedspenn. Ferdigstillelse og åpning av broen er planlagt til 2023 [9]. Her i Norge vurderer man flere hengebro-løsninger som kan medføre verdensrekord i hovedspennlengde, som for hengebro-løsningen for kryssing av Sognefjorden [10].

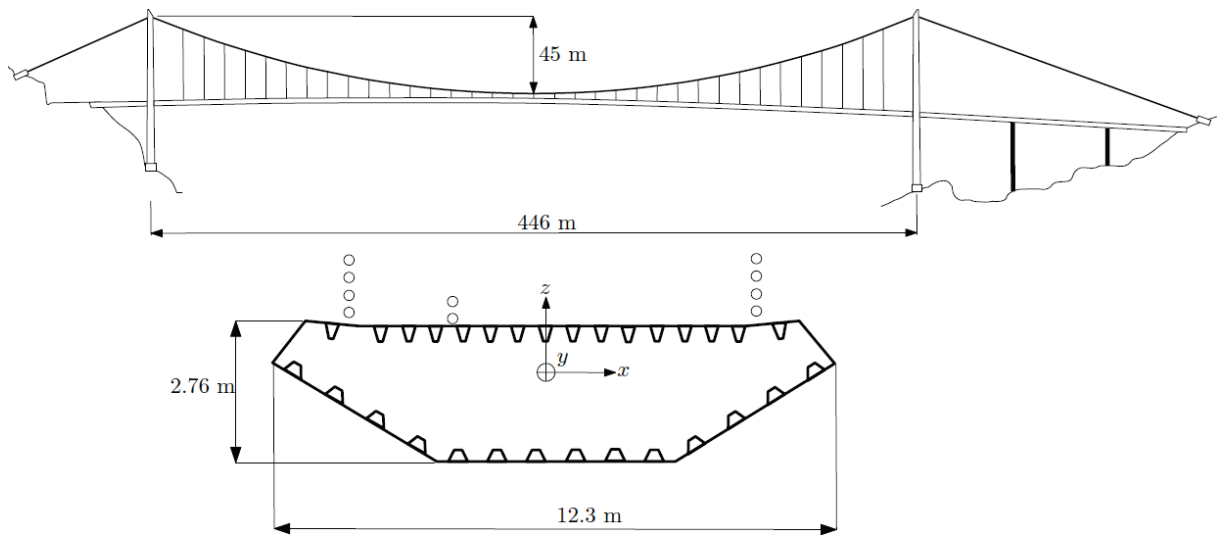
1.2.1.1 Lysefjordbrua



Figur 1.5 Lysefjordbrua, Foto: Jonas Snæbjørnsson

Lysefjordbrua er en ett-spenns hengebro, lokalisert i Rogaland som krysser Lysefjorden i Forsand kommune. Mens brodekket i hovedspennet bæres av hovedkabelen og tårnene, er sidespenn utformet som viadukter. Broen ble åpnet i desember 1997, 19 uker foran skjema. Den har en total lengde på 639 m, med et hovedspenn på 446 m. Figur 1.5 viser Lysefjord-

brua fra sørlig side. Tårnene er 102 m høye og består av betong (type C45/C55). Den aerodynamiske brokassen er bygget i stål (type S355). Selve hovedkabel-systemet består av seks kabler, av typen spiralslått lukket, på hver side anordnet i ett lag og forankret direkte i fjell [11].



Figur 1.6 Oversikt over Lysefjordbrua (topp) og tverrsnittet av broens brokasse (bunn) [12, s. 36]

1.3 Problemstillinger

Vindindusert respons er veldig ofte den bestemmende faktoren i dimensjoneringen av hengebroer med lengre spenn. På grunn av dets høye slankhet og følsomhet for dynamisk vindlast, får vanligvis brodekkets bevegelse mest oppmerksomhet. Vindtunnel-tester gjøres for å kunne optimalisere formen til brodekket. Normalt er ikke like mye oppmerksomhet gitt til brotårnene, da de har høyere stivhet som gjør dem mer vindbestandig. For frittstående brotårn, før installasjon av kablene, er svingninger på grunn av turbulens og virvelinduserte krefter blitt observert [13].

Oppgaven omhandler de dynamiske lastene som virker på hengebroer, hvor Lysefjordbrua er benyttet som case-studie. Fra før av er brodekkets respons på grunn av turbulens og trafikklast grundig studert med utgangspunkt i tilgjengelige måledata. Måledataene inkluderer også akselerasjoner i toppen av det nordvestlige brotårnet, som frem til nå ikke har vært grundig analysert. Denne oppgaven har som formål å utnytte disse måledataene til å gi enda mer komplett bilde av broens dynamiske virkemåte. Brotårnets bevegelser er studert i frekvensplan, med hovedvekt på sammenhengen mellom bevegelsen til tårnene og brodekket, det vil si de globale svingeformene til broen. Måledata fra 35 dager, nærmere bestemt 04.02.17 – 10.03.17, er brukt som grunnlag for analysen. Resultatene er også sammenliknet med en elementmodell av broen laget i Abaqus av postdoktor Jungao Wang.

1.4 Avgrensinger

Som nevnt i forrige delkapittel er måledataene avgrenset til en periode på 35 dager (04.02.17 – 10.03.17). Dette er gjort for å spare tid samt at perioden inneholdt gode vinddata med både svak og kraftig vind. I dette avgrensede datasettet er det fokusert på dagen med størst middelvind i tillegg til en annen dag med svakere vind for at en sammenlikning kan gjøres mellom dem. Deretter er en statistisk analyse av brotårnets respons som funksjon av brodekkets respons foretatt, med utgangspunkt i 10 minutter lange vind- og akselerasjonstidsserier.

Inne i brodekket er det fire par akselerometre ved fire seksjoner langs broen. I denne oppgaven er det i hovedsak fokusert på seksjonene som viser asymmetriske og symmetriske svingeformer, som betyr at kun seksjonene H09 og H18 ved brodekket er analysert i detalj fordi den lokale responsen er dominert av henholdsvis asymmetriske og symmetriske svingeformer. I forhold til dynamisk respons er det hovedsakelig akselerasjoner det er fokusert på i analysen som er utført, selv om dataene også inneholder forskyvninger.

1.5 Oppgavestruktur

Kapittel 1

Oppgaven starter med en kort historikk fra transportsystemet i området broen er lokalisert. I tillegg er broer med kabelsystem introdusert der fokuset er på hengebroer. Til slutt blir problemstillingene og avgrensningene for oppgaven presentert.

Kapittel 2

Grunnleggende teori som er relevant for oppgaven. Deler av teorien er ansett som et tillegg som er der for å bidra til forståelsen.

Kapittel 3

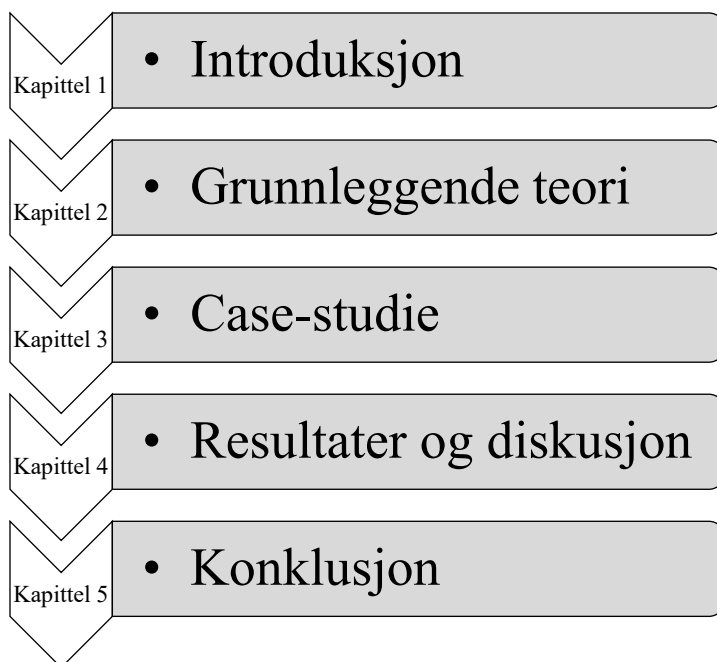
Dette kapittelet omhandler detaljer om hengebroen som er benyttet som case-studie. Instrumentering, nøkkeldata og broens geometri er hovedpunktene.

Kapittel 4

Dette kapittelet er selve kjernen i oppgaven der resultatene presenteres samtidig som de diskuteres.

Kapittel 5

Oppgavens konklusjon, med forslag til videre arbeid.

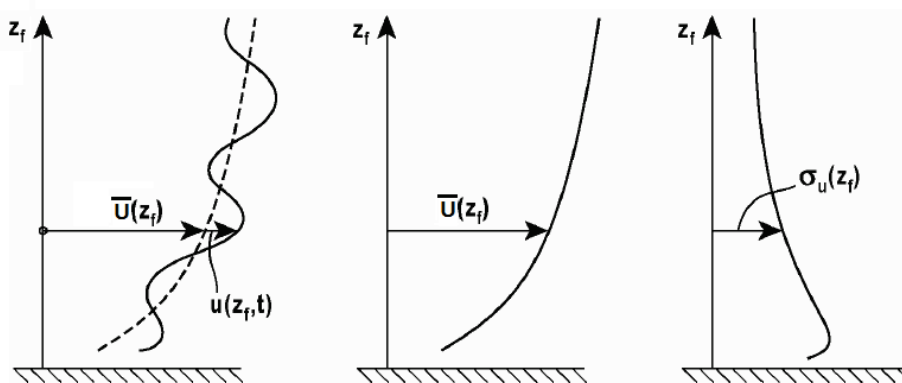


Figur 1.7 Oppgavestrukturen for denne oppgaven

2 Vindteori

Bevegelsen av luft i forhold til jordoverflaten kalles vind, og oppstår på grunn av temperaturforskjeller. Forskjellen i solstråling mellom polene og ekvator genererer trykk- og temperaturforskjeller. Sammen med jordas rotasjon, krumningen til vindbevegelsen og friksjonen på jordas overflate initierer disse faktorene luftbevegelsen [7].

De mest komplekse og omfattende av kreftene som virker på hengebroer i tillegg til trafikklastene er vindkreftene. Vindkrefter som virker inn på brokassen og brotårnene deler man normalt inn i to hovedkomponenter, nemlig statiske- og dynamiske vindkrefter. Statiske vindkrefter blir beregnet fra middelvindhastighet, mens dynamiske vindkrefter er forårsaket av vindkast, turbulens og konstruksjonens egen bevegelse i luftstrømmen. Figur 2.1 viser en typisk momentan vindprofil i hovedstrømsretning til venstre, sammen med middelvindhastigheten i midten og turbulensvariasjonen med høyden z_f til høyre.



Figur 2.1 Vindhastigheten og turbulensprofiler [14, s. 54]

Vindhastigheten kan normalt bli dekomponert til en middelvindhastighet i vindretningen og tre ortogonale turbulenskomponenter i et tilstrekkelig langt tidsintervall, typisk 10 eller 60 minutter. Hvis man antar at x -aksen er i vindretningen, y -aksen er lateralretningen og z -aksen er vertikalretningen hvor positiv retning er oppover, kan vindhastighets-vektoren ved et gitt punkt (x_f, y_f, z_f) og ved en spesiell tid t bli uttrykt som følgende [14]:

$$\bar{U}(x_f, y_f, z_f) + u(x_f, y_f, z_f, t) \quad (2.1a)$$

$$v(x_f, y_f, z_f, t) \quad (2.1b)$$

$$w(x_f, y_f, z_f, t) \quad (2.1c)$$

hvor \bar{U} er middelvinden i vindretningen og u , v og w er turbulenskomponentene.

Man definerer $U(x_f, y_f, z_f, t)$ som tidsserien for den momentane vindhastigheten i vindretningen og T er midlingstiden [7]. Da kan middelvinden, som oppgitt i likning (2.1a), bli beregnet av følgende likning:

$$\bar{U}(z_f) = \frac{1}{T} \int_0^T U(x_f, y_f, z_f, t) dt \quad (2.2)$$

Turbulenskomponenten i vindretningen kan da bli beregnet av:

$$u(x_f, y_f, z_f, t) = U(x_f, y_f, z_f, t) - \bar{U}(z_f) \quad (2.3)$$

Turbulenskomponenten kan bli betraktet matematisk som en stasjonær tilfeldig prosess med gjennomsnittsverdi null for vind over et flatt, homogent terreng. Derfor kan vinden i det atmosfæriske grenselaget representeres av vindprofilen for middelvinden og turbulenskomponenter som betraktes som stasjonære tilfeldige prosesser.

2.1 Middelvindprofiler

For forskjellige typer kraftig vind, er de ulike vindhastighetsprofilene forskjellige. Dette avsnittet vil introdusere gjennomsnittlige vindhastighetsprofiler fortrinnsvis for tropiske og ekstratropiske sykloner samt monsuner. Siden fallvind kan produsere kraftig vind i korte perioder og er forbigående i naturen, er det hensiktsløst å definere en middelvindhastighet for denne typen hendelser. For ekstratropiske sykloner og monsuner kan middelvindprofilen innenfor det atmosfæriske grenselaget bli representert av enten logaritmiske lov profil eller power lov profil [7].

2.1.1 Logaritmisk lov profil

Ved kraftige vindforhold er det mest nøyaktige matematiske uttrykket den logaritmiske lov. Opprinnelig var dette uttrykket utledet av Ludwig Prandtl for det turbulente grenselaget på en flat plate. Det har likevel vist seg å være gyldig i en umodifisert form i sterke vindforhold i det atmosfæriske grenselaget nær overflaten [15]. Den mest vanlige formen for denne profilen er som følger [7]:

$$\bar{U}(z) = \frac{1}{k} u_* \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (2.4)$$

hvor:

\bar{U} er middelvindhastigheten;

k er von Karmans konstant og er funnet empirisk til å være omtrent 0.4;

$u_* = \sqrt{\tau_0/\rho_a}$ er friksjonshastigheten, τ_0 er skjærstress ved overflaten som beskriver treghetskraften per enhetsareal utøvet av bakkeoverflaten på strømmingen;

ρ_a er lufttettheten;

z er høyden over bakkenivå;

z_0 er ruhetslengden.

For terreng med mer ruhet, som skoger og byområder, kan høyden z i likning (2.4) bli erstattet med en effektiv høyde $(z_1 - z_h)$, hvor z_h er «nullplanets forskyvning». Denne forskyvningen kan settes til $3/4$ av høyden til taket [15]. Dermed blir likning (2.4) til:

$$\bar{U}(z) = \frac{1}{k} u_* \ln\left(\frac{z - z_h}{z_0}\right) \quad (2.5)$$

Det er klart at vindhastigheten varierer med høyden og at vindhastigheten er null ved bakkenivå. Størrelsen på toppen av grenselaget blir omtalt som gradienthastigheten. Over grenselaget strømmer vinden fritt med gradienthastigheten. Benytter man likning (2.5) på middelvindhastigheter på to forskjellige høyder, z_1 og z_2 , er forholdet mellom de to hastighetene:

$$\frac{\bar{U}(z_2)}{\bar{U}(z_1)} = \frac{\ln((z_2 - z_h)/z_0)}{\ln((z_1 - z_h)/z_0)} \quad (2.6)$$

For høyder over 100 m er normalt ikke denne vindprofilen en god modell [7].

Selv om logaritmisk lov profil er relativt godt teoretisk forankret, kan det ikke brukes til å beregne middelvindhastigheter i en høyde z under nullplanets forskyvning z_h fordi logaritmen av negative tall ikke eksisterer. I tillegg er denne profilen mer krevende å integrere. For å unngå noen av disse problemene kan man heller benytte power lov profil.

2.1.2 Power lov profil

Denne profilen er av empirisk opphav og er definert som følger:

$$\bar{U}(z) = \bar{U}_1 \left(\frac{z}{z_{ref}}\right)^a \quad (2.7)$$

hvor:

\bar{U}_1 er middelvindhastigheten ved enhver referanse høyde z_{ref} ;

a er power lov eksponenten, som avhenger av overflateruhet og andre forhold. Som regel er denne eksponenten sett på som ekvivalent til overflateruheten z_0 [7].

For å bestemme α i forhold til overflateruheten, z_0 , kan man benytte seg av formelen [15]:

$$a = \left(\frac{1}{\ln(z_{ref}/z_0)} \right) \quad (2.8)$$

hvor:

z_{ref} er referanseshøyden hvor de to nevnte vindprofilene samsvarer.

2.1.3 Vindbeskrivelse i NS-EN 1991-1-4

Middelvinden, eller stedsvindhastigheten, defineres på følgende måte i standarden [16]:

$$\bar{U}(z) = c_r(z)c_o(z)\bar{U}_b \quad (2.9)$$

hvor:

$c_r(z)$ er ruhetsfaktoren;

$c_o(z)$ er terrengformfaktoren, satt lik 1.0 hvis ikke annet er angitt;

\bar{U}_b er basisvindhastigheten, definert som funksjon av vindretning og årstid for høyden 10 m over bakken og terrengkategori 2.

Ruhetsfaktoren avhenger av høyden på terrengnivå og terrengruheten på lesiden av konstruksjonen i den aktuelle vindretningen. Dette uttrykkes matematisk som følger:

$$\begin{aligned} c_r(z) &= k_r \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) & \text{for} & \quad z_{min} \leq z \leq z_{max} \\ c_r(z) &= c_r(z_{min}) & \text{for} & \quad z \leq z_{min} \end{aligned} \quad (2.10)$$

hvor:

z_0 er ruhetslengden;

z_{min} er minimumshøyden definert i Tabell 2.1;

z_{max} er maksimumshøyden og er satt til 200 m;

k_r er terrengruhetsfaktoren og beregnes ut ifra følgende formel:

$$k_r = 0.19 \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0.07} \quad (2.11)$$

hvor:

$z_{0,II} = 0.05 \text{ m}$ (Terrengkategori 2, Tabell 2.1).

Tabell 2.1 Terrenghetskategorier med tilhørende parametre [16, s. 12 i NA]

Kategorinummer	Terrenghetskategori	k_r	z_0 (m)	z_{min} (m)
0	Åpent opprørt hav	0,16	0,003	2
I	Kystnær, opprørt sjø. Åpne vidder og strandsoner uten trær eller busker	0,17	0,01	2
II	Landbruksområde, område med spredte små bygninger eller trær	0,19	0,05	4
III	Sammenhengende småhusbebyggelse, industriområder eller skogsområder	0,22	0,3	8
IV	Byområde der minst 15 % av arealet er dekket med bygninger og deres gjennomsnittlige høyde overskrider 15 m. Barskogområder	0,24	1,0	16

2.1.4 Vindbeskrivelse i NORSOK N-003

Denne standarden er utviklet av den norske petroleumsindustrien for å sikre tilstrekkelig sikkerhet og lønnsomhet for petroleumsindustriens utvikling og operasjoner.

Hvis det ikke er foretatt en detaljert analyse av vinden, kan middelverdien, \bar{U}_0 , ved en høyde på 10 meters høyde over bakken med en årlig sannsynlighet for overskridelse på 10^{-2} settes lik 41 m/s (10 min midling) eller 38 m/s (1 t midling) for hele kontinentalsokkelen.

Middelverdien med en årlig sannsynlighet for overskridelse på 10^{-4} velges til å være 48 m/s (10 min midling) eller 44 m/s (1 t midling) [17].

Den karakteristiske vindhastigheten $u(z, t)$ ved en høyde, z , over havet og den korresponderende midlingstiden, t , mindre enn eller lik $t_0 = 3600$ s kan bli beregnet som:

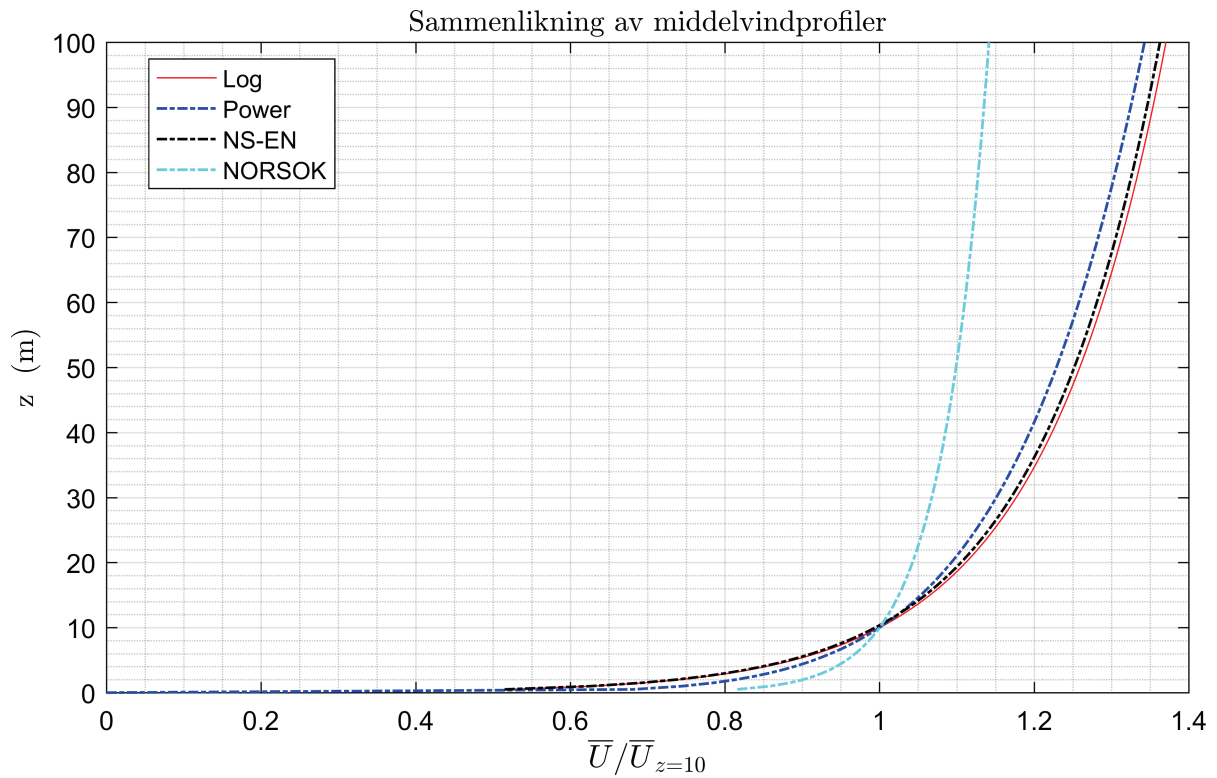
$$u(z, t) = \bar{U}(z) \left(1 - 0.4 I_u(z) \ln \left(\frac{t}{t_0} \right) \right) \quad (2.12)$$

hvor $\bar{U}(z)$ er middelvindhastigheten ved 1 t midling:

$$\begin{aligned} \bar{U}(z) &= \bar{U}_0 \left[1 + C \ln \left(\frac{z}{10} \right) \right] \\ C &= 5.73 \cdot 10^{-2} (1 + 0.15 \bar{U}_0)^{0.5} \end{aligned} \quad (2.13)$$

og hvor turbulensintensiteten, $I_u(z)$, er gitt av følgende uttrykk:

$$I_u(z) = 0.06 [1 + 0.043 \bar{U}_0] \left(\frac{z}{10} \right)^{-0.22} \quad (2.14)$$



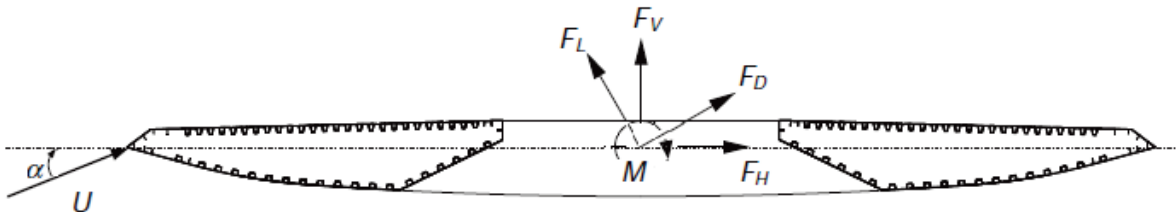
Figur 2.2 Sammenlikning av nevnte middelvindprofiler, laget i MATLAB

Figur 2.2 viser hvordan profilene samsvarer for et høydeområde på 100 m. I dette eksempelet er $z_0 = 0.02 \text{ m}$ og $z_{ref} = 50 \text{ m}$ [15]. Benytter man likning (2.8) får man at $a = 0.128$.

Det understrekes at dette kun er en sammenlikning av de ulike middelvindprofilene. Fra Figur 2.2 ser man at havvinden (NORSOK) er jevnere i høyden ved dette tilfellet, mens vinden på land har en større gradient.

2.2 Statisk vind

Som nevnt beregnes statiske vindkrefter ut fra middelvindhastigheten. Disse kreftene blir omtalt som løft- og dragkrefter. Samtidig virker det også momentkrefter rundt brobanens lengdeakse. Dragkreftene virker parallelt med vindretningen, mens løftkreftene virker vertikalt opp eller ned på brokassen, altså normalt på brobanen.



Figur 2.3 Middelvindlast i koordinatsystem for vind og konstruksjon, modifisert [7, s. 62]

I en typisk 2D-analyse kan kraften fra middelvinden bli delt i tre deler; dragkraften F_D i middelvindretningen, løftkraften F_L , vinkelrett på middelvindretningen, og vridningsmomentet M med hensyn til skjærsenteret til seksjonen. Figur 2.3 viser en enkel illustrasjon av kreftene som virker på brokassen i et koordinatsystem for både vind og konstruksjon. Man kan også beskrive vindlasten med hensyn til konstruksjonens koordinatsystem. I dette systemet er kraften fra middelvinden delt i den vertikale kraften, F_V , den horisontale kraften, F_H , og momentet M .

Vindkrefter kan bli transformert fra det ene koordinatsystemet til det andre ved følgende likning:

$$\begin{bmatrix} F_V \\ F_H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_L \\ F_D \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

hvor α er vindens angrepsvinkel.

I områdene rundt brokassen er trykket, p , og hastigheten, \bar{U} , relatert med Bernoullis likning:

$$\frac{1}{2} \rho \bar{U}^2 + p = konst. \quad (2.16)$$

hvor:

ρ er lufttettheten;

\bar{U} er vindhastigheten ved et punkt på strømlinjen;

p er det momentane vindtrykket ved et gitt punkt.

Bernoullis likning beskriver sammenhengen mellom trykk og hastighet for et fluid. For et ikke-viskøst, ikke-kompressibelt og virvelfritt fluid vil en økning i hastigheten til fluidet føre til en samtidig reduksjon i trykk. Basert på denne likningen er vindkreftene som virker på et brodekke definert som følger:

$$F_D(\alpha) = \frac{1}{2} \rho \bar{U}^2 d C_D(\alpha) \quad (2.17a)$$

$$F_L(\alpha) = \frac{1}{2} \rho \bar{U}^2 d C_L(\alpha) \quad (2.17b)$$

$$M(\alpha) = \frac{1}{2} \rho \bar{U}^2 d^2 C_M(\alpha) \quad (2.17c)$$

hvor:

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

\bar{U} er innkommende middelvindhastighet;

ρ er lufttettheten;

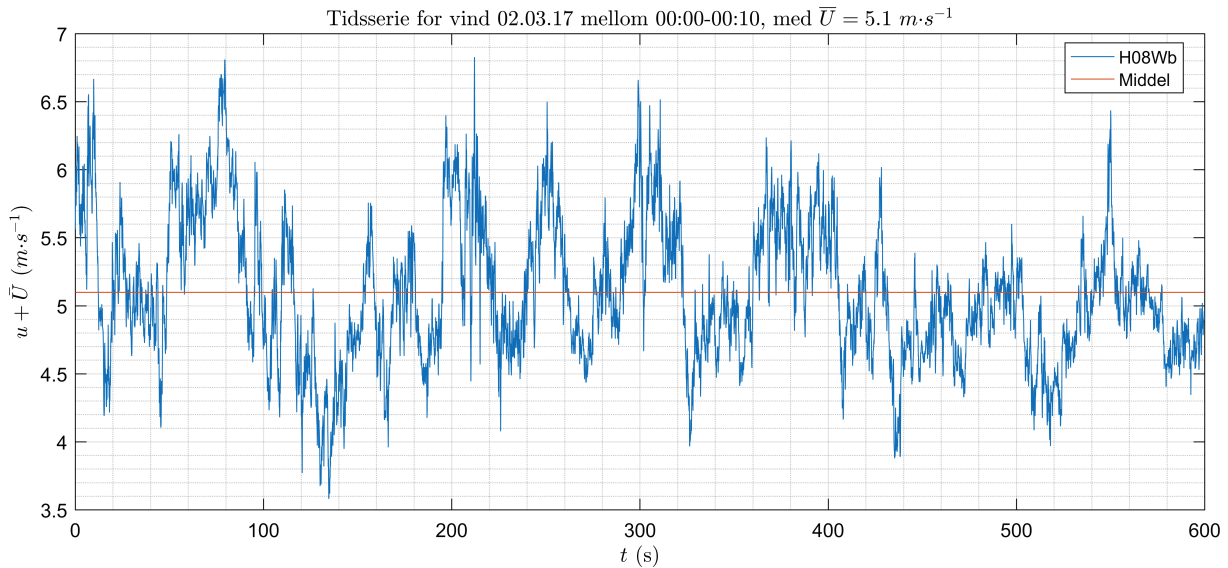
α er vindens angrepsvinkel;

d er den karakteristiske dimensjonen for seksjonen. I et brodekke-tilfelle er d typisk bredden av seksjonen.

2.3 Signalbehandling

Vinden som er analysert i denne oppgaven er behandlet som tilfeldige prosesser eller signaler. Dermed er det vesentlig å definere statistiske metoder og funksjoner som ligger til grunn for analysen av målingene gjort ved Lysefjordbrua.

2.3.1 Sannsynlighetstetthet



Figur 2.4 Tidsserie for horisontalvind, Lysefjordbrua (10 min.)

Figur 2.4 viser vindhastighetene for akselerometer nærmest brotårnet de første 10 minuttene 02.03.17 på Lysefjordbrua. Her ser man et tydelig tilfeldig mønster som er typisk for vindmålinger. Variasjonene oppstår på grunn av vindkast i vindstrømmen, som beveger seg med middelvindhastigheten. Vindkastene er aldri identiske, så man er derfor nødt til å bruke statistiske metoder for å beskrive vindkastene [15].

Målinger har vist at vindhastighets-komponentene i det atmosfæriske grenselaget følger normalfordelingen eller Gausskurven [18]. Sannsynlighetstetthet-funksjonen er definert som følger:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.18)$$

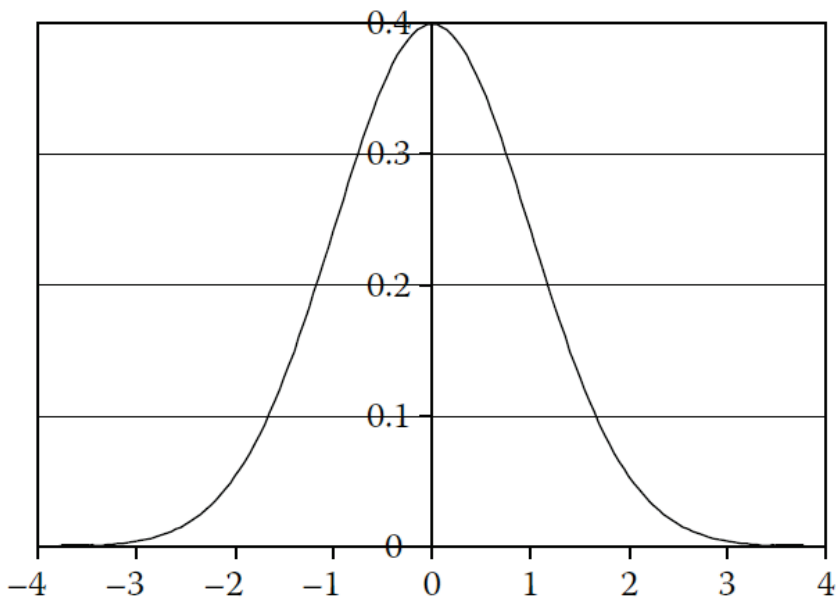
hvor:

$p(x)$ er sannsynlighetstetthet-funksjonen (STF);

x er en tilfeldig variabel, i dette tilfellet vindhastigheten ved et virkårlig punkt;

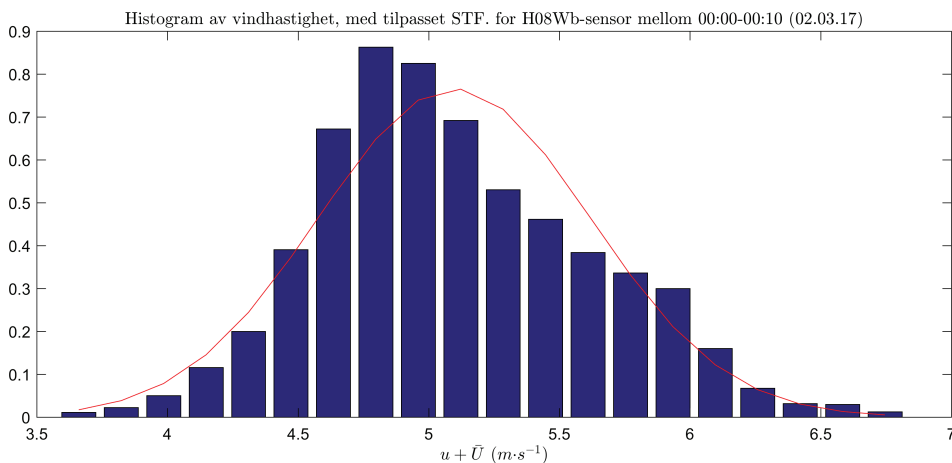
m er gjennomsnittsverdien av x , dvs. $m = E[x]$ eller $m = \bar{x}$ [18];

σ er standardavviket til x .



Figur 2.5 Normalfordeling [15, s. 372]

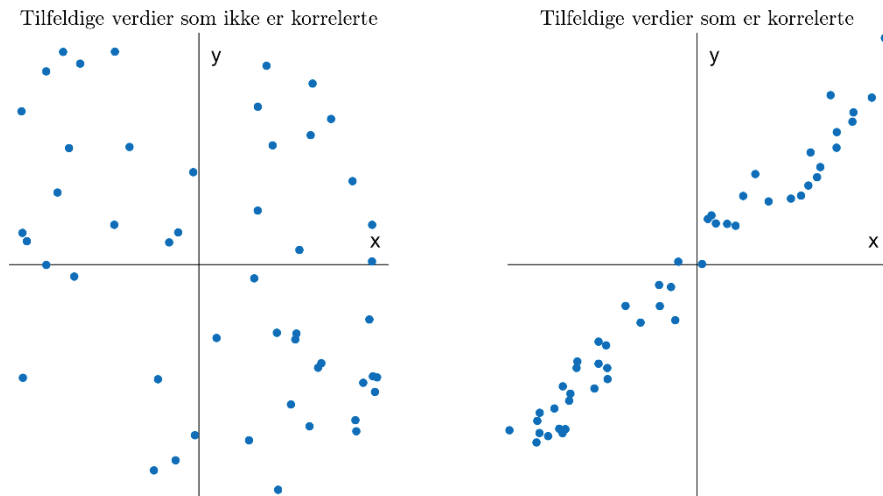
Figur 2.5 viser en typisk normalfordeling eller Gausskurve hvor $m = 0$. Til sammenlikning for vindhastigheten for Lysefjordbrua har man denne fordelingen:



Figur 2.6 Histogram for u -komponent, inkludert normalfordeling, mellom 00:00-00:10 den 02.03.17 med $\bar{U} = 5.1$ m·s⁻¹

Figur 2.6 viser et histogram av vindhastigheten i x-retning for samme vinddata som i Figur 2.4. Her ser man at målingene til en viss grad følger normalfordeling, hvor toppunktet på den røde grafen tilsvarer middelvindhastigheten ($m = 5.0979$).

2.3.2 Korrelasjon

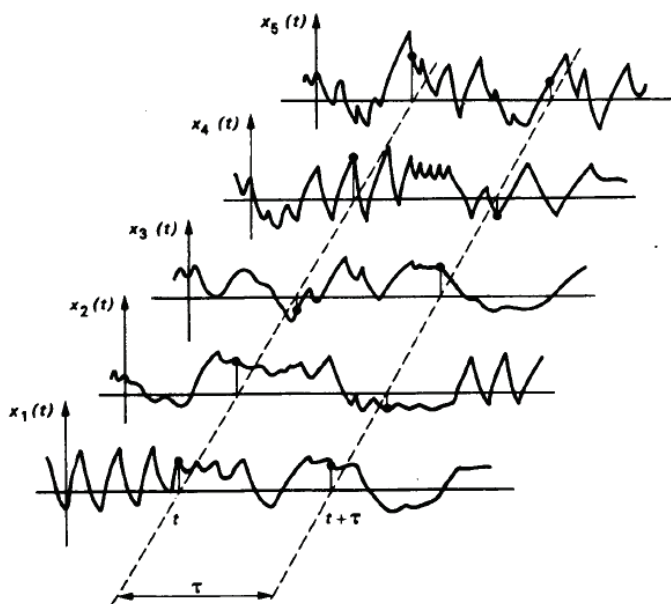


Figur 2.7 Forskjellen på uavhengige og korrelerte målinger

Figur 2.7 viser forskjellen på uavhengige og korrelerte målinger. Det vil si at punktene i plottet til venstre har en korrelasjonskoeffisient på 0, mens i plottet til høyre ser man en tydelig korrelasjon mellom x- og y-verdiene. Generelt vil to harmoniske funksjoner være korrelerte hvis de er i fase eller ikke-fase, og ikke-korrelerte hvis de er identiske.

For å sjekke om målinger er korrelerte eller ikke kan man benytte korrelasjonskoeffisienten som er definert slik:

$$\rho_{xy} = \frac{E[(x - m_x)(y - m_y)]}{\sigma_x \sigma_y} \quad (2.19)$$



Figur 2.8 Autokorrelasjon [18, s. 25]

Autokorrelasjon-funksjonen for en tilfeldig prosess, $x(t)$, er definert som gjennomsnittsverdien til produktet $x(t)x(t + \tau)$. Den tilfeldige prosessen er målt ved tiden t og igjen ved tiden $(t + \tau)$. Figur 2.8 viser fem ulike målinger gjort ved tiden t og igjen ved $(t + \tau)$, før man tar gjennomsnittet av produktet $x(t)x(t + \tau)$ eller $E[x(t)x(t + \tau)]$. Gitt at de tilfeldige målingene er stasjonære, vil $E[x(t)x(t + \tau)]$ kun være avhengig av tidsseparasjonen τ slikt at man kan uttrykke autokorrelasjon-funksjonen slik:

$$E[x(t)x(t + \tau)] = f(\tau) = R_x(\tau) \quad (2.20)$$

Ved å benytte seg av Fouriertransformasjon på likning (2.20) kan man uttrykke autokorrelasjon med spektraltetthet omtalt videre i kapittel 2.3.5.

Spesifikt for vind omformuleres autokorrelasjon-funksjonen for vind slik [19]:

$$R_u(z, \tau) = \rho_u^T(z, t) = E[u(x, y, z, t) \cdot u(x, y, z, t + \tau)] / \sigma_u^2(z) \quad (2.21)$$

Der funksjonen indikerer hvor mye informasjon en måling av turbulenskomponenten $u(x, y, z, t)$ i middelvindretningen vil gi for målingen målt τ senere ved samme sted. En god tilnærming for autokorrelasjon-funksjonen:

$$\rho_u^T(z, t) = e^{-\frac{\tau}{T(z)}} \quad (2.22)$$

hvor:

$\rho_u^T(z, t)$ er autokorrelasjon-funksjonen;

τ er tidssteget mellom to punkter i måledataene;

$T(z)$ er tidsskalaen.

Hvis man lar $x(t)$ og $y(t)$ være stasjonære, stokastiske ulike prosesser er kryss-korrelasjon-funksjonen definert som [19]:

$$\rho_{xy} = \frac{E[(x(t) - m_x)(y(t + \tau) - m_y)]}{\sigma_x \sigma_y} \quad (2.23)$$

2.3.3 Tidsskala og integral lengdeskala

Hvis man antar en homogen horisontal vindstrøm, vil autokorrelasjon-funksjonen kun avhenge av høyden over bakken, z , og tidssteget, τ . Turbulenskomponenten u vil da ha et karakteristisk minne for tid som blir kalt *tidsskala* $T(z)$, og er definert på følgende vis:

$$T(z) = \int_0^{\infty} \rho_u^T(z, t) dt \quad (2.24)$$

Integral lengdeskala, eller *turbulenslengdeskala*, er et mål på virvlene til vinden, dvs. gjennomsnittsstørrelsen til et vindkast i en vilkårlig retning. Den er definert på følgende måte [19]:

$$L_u^x = \int_0^{\infty} \rho_u(z, r_x) dr_x \quad (2.25)$$

hvor:

L_u^x turbulenslengdeskalaen for turbulenskomponent u målt i x-retning;

$\rho_u(z, r_x)$ er kryss-korrelasjonsfunksjonen mellom turbulenskomponent u i to punkter med en avstand r_x i lengderetningen, se likning (2.23).

2.3.4 Fourier-analyse

Vinden er som nevnt varierende, dvs. at vinden kan være positiv og negativ, og derfor kan man uttrykke den dynamiske vinden som en periodisk funksjon av tiden. Siden man kan uttrykke den dynamiske vinden som en periodisk funksjon, kan man alltid uttrykke vindfunksjonen som en uendelig trigonometrisk serie, Fourier-serie, på formen [18]:

$$x(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \left(a_k \cos\left(\frac{2\pi kt}{T}\right) + b_k \sin\left(\frac{2\pi kt}{T}\right) \right) \quad (2.26)$$

hvor:

a_0 , a_k og b_k er Fourier-koeffisienter gitt av følgende likninger:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) dt \\ a_k &= \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) \cos \frac{2\pi kt}{T} dt \\ b_k &= \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) \sin \frac{2\pi kt}{T} dt \end{aligned} \quad (2.27)$$

Ved å substitusjon kan likning (2.26) skrives som to ledd av integraler der vinkelhastigheten er inkludert [18]:

$$x(t) = 2 \int_0^{\infty} A(\omega) \cos \omega t d\omega + 2 \int_0^{\infty} B(\omega) \sin \omega t d\omega \quad (2.28)$$

hvor:

$$\begin{aligned} A(\omega) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cos \omega t dt \\ B(\omega) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \sin \omega t dt \\ \omega &= \frac{2\pi kt}{T} \end{aligned}$$

I teorien om tilfeldige vibrasjoner er det mer vanlig å benytte seg av den komplekse formen av likning (2.28) [18]:

$$\begin{aligned} X(\omega) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i\omega t} dt \\ x(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) e^{i\omega t} d\omega \end{aligned} \tag{2.29}$$

Likningene (2.29) er et kalt et Fouriertransformasjon-par, hvor $X(\omega)$ er Fouriertransformasjonen av $x(t)$. Følgende likning må være oppfylt for at man kan bruke klassisk Fourier-analyse:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)| dt < \infty \tag{2.30}$$

Siden tidsserien $x(t)$ for en vindmåling ikke er periodisk, kan den ikke bli beskrevet av en diskret Fourier-serie. I tillegg vil ikke likning (2.30) være oppfylt på grunn av at man antar en stasjonær prosess, så derfor er ikke klassisk Fourier-analyse (DFT) egnet for vindmåling-data [18]. For å analysere vinden ved hjelp av et digitalt signalverktøy bruker man ofte FFT, «Fast Fourier Transformation», som baseres på klassisk Fourier-analyse. Forskjellen mellom FFT og DFT er at FFT er mye mer effektiv enn DFT. Tidsserien blir da transformert fra en tidsfunksjon til en funksjon av vinkelfrekvensen [20].

2.3.5 Spektra

Sannsynlighetstettheten som er omtalt (kapittel 2.3.1) beskriver størrelsen på vindhastigheten, men ingenting om variasjonen med tiden. Derfor er *spektraltetthet* introdusert for å uttrykke fordelingen av turbulens som en funksjon av frekvensen. Autokorrelasjon-funksjonen gir informasjon om frekvenser som er indirekte til stede i en tilfeldig prosess. Ved å bruke Fouriertransformasjon av autokorrelasjonen, $R_x(\tau)$, får man følgende [18]:

$$S_x(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (2.31)$$

$$R_x(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_x(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega \quad (2.32)$$

hvor:

$S_x(\omega)$ er spektraltettheten til prosessen x og er en funksjon av vinkelfrekvensen ω .

Den viktigste egenskapen til spektraltettheten, $S_x(\omega)$, blir klar når man setter inn $\tau = 0$ i likning (2.32):

$$R_x(\tau = 0) = \int_{-\infty}^{\infty} S_x(\omega) e^{i\omega \cdot 0} d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} S_x(\omega) d\omega$$

Dette gir da ved bruk av likning (2.20):

$$E[x^2] = \int_{-\infty}^{\infty} S_x(\omega) d\omega \quad (2.33)$$

Likning (2.33) sier dermed at middelveiden til kvadratet av en tilfeldig prosess, x , er gitt av arealet under grafen til spektraltettheten, $S_x(\omega)$. Man skriver ofte likning (2.33) på en mer praktisk måte for vind, hvor man benytter at $\sigma_u^2 = E[u^2]$ for $m = 0$ [15]:

$$\sigma_u^2 = \int_0^{\infty} S_u(f) df \quad (2.34)$$

hvor:

σ_u^2 er variansen til horisontalvinden, $u(t)$;

$S_u(f)$ er spektraltettheten for $u(t)$;

f er frekvens.

Spektraltettheten, $S_u(f)$, kan uttrykkes forskjellig. Den mest kjente og faktisk mest korrekte formen matematisk, er von Karmans likning tilpasset for vind av R. Harris [15]:

$$\frac{f \cdot S_u(f)}{\sigma_u^2} = \frac{4 \left(\frac{f l_u}{\bar{U}} \right)}{\left[1 + 70.8 \left(\frac{f l_u}{\bar{U}} \right)^2 \right]^{\frac{5}{6}}} \quad (2.35)$$

hvor:

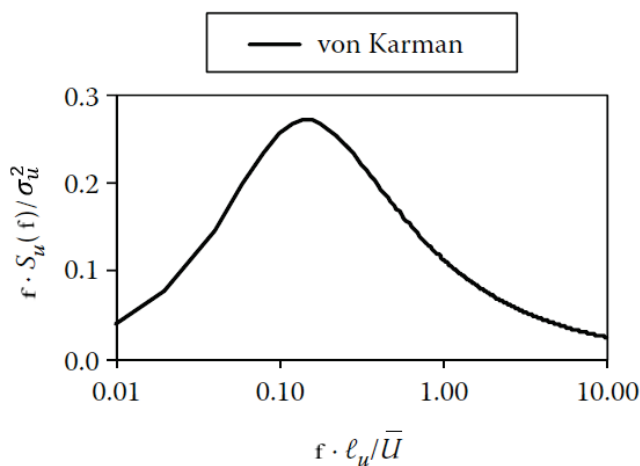
l_u er turbulenslengdeskala som avhenger både av terrengruheten og høyden over bakken.

På formen som likning (2.32) står oppført har grafen $\frac{f \cdot S_u(f)}{\sigma_u^2}$ mot $\frac{f}{\bar{U}}$ en topp, hvor l_u bestemmer ved hvilken verdi av $\frac{f}{\bar{U}}$ denne toppen befinner seg. Jo større l_u er, jo høyere verdi av $\frac{f}{\bar{U}}$ ved toppunktet for grafen. Toppunktet for grafen, λ , blir kalt den maksimale bølgelengden og for likning (2.35) er $\lambda = 6.85 l_u$. For horisontale konstruksjoner som broer er vindspektrum for vertikal turbulens av høyest interesse. På tilsvarende form som likning (2.35) er spektrumet for den vertikale turbulensen, utarbeidet av Busch og Panofsky (1968), angitt på følgende måte:

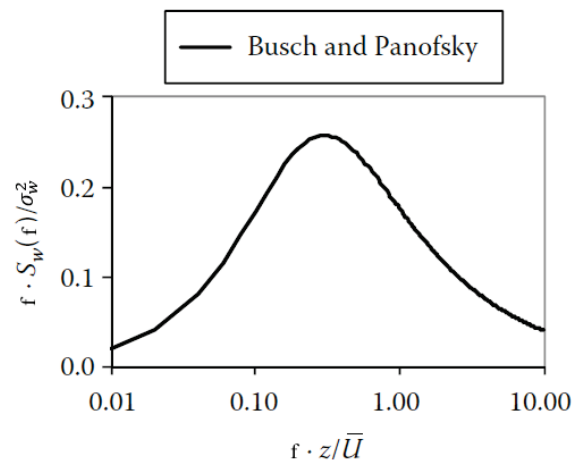
$$\frac{f \cdot S_w(f)}{\sigma_w^2} = \frac{2.15 \left(\frac{f z}{\bar{U}} \right)}{\left[1 + 11.16 \left(\frac{f z}{\bar{U}} \right)^2 \right]^{\frac{5}{3}}} \quad (2.36)$$

I dette tilfellet er turbulenslengdeskalaen direkte proporsjonal med høyden over bakken, z .

Likningene (2.35) og (2.36) er illustrert nedenfor.



Figur 2.9 Normalisert horisontalt vindspektrum, av von Karman (1948) [15, s. 70]



Figur 2.10 Normalisert vertikalt vindspektrum, av Busch og Panofsky (1968) [15, s. 70]

Figur 2.9 og Figur 2.10 viser et normalisert spektrum for hhv. den horisontale vindhastighetskomponenten og den vertikale vindhastighetskomponenten.

Statens vegvesen sin håndbok for bruprosjektering har også en veiledning for hvordan vindspektrum er definert [21]:

$$\frac{f \cdot S_i}{\sigma_i^2} = \frac{A_i \hat{f}}{(1 + 1.5A_i \hat{f})^{\frac{5}{3}}} \quad (2.37)$$

hvor:

σ_i er turbulenskomponent i ;

$$\hat{f}_i = \frac{f \cdot L_i(z)}{\bar{U}(z)}; A_u = 6.8; A_v = 9.4; A_w = 9.4$$

Norsk Standard har også utarbeidet ett uttrykk for den dimensjonsløse spektrale tetthetsfunksjonen [16]:

$$S_L(z, f) = \frac{f \cdot S_v(z, f)}{\sigma_v^2} = \frac{6.8 \cdot f_L(z, f)}{(1 + 10.2 \cdot f_L(z, f))^{\frac{5}{3}}} \quad (2.38)$$

hvor:

$S_v(z, f)$ er det én-sidede variansspektrumet;

$$f_L(z, f) = \frac{f \cdot L(z)}{\bar{U}(z)}.$$

2.3.6 Estimat for spektraltetthet

Spektraltettheten kan estimeres på bakgrunn av en målt periode av et langt signal. Signalene rommer ofte en del støy som påvirker spektraltettheten, og den ønskede spektraltetthetsgrafen kan kun bestemmes med en viss varians og sannsynlighet. Variansen kan bli begrenset ved at måleperioden forlenges, eller det kan benyttes ulike algoritmer i signalprosesseringen som har dette som formål. Det finnes ulike estimatorene for spektraltetthet, der man i denne oppgaven har beskrevet Welch-metoden og Burgs metode.

2.3.6.1 Nyquistfrekvens

I kapittel 2.3.4 ble Fouriertransformasjon introdusert. I prosessen der et analogt signal digitaliseres benytter man nettopp denne transformasjonen (FFT). Problemet som kan oppstå ved en slik transformasjon er at det digitaliserte spektrumet inneholder frekvenser som repeteres, som kan skape støy eller forfalske måleverdier. For å unngå dette kan man benytte et tidssteg som er så lite at denne ulikheten er oppfylt [18]:

$$\frac{\pi}{\Delta} > \omega_0 \quad (2.39)$$

eller, hvis $f_0 = \omega_0/2\pi$, må denne ulikheten være oppfylt:

$$\frac{1}{2\Delta} > f_0 \quad (2.40)$$

Her er $1/2\Delta$ kalt *Nyquistfrekvensen*, og er den maksimale frekvensen som kan bli inkludert fra måleverdiene samlet med tidssteg på Δ (sekunder).

2.3.6.2 Welch-metoden

Welch-metoden baserer seg på FFT, se kapittel 2.3.4, og er brukt for å estimere power spektraltettheten (PST) [22]. Metoden går ut på at man deler opp måledata i seksjoner og produserer modifisert spektraltetthet (periodogram) for seksjonene før man til slutt midler periodogrammene og får en estimert spektraltetthet for måledataene [23]. Periodogrammet for et av de K segmentene av lengde L er gitt av følgende likning [22]:

$$P_M^i(f) = \frac{1}{L} \left| \sum_{n=0}^{L-1} w[n] \cdot x[n] \cdot e^{-j2\pi f n} \right|^2 \quad (2.41)$$

hvor:

$x[n]$ er måledata nr. n , typisk u for vind;

$w[n]$ er vektfunksjon nr. n , kalt vindu.

Estimatet for Welch-spektrumet er da gitt av følgende uttrykk:

$$P_W(f) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K P_M^i(f) \quad (2.42)$$

2.3.6.3 Burgs metode

Burgs metode er en parametrisert metode som baserer seg på en auto-regressiv modell (AR) for estimering av PST [22]. I motsetning til Welch metode gjøres det her approksimasjoner for å tilnærme et signal slik at spektraltettheten får en lav variasjon, istedenfor å redusere variansen i etterkant av at spektraltettheten er estimert [24].

Det underliggende systemet til Burgs metode er beskrevet av følgende uttrykk [22]:

$$x[n] = - \sum_{k=1}^p a_k \cdot x[n-k] + e[n] \quad (2.43)$$

hvor:

$x[n]$ er observerte ut-verdien av systemet nr. n ;

$e[n]$ er uobserverte inn-data nr. n ;

p er systemets grad;

a_k er tilhørende koeffisienter.

Estimatet for Burgs spektrum er da gitt av følgende uttrykk:

$$P_B(f) = \frac{E_p}{|1 + \sum_{k=1}^p a_k \cdot e^{-j2\pi f k}|^2} \quad (2.44)$$

hvor:

E_p er den totale minste-kvadrat feilen av grad p .

Fordelene med Burgs metode:

- Høy frekvensoppløsning.
- AR-modell er alltid stabil.
- Veldig effektiv med tanke på beregning.

2.4 Dynamisk vind

Vind som varierer med tid og lokasjon, og som er vanskelig å definere, kaller man dynamisk vind. Kreftene fra den dynamiske vinden er kilden til bevegelse, hvis man antar at kreftene er store nok.

2.4.1 Turbulens

For å beskrive turbulent strømning må statistiske metoder benyttes. De tre turbulenskomponentene kan som nevnt i starten av kapittelet bli behandlet som stasjonære tilfeldige prosesser matematisk og dermed er komponentene beskrevet av gjennomsnittlige verdier av deres standardavvik.

Standardavvikene σ_u , σ_v og σ_w for turbulenskomponentene i hovedstrømsretningen, lateral horisontalretning og vertikalretning kan bli uttrykt som følger:

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u(t)^2 dt} \quad (2.45a)$$

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v(t)^2 dt} \quad (2.45b)$$

$$\sigma_w = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T w(t)^2 dt} \quad (2.45c)$$

hvor $u(t)$, $v(t)$ og $w(t)$ er turbulenskomponentene i hhv. hovedstrømsretning, lateral horisontalretning og vertikalretning. Siden gjennomsnittsverdien til hver av turbulenskomponentene er null, er de nevnte standardavvikene lik sin effektivverdi, også kalt RMS-verdien [7].

Turbulensintensiteten benyttes ofte for å beskrive selve intensiteten til turbulens. Den er definert ved forholdet mellom standardavviket for hver turbulenskomponent og middelvindhastigheten for samme midlingstid. Matematisk kan dermed turbulensintensitetene $I_u(z)$, $I_v(z)$ og $I_w(z)$ i hhv. hovedstrømsretningen, lateral horisontalretning og vertikalretningen uttrykkes på følgende vis:

$$I_u(z) = \frac{\sigma_u(z)}{\bar{U}(z)} \quad (2.46a)$$

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v(z)}{\bar{U}(z)} \quad (2.46b)$$

$$I_w(z) = \frac{\sigma_w(z)}{\bar{U}(z)} \quad (2.46c)$$

For stormvind eller kulinger nær bakken har man målt og funnet ut at standardavviket for hovedstrømsretningen, σ_u , er tilnærmet lik $2.5u_*$. For lateral horisontalretning og vertikalretning, σ_v og σ_w , er standardavvikene tilnærmet hhv. $2.2u_*$ og $1.4u_*$ [15]. Som et resultat av dette kan man omformulere likning (2.46a-c) ved bruk av likning (2.4) til følgende uttrykk:

$$I_u(z) = \frac{2.5u_*}{\frac{1}{0.4}u_* \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} = \frac{1}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (2.47a)$$

$$I_v(z) = \frac{2.2u_*}{\frac{1}{0.4}u_* \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} = \frac{0.88}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (2.47b)$$

$$I_w(z) = \frac{1.4u_*}{\frac{1}{0.4}u_* \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} = \frac{0.56}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (2.47c)$$

Turbulens kan også beskrives ved hjelp av spektraltetthet. Siden tidsserien for måledataene ikke er periodiske, kan den ikke bli representert av en diskret Fourier-serie [18]. I tillegg vil en stasjonær prosess, $x(t)$, fortsette ut i det uendelige slik at følgende betingelse ikke er oppfylt:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)| dt < \infty \quad (2.48)$$

Hvilket betyr at Fourier-analyse ikke kan bli benyttet for måledata.

Den tidsvarierende dragkraften $F_D(t)$ på et tverrsnitt induisert av en vindstrøm er konvensjonelt gitt av følgende uttrykk [25]:

$$F_D(t) = \frac{1}{2} \rho U^2(t) d C_D \quad (2.49)$$

hvor:

d er den karakteristiske dimensjonen for seksjonen. I et brodekke-tilfelle er d typisk bredden av seksjonen;

C_D er dragkoeffisienten;

ρ er lufttettheten;

$U(t)$ er den totale vindhastigheten, definert som $\bar{U} + u(t)$.

En tredimensjonal vindstrøm vil typisk ha tre fluktuerende komponenter, $U(t)$, $V(t)$ og $W(t)$ i tre ortogonale retninger. For vind kan som nevnt vinden bli representert som summen av middelvindhastigheten og turbulensen, se likning (2.1a-c). Generelt må man ta hensyn til den ufullkomne romlige korrelasjonen mellom de fluktuerende hastighetene, men for enkelthets skyld antar man videre at de er perfekt korrelerte. I kraftig vind, som denne oppgaven har studert, vil forholdet $u(t)/\bar{U}$ sjelden overgå 0.2, som betyr at $u^2(t)$ kan bli neglisjert uten at feilen blir for stor. Dermed kan man uttrykke dragkraften på følgende måte:

$$F_D(t) = \frac{1}{2}\rho(\bar{U} + u(t))^2 dC_D \approx \frac{1}{2}\rho\bar{U}^2 dC_D + \rho\bar{U}u(t)dC_D \quad (2.50)$$

Man ser at det første leddet i likning (2.50) er den statiske vindlasten definert i 2.2. Det andre leddet tilsvarer den turbulente lasten og man ser at kraften er varierer lineært med turbulensen, som er gyldig kun for første ordens tilnærming der observasjoner er utført som konkluderer med at dragkoeffisienten, C_D , i seg selv varierer som en funksjon av frekvenskomponentene til turbulensen, $u(t)$ [25]. Tilsvarende kan løft- og momentkrefter induisert av turbulens også uttrykkes på samme metode som dragkraften omtalt [14]. Se Figur 2.11 for illustrasjon av fluidstrøm rundt et tverrsnitt og hvordan turbulent vindkast kan oppstå.

Fluktuerende vind vil altså føre til fluktuerende laster på konstruksjonen som resulterer i respons, der akselerasjon er responsen som er studert i denne oppgaven.

2.4.2 Flutter

Flutter er kjent som aerodynamiske ustabiliteter som involverer rotasjon. Dette fenomenet kan bli farlig, som nevnt i kapittel 1.2 om Tacoma Narrows Bridge, om de aerodynamiske kreftene på brodekket slår seg sammen med brodekkets egen bevegelse. Hvis energitilførselen av de aerodynamiske kreftene, som følge av den sterke vinden, er større enn den som blir absorbert av dempingen i brosystemet, vil vibrasjonen til brodekket øke. Denne økende vibrasjonen vil da forsterke de aerodynamiske kreftene, noe som fører til selvpåførte krefter og selvpåførte svingninger. Vibrasjonsamplituden til brodekket kan da øke helt til broen kollapser, slik som resultatet ble for nevnte Tacoma Narrows Bridge.

For klassisk flutter, dvs. koblet vertikal- og torsjonsinstabilitet, kan man beregne den kritiske vindhastigheten hvor flutter oppstår ved hjelp av Selbergs formel angitt i håndbok N400 [21]:

$$\bar{U}_{crit} = 3.7df_{\theta} \sqrt{\frac{m_z r}{\rho d^3} \left[1 - \left(\frac{f_z}{f_{\theta}} \right) \right]^2} \quad (2.51)$$

hvor:

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

f_{θ} er laveste egenfrekvens for torsjonssvingning;

m_z er jevnt fordelt ekvivalent modal translasjonsmasse;

ρ er luftens densitet som er satt til 1.25 kg/m^3 ;

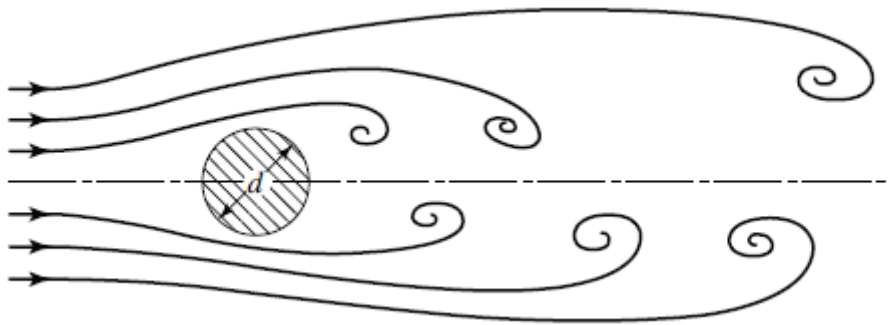
f_z er laveste egenfrekvens ved egensvingninger på tvers av hovedstrømsretning;

r er treghetsradien til tverrsnittet.

2.4.3 Virvelinduserte vibrasjoner

Når vinden treffer brokassen vil vinden bli avløst i virvler ved lesiden og det dannes trykkforskjeller på overflaten av brokassen. Vindkast og virvelturbulens induserer generelt fluktuerende trykk på den aerodynamiske brokassen, og hvis brokassen er fleksibel kan virvelinduserte vibrasjoner (VIV) oppstå [26]. Dette fenomenet er som regel ikke katastrofalt farlig, men kan skape bekymringer rundt broens utmatting og brukervennlighet [6].

Vibrasjoner til lineære konstruksjoner, skapt av vindkast, er funksjoner av tre ledende dimensjonsløse parametre: Strouhals tall, Scrutons tall og Reynolds tall [27].



Figur 2.11 Fluidstrømning forbi en sylinder [28, s. 306]

Figur 2.11 viser hvordan fluidet typisk beveger seg forbi en sylinder. Reynolds tall kan uttrykkes som et forhold mellom middelvindhastigheten og viskositeten til det aktuelle fluidet:

$$Re = \frac{\rho \bar{U} d}{\mu} \quad (2.52)$$

hvor:

Re er Reynolds tall;

ρ er fluidtettheten;

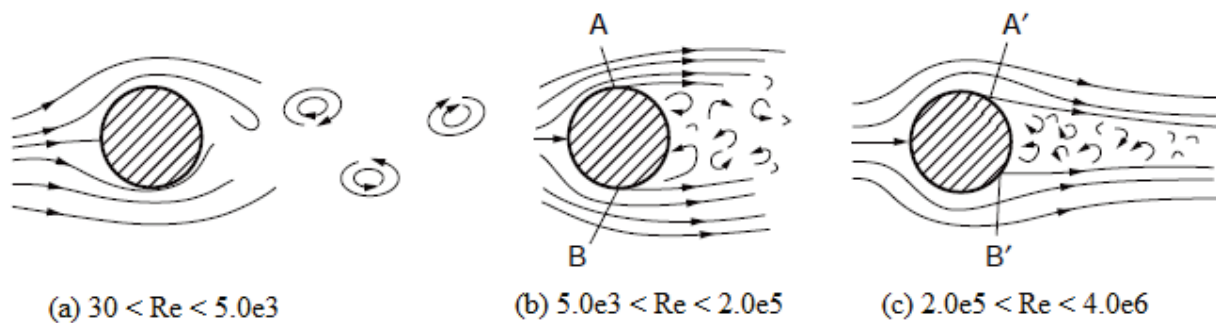
\bar{U} er hastigheten til fluidet relativt til sylinderen;

d er diameteren til sylinderen;

μ er den dynamiske viskositeten til fluidet.

Strømmønsteret rundt en sylinder for ulike intervaller for Reynolds tall er vist nedenfor i Figur 2.12. For Reynolds tall større enn 30, men mindre enn 5000, oppstår vindkast fra begge sider av sylinderen som vist i Figur 2.12(a). Før strømmen når den kritiske verdien, vil det oppstå strømningsseparasjon ved punktene A og B som vist i Figur 2.12(b). I det siste

intervallet vil strømningsseparasjonen skje lenger ned på sylindren, ved punktene A' og B' , som vist på Figur 2.12(c).



Figur 2.12 Endring av strømningsmønster med Reynolds tall [7, s. 85]

Eksperimenter viser til at vindkast oppstår hyppigst i områdene av Reynolds tall (Re) fra rundt 60 til 5000 [28]. I denne oppgaven tilsvarer sylindren brokassen og da sylindrens diameter, d , høyden eller bredden til brokassen.

For et gitt tverrsnitt er frekvensen for vindkast, f , proporsjonal med middelvindhastigheten og omvendt proporsjonal med referansedimensjonen. Dette tallet kalles Strouhals tall, St , og kan uttrykkes slik:

$$St = \frac{fd}{\bar{U}} \quad (2.53)$$

hvor:

St er Strouhals tall;

f er frekvensen av vindkast;

d er referansedimensjon, enten bredde eller høyde for tverrsnittet;

\bar{U} er middelvindhastigheten.

Scrutons tall er den siste dimensjonsløse parameteren som blir benyttet for å evaluere brokabelens tilbøyelighet for å vibrere, på grunn av galoppering eller vindkast. Dette kan uttrykkes på følgende vis [6]:

$$Sc = \frac{\mu\zeta}{\rho d^2} \quad (2.54)$$

hvor:

Sc er Scrutons tall;

μ er den strukturelle massen per lengdeenhet;

ζ er konstruksjonens dempningsforhold;

ρ er fluidets tetthet;

d er referansedimensjonen, enten bredde eller høyde for tverrsnittet.

En måte for å undersøke fenomenet VIV har blitt gjort ved å utsette sylindere for kontrollerte sinusbølger i en jevn strøm av luft. Slike eksperimenter hjelper for forståelsen av hvordan VIV oppstår, i tillegg til at man lettere kan forutse fenomenet [29].

2.4.4 Galoppering

Galoppering refererer til konstruksjoners vibrasjoner primært tvert på vindretningen på grunn av aerodynamisk dempning [19]. Dette fenomenet oppstår når brodekket kontinuerlig absorberer energi fra den innkommende vindstrømmen og vibrasjonen begynner å øke. I tillegg opptrer galoppering med frekvenser mye lavere enn ved vindkast fra konstruksjonen [7]. Når en jevn vindstrøm passerer en svingende konstruksjon, endres den effektive angrepsvinkelen med bevegelsen av konstruksjonen, selv om den innkommende strømmen har en fast retning. Den skiftende effektive angrepsvinkelen kan ved aerodynamisk ugunstige tverrsnittsformer resultere i økende krefter.

På grunn av at den reduserte frekvensen er lav, kan man benytte statisk lastbetrakning, se kapittel 2.2, for å evaluere broens mottakelighet for galoppering. Man kan betrakte kraften på et tverrsnitt for å matematisk fremstille et kriterium for galoppering. Positiv retning er definert med vindretningen normalt på tverrsnittet og med F_z oppover som positiv i z-retningen.

Dermed kan man benytte følgende for å beregne den vertikale kraften F_z :

$$F_z(\alpha) = \frac{1}{2} \rho \bar{U}^2 d (C_D(\alpha) \sin \alpha + C_L(\alpha) \cos \alpha) \quad (2.55)$$

hvor:

\bar{U} er middelvindhastigheten.

Hvis man antar at svingeamplituder er små, $\alpha \approx -\frac{\dot{z}}{\bar{U}}$, og benytter Taylor-utvikling på likning (2.55), og betrakte kun de to første leddene i rekken får man:

$$F_z(\alpha) = F_z(0) + \left. \frac{\partial F_z}{\partial \alpha} \right|_{\alpha=0} \cdot \alpha = \frac{1}{2} \rho \bar{U}^2 d C_L - \frac{1}{2} \rho \bar{U}^2 d \left(\left. \frac{dC_L}{d\alpha} + C_D \right) \right|_{\alpha=0} \cdot \frac{\dot{z}}{\bar{U}} \quad (2.56)$$

Ettersom dette fenomenet styres av konstruksjonshastigheten vil den effektivt «styrke» eller «tappe» dempningen i konstruksjonen. Galoppering oppstår når den negative aerodynamiske dempningskraften overgår konstruksjonens dempningskraft. For at galoppering skal oppstå

må derfor den bevegelsesavhengige kraften på høyre side av likning (2.56) være positiv, slik det såkalte «Den Hartog-kriteriet» uttrykker [15]:

$$\left(\frac{dC_L}{d\alpha} + C_D\right)\Big|_{\alpha=0} < 0 \quad (2.57)$$

Som for klassisk flutter, beskrevet i kapittel 2.4.2, kan man også beregne den kritiske vindhastigheten for galoppering [21]:

$$\bar{U}_{crit} = \frac{8\pi f_z m_z \zeta_z}{\rho d} \frac{1}{- \left[c_L(\alpha) + \frac{h}{d} c_D(\alpha) \right]} \quad (2.58)$$

hvor:

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

h er referansehøyde;

m_z er jevnt fordelt ekvivalent modal translasjonsmasse;

ρ er luftens densitet som er satt til 1.25 kg/m^3 ;

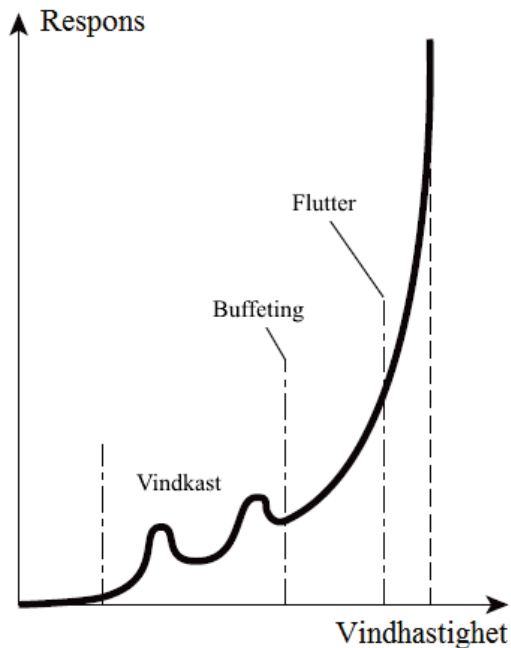
f_z er laveste egenfrekvens ved egensvingninger på tvers av hovedstrømsretning;

ζ_z er konstruksjonens dempningsforhold.

Eksempler på tverrsnitt som er spesielt utsatt for galoppering er H-seksjoner, rektangler og sirkulære seksjoner med is, som noen ganger samles opp på kraftlinjer [30].

2.4.5 Buffeting

Buffeting er et fenomen eller en mekanisme hvor den fluktuerende innkommende vinden fører til at konstruksjonen vibrerer [6]. Teorien man benytter for buffeting er estimering av forskyvningen til en konstruksjon induisert av turbulens [12].



Figur 2.13 Dynamisk respons av en slank brokonstruksjon under vindpåkjenning [6, s. 526]

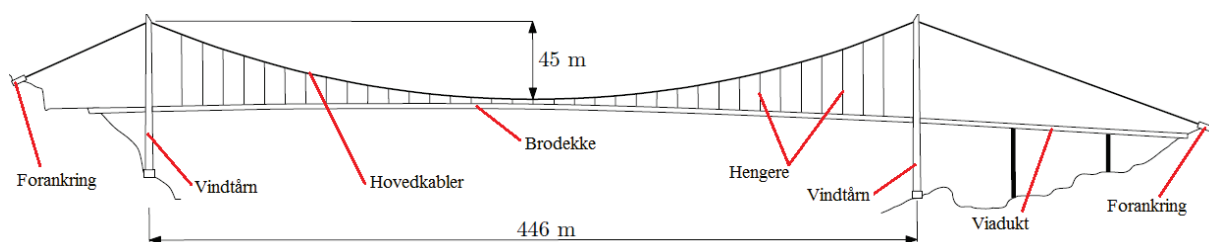
Figur 2.13 viser utviklingen av den dynamiske responsen for en brokonstruksjon for de forskjellige typene av aerodynamisk vibrasjon som er nevnt, som en funksjon av vindhastigheten. Verdiene langs den vertikale akse kan forstås som standardavvik av forskyvninger.

I seg selv kan ikke vibrasjonene fra turbulens skape katastrofale følger for brokonstruksjoner, men vibrasjonene kan bli store nok til at tiltak må gjøres. Videre kan disse svingningene over lengre tid føre til utmattingsbrudd.

3 Case-studie: Lysefjordbrua

Som case-studie i denne oppgaven er Lysefjordbrua i Forsand kommune benyttet. Siden 2013 har broen vært utstyrt med en rekke sensorer for å kartlegge og overvåke vindforhold i det komplekse terrenget med bratte fjellsider, for å studere sammenhengen mellom vindforhold og resulterende brosvingninger. I denne oppgaven er det tatt utgangspunkt i én måned med vinddata, nærmere bestemt desember i 2016.

3.1 Geometri



Figur 3.1 Oversikt over broens elementer, modifisert [12, s. 36] basert på tegning fra Statens vegvesen

Broen består av et hovedspenn på 446 m og to sidespenn på hhv. 34,5 m (nordvestlig side) og 156,5 m (sørøstlig side), og er pr. i dag på åttende plass på listen over Norges lengste spenn for hengebroer [1].

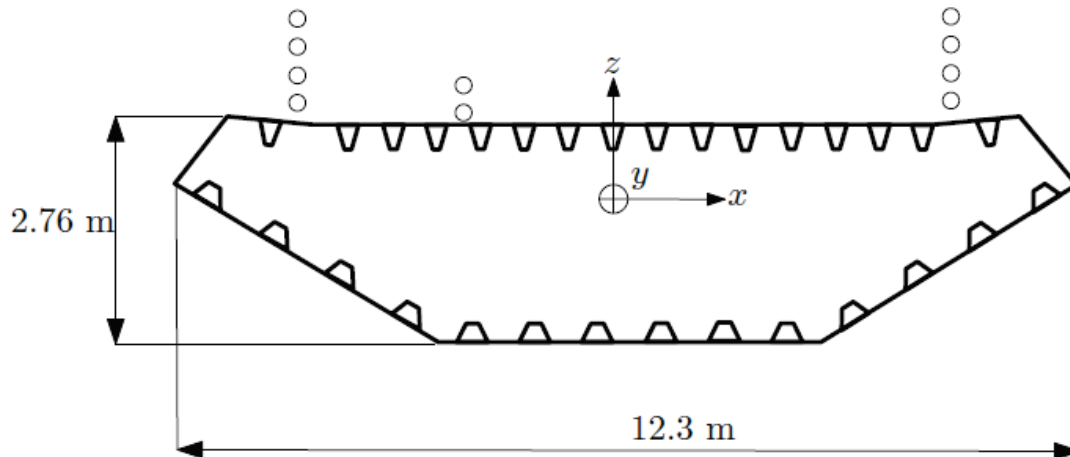
Bestanddelene i broen er som følgende:

- Brobjelke bestående av en brokasse med dekke.
- Hengekabler (hengere) som kobler brobjelken til hovedkablene.
- Hovedkabler som bærer brobjelken.
- Brotårn som støtter hovedkablene.
- Forankring i form av ankerfester for hovedkablene vertikalt og horisontalt.

3.1.1 Brobjelke

Brobjelken i Lysefjordbrua er en lukket stålkasse som er sveist sammen av mange seksjoner. Sammen med hovedkablene holder de vertikale hengekablene brodekket oppe. Sidespennene, som ofte kalles viadukter, strekker seg fra fast land til tårnene på hver sin side av broen. Viaduktene er bygget i betong og er støttet opp av søyler. På grunn av brodekkets areal, egenvekt og trafikklaster er denne komponenten av broen mest utsatt for de ytre påkjenningene på broen. Kraftene fra brodekket blir overført til hovedkablene gjennom de vertikale

hengekablene uten at aksiale krefter oppstår i brodekket. Overføringen av krefter lateralt på broen, som for eksempel på grunn av vind eller jordskjelv, resulterer i bøyningmoment om den vertikale aksen.



Figur 3.2 Tverrsnitt av brokasse, illustrasjon [12, s. 36] basert på tegning fra Statens vegvesen

Den modale torsjonsstivheten hvor både brobjelken og kabelsystemet bidrar er avhengig av hvordan kabelsystemet virker på broen. Lysefjordbrua har et kabelsystem bestående av to plan, en på hver side av broens skjærsenter, som bidrar positivt til broens modale torsjonsstivhet [6]. Figur 3.2 viser Lysefjordbrua sitt tverrsnitt av brokassen. Brokassen er utformet med tanke på aerodynamisk stabilitet, som vil si at tverrsnittet er strømlinjeformet [6]. For detaljert målsetting av tverrsnitt, se vedlegg A.

3.1.2 Hengekabler

Som nevnt er de vertikale hengekablene komponentene som kobler sammen brobjelken og hovedkablene. Hengekablene tar opp en mengde strekkspenninger og kan bevege seg i broas lengderetning. Avstanden mellom to plan med hengekabler på Lysefjordbroa er 12 m.

3.1.3 Hovedkabler

Brobjelken bæres av hovedkablene sammen med de vertikale hengekablene. Kablene er solide og tåler mye strekk. Hovedkablene er festet i ankerfestet på den ene siden, strukket over tårnene, og festet i det andre ankerfestet på motsatt side av fjorden. På toppen av tårnene passerer hovedkablene en sadel som transporterer lasten til tårnene i tillegg til at hovedkablene kan bevege seg avhengig av hvilken side av tårnene som blir påført laster [6].

3.1.4 Brotårn

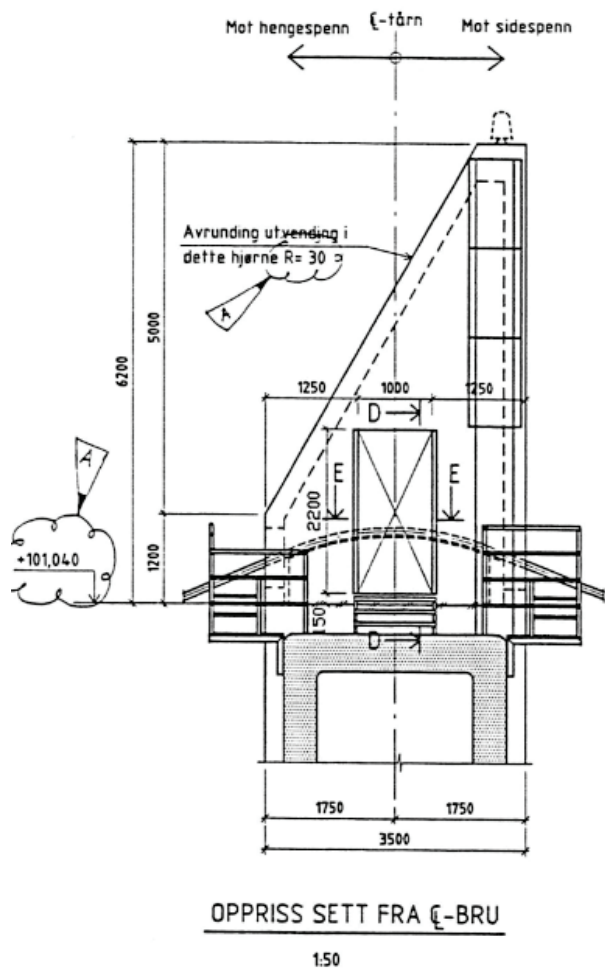


Figur 3.3 Nordvestlig tårn, sett sørfra. Foto: Jonas Snæbjørnsson



Figur 3.4 Tårnhus, sørlig tårnben. Foto: Jonas Snæbjørnsson

Brotårnene består av to betongsøyler koblet sammen ved hjelp av to tverrbjelker. De to brotårnene står mellom viaduktene og hovedspennet, og er som nevnt 102 m høye. Den ene tverrbjelken støtter opplagrene, mens den andre fester toppen av søylene. Som nevnt i kapittel 3.1.3, blir hovedkablene strukket over brotårnene i toppen over en sadel som illustrert i Figur 3.5. Brotårnene vil da kunne oppta de vertikale komponentene av kabelkreftene som aksiallast i tårnet. Tårnsadlene er beskyttet av et «betonghus», videre omtalt som tårnhus, for å beskytte kablene og tårnsadlene, se Figur 3.4. Et nærbilde av tårnsadelen i det sørlige tårnbenet er vist i Figur 3.6. For detaljerte tegninger av brotårn og tårnhus, se vedlegg A.



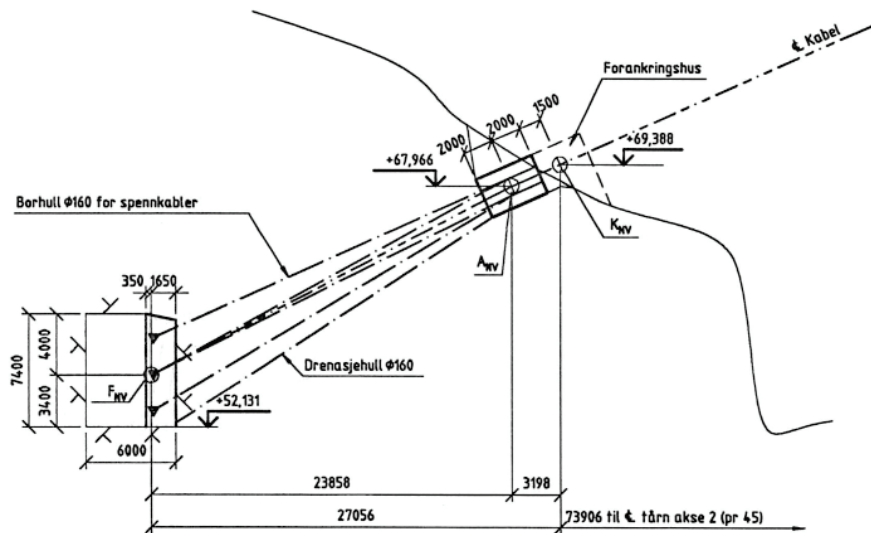
Figur 3.5 Sørlig tårnhus på toppen av nordvestlig brotårn, basert på tegning fra Statens vegvesen



Figur 3.6 Tårnsadel i det sørlige tårnbenet, Foto: Jonas Snæbjørnsson

3.1.5 Forankring

Hovedkablene er forankret i en ankerkonstruksjon på hver side av brua. Ankeret består av flere spredningskamre og forankringskamre. I et spredningskammer er trådene i hovedkablene spredt som vist i figuren under.



Figur 3.7 Forankring i fjell, nordvestlig side, basert på tegning fra Statens vegvesen

Hovedkablene er ført inn i et spredningskammer for at kraften skal fordeles ut over et større areal før det forankres direkte i fast grunn, se Figur 3.7 [6]. Forankringen i fast grunn er ofte i form av en fjellhall som tillater tilsyn og vedlikehold av forankringen. Figur 3.8 viser forankringen i fjell for broen på den nordvestlige siden.



Figur 3.8 Fundamentering i fjell, nordvestlig side, Foto: Jonas Snæbjørnsson

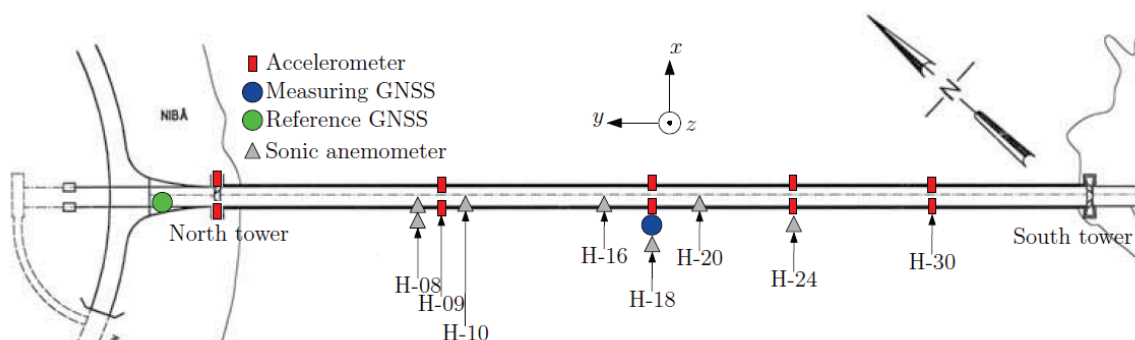
3.2 Instrumentering

Mellom november 2013 og juni 2014 ble seks soniske anemometere installert på vestsiden av brodekket for å kunne måle vinden [12]. I dag består instrumenteringen av åtte anemometere [31]. Anemometrene er enten direkte festet til de vertikale hengerne, eller festet til rør, via koblingsplatene som hviler på hovedkablene. Alle anemometre er montert omtrent 6 m over brodekket [12, 31].

For å kunne måle akselerasjonen til broen er det installert 10 triaksiale akselerometere. Av de 10 akselerometrene er fire par installert inne i brokassen, mens de resterende er installert på toppen av det nordvestlige tårnet [31]. Instrumenteringen av broen som er gjeldende for oppgaven er som følger:

- 6 stk. anemometere
- 1 stk. værstasjon ved én posisjon
- 10 stk. akselerometere, dvs. fire par inne i brokassen og to stk. på toppen av det nordvestlige tårnet
- 1 stk. GNSS («Global Navigation Satellite System») i form av RTK-GPS

Instrumenteringen er i hovedsak en del av et omfattende overvåkningsprosjekt som har pågått i over fire år. Målet med dette prosjektet er å få økt forståelse om oppførselen til hengebroer som krysser dype og brede fjorder. Prosjektet er delvis finansiert av Universitetet i Stavanger, Norsk senter for offshore vindenergi (NORCOWE) og Statens vegvesen som hovedpartner i forskningsprosjektet [31]. Dette prosjektet bidrar til forskning knyttet til det omfattende utbyggingsprosjektet «Ferjefri E39» [32, 33].



Figur 3.9 Instrumentering av Lysefjordbrua, modifisert [12, s. 38]

Figur 3.9 viser hvor de ulike målesensorene er plassert på broen.

3.2.1 Anemometere og værstasjon

Det er som nevnt montert seks soniske anemometere av type 3D WindMaster Pro sonisk som kan lagre data med en samplingsfrekvens på opptil 32 Hz. Denne typen anemometer måler tidsdifferansen for lydgjennomgang mellom nord- og sørsensoren på anemometeret og tilsvarende mellom øst- og vestsensoren på anemometeret [34]. I tillegg er det montert én værstasjon av type Vaisala WXT520, som kan lagre data opp til fire ganger i sekundet.



Figur 3.10 Anemometer montert på henger [31, s. 5]



Figur 3.11 Anemometer montert på stang over henger [31, s. 5]

Figur 3.10 viser et anemometer montert på et stativ på en henger, mens Figur 3.11 viser et anemometer som er montert på en stang over hovedkablene. De soniske anemometrene måler vindhastigheten i tre retninger. I dette tilfellet registreres komponentene i x-, y- og z-retningen hvor x-retningen er vinkelrett på brobanen, y-retningen er langs med broen og z-retningen er vertikalt. De tre vindkomponentene inkluderer også informasjon om vindretningen.



Figur 3.12 Værstasjon, type Vaisala WXT520 [12, s. 36]

På vestsiden av brodekket er det også montert en værstasjon (H10), som måler vindhastighet, retning, temperatur, fuktighet, atmosfærisk trykk og nedbør. Figur 3.12 viser værstasjonen montert på en av de vertikale hengekablene. Anemometrene ved henger 8 (H08) er montert i to høyder over brodekket: 6 m (H08Wb) og 10 m (H08Wt) [12].

3.2.2 Akselerometere og GPS-sensor

Inne i brodekket er det installert fire par med triaksiale akselerometere. De er plassert ved fire seksjoner, som vist i Figur 3.9, nær henger 9, 18, 24 og 30. Plasseringen av akselerometrene er slik at man måler både symmetriske og asymmetriske moder. Hver av disse fire seksjonene har to sensorer, én på hver side av brokassen, for å overvåke vridningen av brokassen i tillegg til de translatoriske bevegelsene.



Figur 3.13 Akselerometer i brokasse [31, s. 6]



Figur 3.14 Plassering av akselerometer i brokasse [31, s. 6]

Avstanden mellom de to sensorene inne i brokassen er 7.15 m og de har en maksimal samplingsfrekvens på 200 Hz [12]. Figur 3.14 viser plassering av akselerometer inne i brokassen. Legg merke til at akselerometer-parene i brodekket er i en vertikal avstand fra brokassens skjærsenter, som betyr at man bør forvente at rotasjonsresponsen gir et lite bidrag til den horisontale responsen. I tillegg er det installert to akselerometere ved det nordvestlige tårnet for å overvåke og måle responsen her, se Figur 3.15-16. Avstanden mellom akselerometrene i det nordvestlige tårnet er 8.7 m [31].



Figur 3.15 Akselerometer i tårn, nordlig tårnben. Foto: Jonas Snæbjørnsson



Figur 3.16 Akselerometer i tårn, sørlig tårnben. Foto: Jonas Snæbjørnsson



Figur 3.17 RTK-GPS, base-antenne [31, s. 6]



Figur 3.18 RTK-GPS, «rover»-antenne [31, s. 6]

I juni 2015 ble GPS-måleren montert på broen for å måle den statiske og kvasi-statiske forskyvningen direkte. Måleren er et system av type RTK-GPS, «Real-Time Kinematic-Global Positioning System», bestående av en base og en «rover», hvor det er «roveren» som beveger seg [12]. I Figur 3.17-18 er målesystemet vist.

3.2.3 Datainnsamling

Tabell 3.1 Oversikt over sensorer installert på broen

Antall	Sensor	Type
6	Anemometer	3D WindMaster Pro sonisk (Gill Instrument Ltd.)
1	Værstasjon	Vaisala WXT520
8+2	Akselerometer	Triaxial MEM (Canterbury Seismic Instruments Ltd. (CSIL))
1	GPS (system)	Trimble BD930 GNSS + Trimble AV33 GNSS

Alle sensorene, oppsummert i Tabell 3.1, produserer digitale signaler og er koblet til fem datainnsamlingsenheter (DIS) ved bruk av CAT5-kabler. DIS-enhetene omfatter tre CUSP-3 enheter, én CUSP-M4 enhet og én CUSP-M8 enhet produsert av CSI [31]. Dataene fra disse fem enhetene går til slutt gjennom en siste enhet (CUSP-M32) som samler alle dataene til ett datasett for hvert tiende minutt. Datainnsamlingen skjer kontinuerlig og sendes via en 3G nettverksruter til en server på Universitetet i Stavanger som gjør det mulig å lese dataene. For å kunne studere brosvingninger på grunn av trafikk, i tillegg til de svingningene som er forårsaket av kraftig vind, er det valgt å samle inn måledata kontinuerlig. Dette gir en meget stor mengde med data, hvor datasett er på størrelsen opp mot 3 GB for én dag. Så denne oppgaven begrenser seg som nevnt til en mindre periode.

3.3 Nøkkelparametere

De sentrale konstruksjons- og vindlastparametrene for Lysefjordbrua er vist i Tabell 3.2.

Tabell 3.2 Nøkkelparametere for Lysefjordbrua basert på [12, s. 143]

Konstruksjons- og lastparametere	Symboler	Verdi
Lengde, hovedspenn [m]	L	446
Masse, brokasse [kg/m]	m_g	5350
Masse, hovedkabler [kg/m]	m_c	408
Treghetsmoment [kgm ² /m] (brokasse + kabler)	I_θ	58730
Høyde brokasse [m]	D	2.76
Bredde, brokasse [m]	B	12.3
Dragkoeffisient	C_D	1.0
Løftkoeffisient	C_L	0.1
Momentkoeffisient	C_M	0.02

3.4 Egenfrekvenser

Egenfrekvensene er estimert ved bruk av den såkalte SSI-COV-metoden [12]. Deretter er verdiene sammenlignet med tilsvarende verdier basert på modeller laget i Alvsat (FEM-program utviklet av Statens vegvesen) og SBM («Simplified Bridge Model») der verdiene er vist i Tabell 3.3. SBM er en metode benyttet av postdoktor E. Cheynet i sin avhandling om fullskala-overvåking av Lysefjordbrua. Metoden går ut på at egenfrekvensene og svingeformene ved broen var tilnærmet ved bruk av harmonisk rekkeutvikling [12].

Tabell 3.3 Sammenlikning av egenfrekvensene for broen. [12, s. 118]

Modes	SSI-COV Hz	Alvsat		SBM	
		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

4 Resultater og diskusjon

Dataene som er samlet inn for den utvalgte måleperioden er prosessert og analysert ved hjelp av det matematiske dataprogrammet MATLAB («Matrix Laboratory»). Som nevnt tidligere, er rådataene lagret på en server på Universitetet i Stavanger. På grunn av at disse filene er veldig store, er de komprimert. Rådataene er .xls filer og er ved hjelp av et skript i MATLAB, dekomprimert og lagret som .mat filer, sortert etter dato. Signalene som er registrert ved anemometrene eller akselerometrene har en øvre grense for verdier som gjør at hvis det registreres for urimelig store responser eller vindkast blir disse satt til å være et såkalt «ikke-tall» som videre er omtalt som NaN-verdier. Dette er gjort for å begrense støy og unormalt høye signaler.

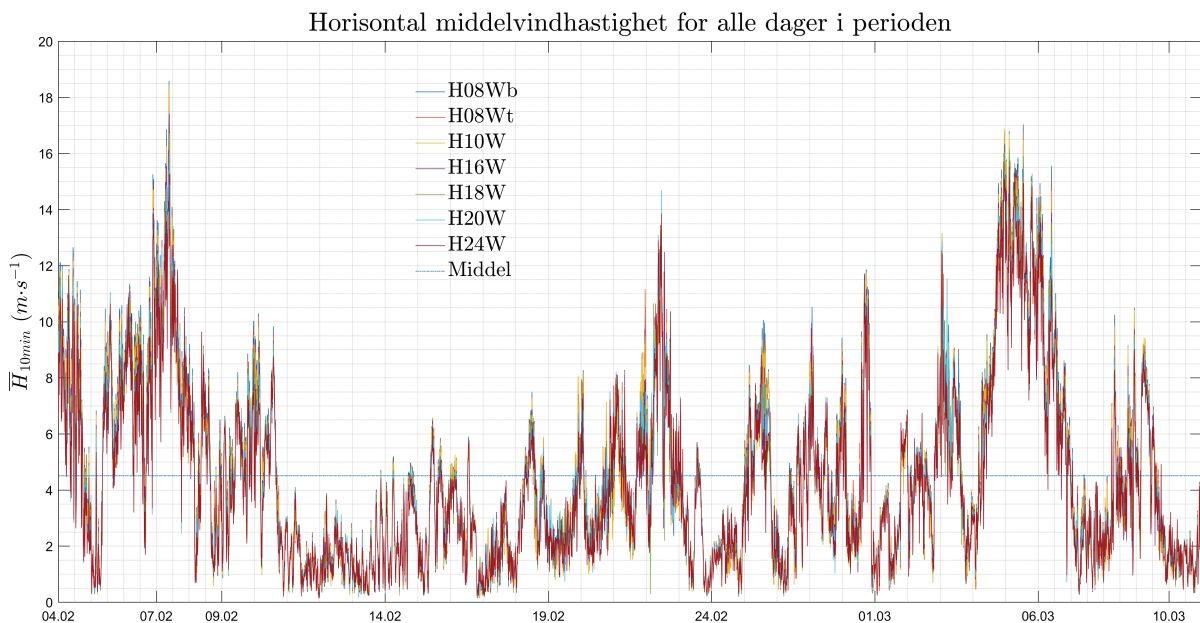
I starten av arbeidet med denne oppgaven var desember måned i 2016 valgt som grunnlag for analysen som skulle gjøres. Etter mye prøving og feiling med MATLAB, viste det seg at det hadde oppstått lagringsfeil for flere målesensorer i omtrent hele 2016. Dette ble oppdaget ved at man fikk logiske verdier for kun et av akselerometer-parene (H30). Siden dette er en studie av sammenhengen mellom brotårn og brodekke, hvor respons fra alle akselerometer-par er vesentlige, ble tidsperioden endret til 04.02.17 – 10.03.17. Dette nye datasettet inneholdt alle verdiene som var vesentlige og dermed var gyldige for bruk i denne analysen.

4.1 Vind

I løpet av de 35 dagene i datasettet, hadde man en ganske stor variasjon av vindhastigheter. Ved hjelp av de genererte figurene vist ble det funnet ut at 07.02.17 var dagen med mest vind. Ved valg av et 10 minutters intervall så man på oversikten over døgn-middelvinden, se Figur 4.2, samt intervallet på tre timer (09:00-12:00), se Figur 4.3. Valget falt på 09:10-09:20, da dette intervallet inneholdt en av de høyeste middelvindhastighetene, basert på tre-timers-intervallet.

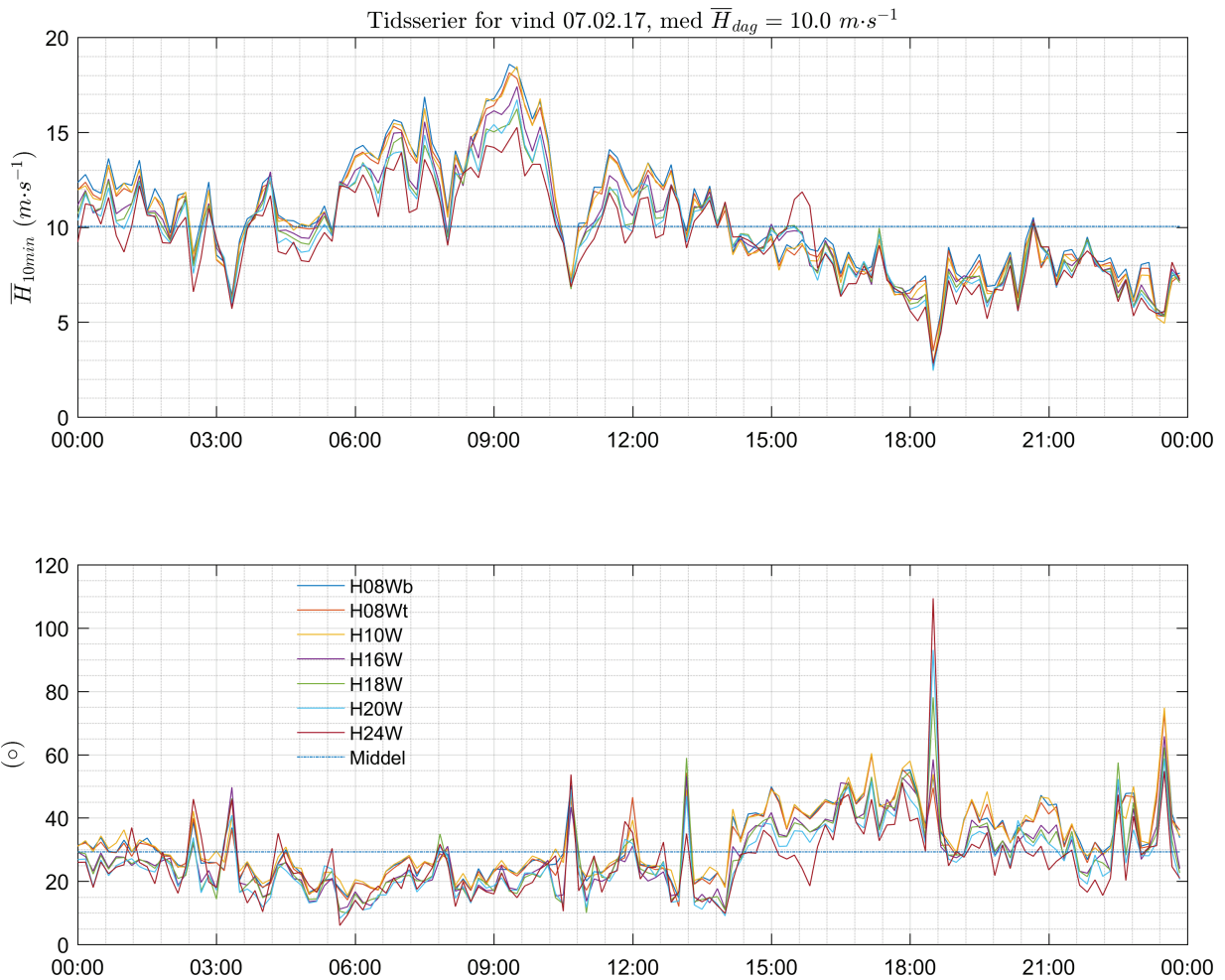
Retningen vinden blåste på broen var i hovedsak fra sørvest mot nordøst. Broen er orientert 42 grader fra nord som vist i vindrosene, se Figur 4.6-4.10. Der ser man at vinden blåste hovedsakelig fra nordøstlig retning. Som standard er vindens retning definert fra nord slik at broens orientering er -42 grader eller 323 grader fra nord. Vinddataene som er presentert er behandlet slik at vindkomponentene er transformert til et vind-basert koordinatsystem ved hjelp av funksjonen «tiltCorrection», laget av postdoktor E. Cheynet, se vedlegg C for rutine i MATLAB. Funksjonen retter på vindkomponentene slik at komponentene blir korrekte i

forhold til et vindbasert koordinatsystem der \bar{H}_{10min} i de neste figurene er horisontal total middelvindhastighet i xy-planet. Dermed er vinddataene i denne oppgaven kun brukt til identifisering og illustrasjon av 10 minutters intervall, som igjen er grunnlag for analyse av responspektra for brotårn og brodekke.



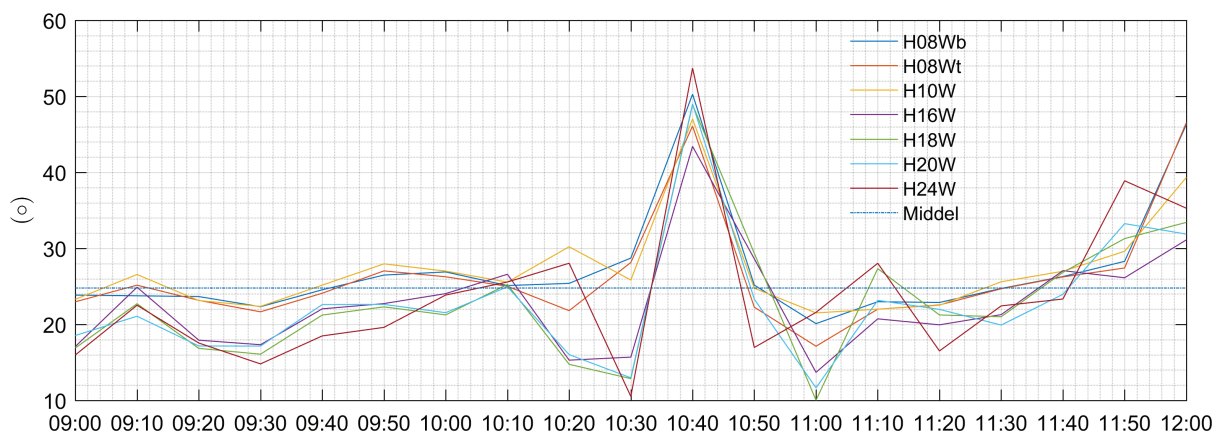
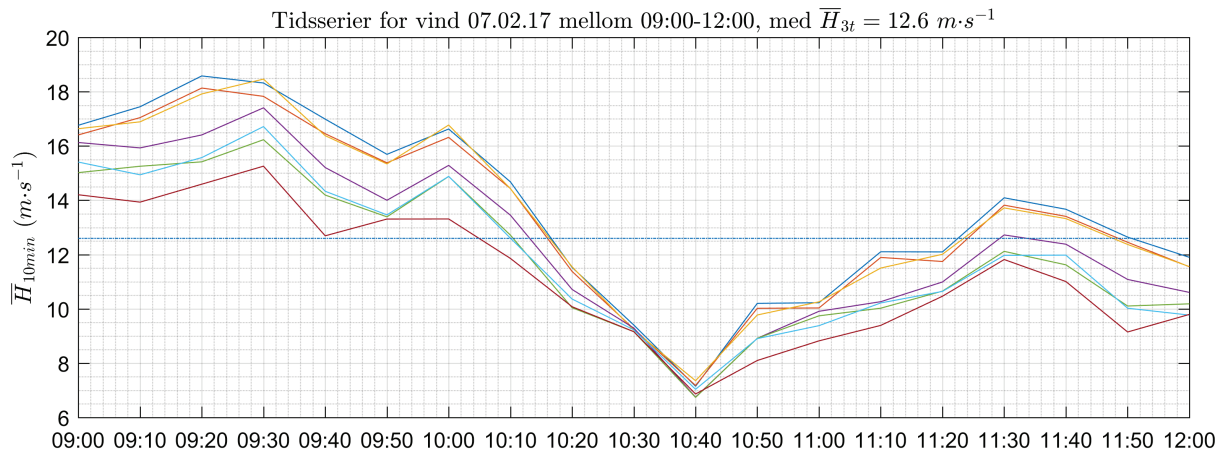
Figur 4.1 Oversikt over den horisontale totale middelvinden (\bar{H}_{10min}), for hele analyseperioden.

Som man ser Figur 4.1, er dette en periode hvor vinden varierer fra mange dager med ganske lite vind, men noen dager med relativt mye vind. Figuren viser den totale middelvinden for alle anemometre ved alle de 35 dagene i perioden, og man ser at den høyeste middelvinden som er beregnet er sted mellom 07.02.17 og 08.02.17. Her er middelvinden over 18 m/s for enkelte anemometre. Det er også tatt i betraktning dager hvor middelvinden er lavere, som f.eks. 10.03.17, med formål å sammenlikne responsen mellom perioder med kraftig vind og svak vind.



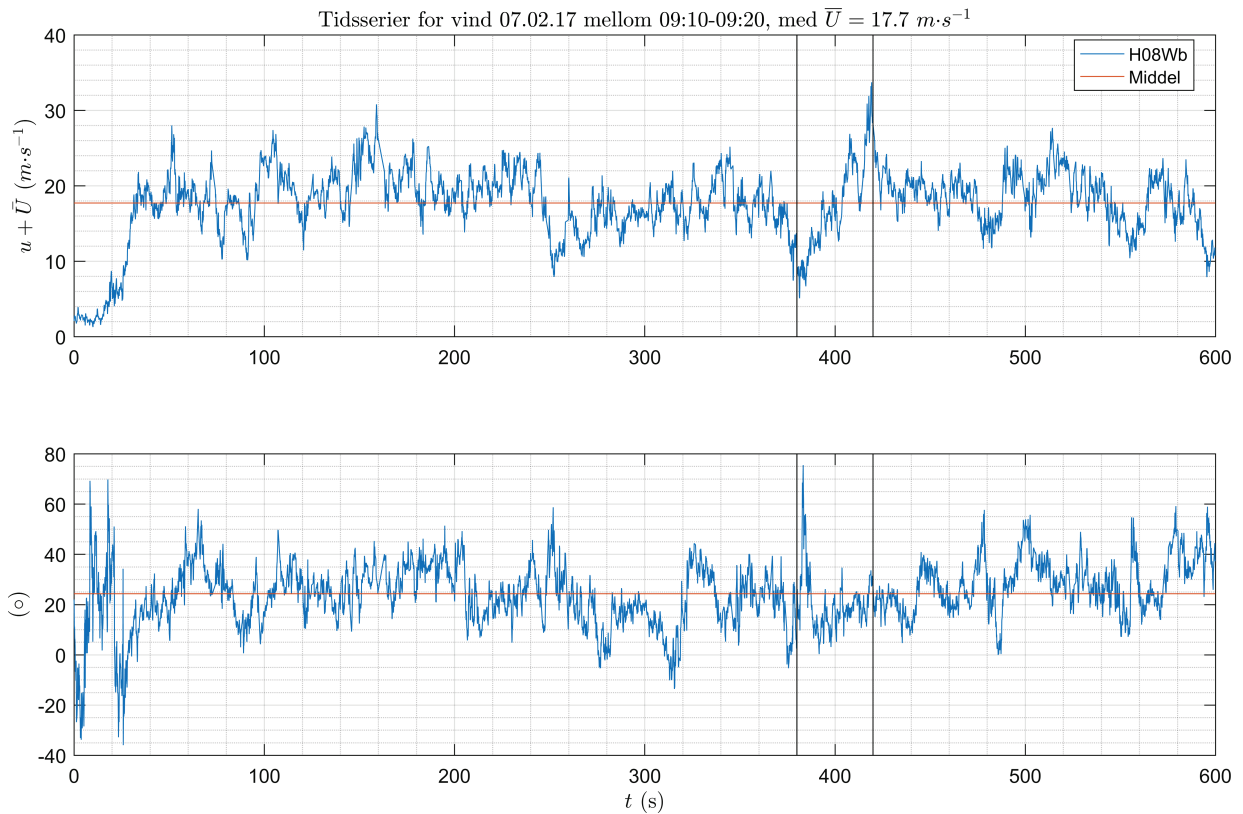
Figur 4.2 Oversikt over horisontal total middelvind den 07.02.17, med $\bar{H}_{dag} = 10.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Figur 4.2 viser oversikten over middelvindhastigheten øverst og tilhørende retning for 07.02.17 nederst. I tillegg er gjennomsnittet tegnet inn for anemometrene for hele døgnet, for å gi en bedre forståelse av hvordan vinden endrer seg. Intervallet på 10 minutter som er valgt ut befinner seg mellom 09:00-12:00, og dette tre-timers-intervallet er vist i Figur 4.3. Her ser man at det skjer en retningsforandring rundt 10:40 da vindens hastighet reduseres samtidig som at vindretningen endres i form av at vinden blåser mer østlig retning da man ser at vinden går fra 30-50° på veldig kort tid for anemometer H08Wb. I forhold til broen blir da vindens retning på rund 92° fra nordøstlig retning, som betyr at vinden blåser tilnærmet normalt på brobanen en liten periode.



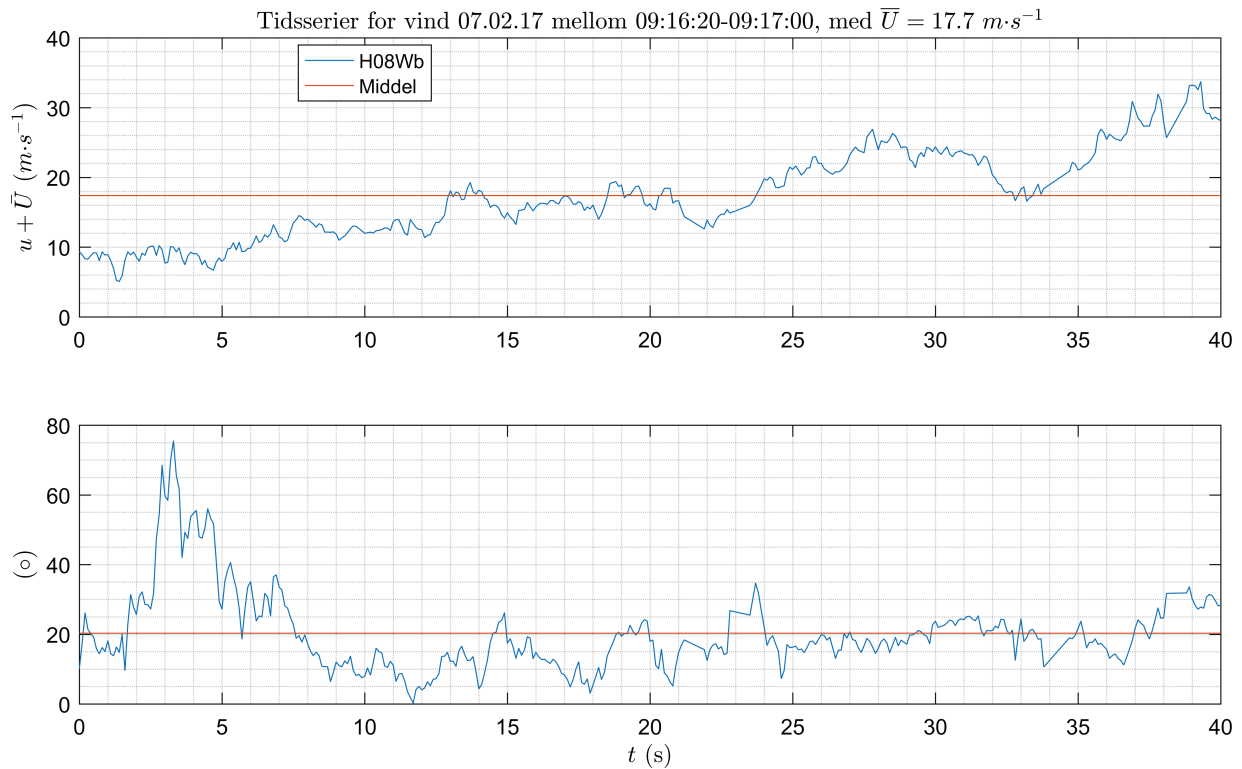
Figur 4.3 3t-intervall kl. 09:00-12:00 den 07.02.17, med $\bar{H}_{10min} = 12.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Figur 4.4 viser et intervall på 10 minutter der hvor det var mye vind, videre omtalt som kraftig vind. Grunnen til at H08Wb-sensoren er benyttet som base for vindmålingene i denne oppgaven er at de fleste andre anemometrene hadde NaN for de høye vindkastene som var opp mot 30 m/s. I tillegg ser man av Figur 4.3 at det er denne sensoren som har høyest middelvind-topp ved intervallet 09:00-12:00. Fra figuren ser man også at blåste det mest mot den nordvestlige siden av broen denne dagen, der man tydelig ser mindre vindhastigheter for anemometrene som ligger mot sørvest.



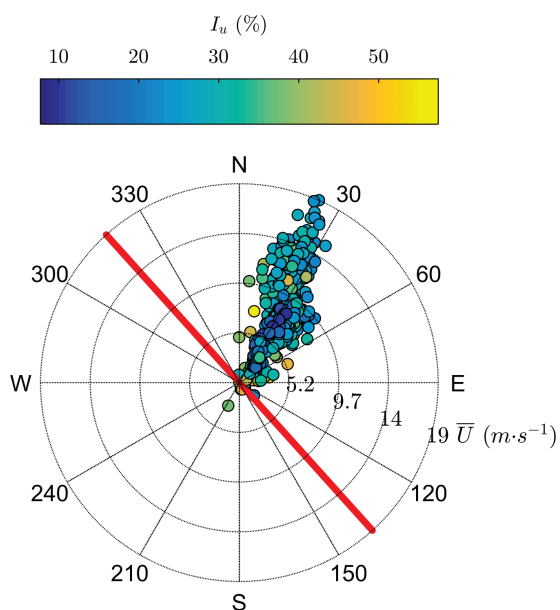
Figur 4.4 Tidsserier for vind ved H08 09:10-09:20 den 07.02.17, med $\bar{U} = 17.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

De vertikale linjene i Figur 4.4 markerer et område som er interessant i forhold til vindretning og økning i vindhastighet. Dette området er utvidet og vist i Figur 4.5. Her ser man at vinden øker jevnt over en periode på 40 sekunder. Variasjonen i retningen for vinden ser man var høyest for lavere vindhastigheter. Når vinden økte opp mot 30 m/s var vinden i en stabil retning, fra nordøst mot sørvest. Denne vindretningen var den vanligste vindretningen gjennom hele måleperioden. For høyere vindhastigheter vil, som nevnt i teorien om turbulensintensitet, vinden være mer stabil som vil si at vindretningen vil være mer stabil. Det ser man er tilfelle ved dette intervallet, da vindretningen varierer mest for lavere vindhastigheter.

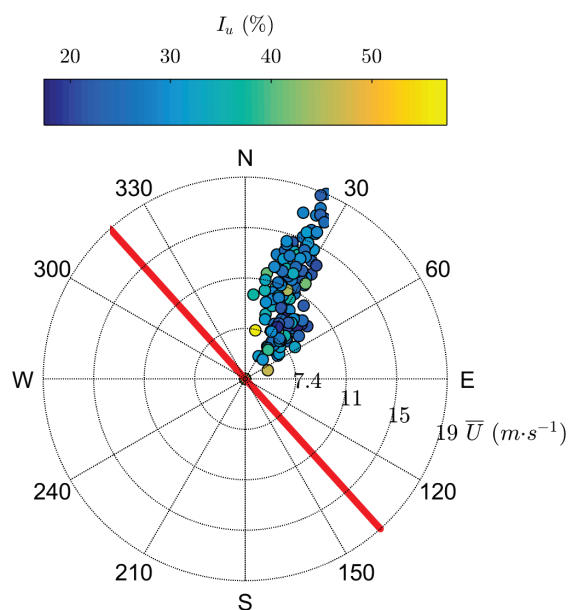


Figur 4.5 Tidsserier for mellom 09:16:20-09:17:00 den 07.02.17, med $\bar{U} = 17.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

I tillegg til tidsserien som viser hvordan vinden beveger seg i forhold til broen er det utarbeidet vindroser, generert ved hjelp av rutinen «ScatterWindRose» laget av postdoktor E. Cheynet, se vedlegg C for rutine i MATLAB. Figur 4.6 viser middelvindhastighetene for 10 minutters intervaller samt deres tilhørende turbulensintensitet for de tre døgnene det var mest vind på broen for anemometeret midt på broen (H08Wb), mens Figur 4.7 viser de samme vinddataene for den mest vindutsatte dagen, 07.02.17.

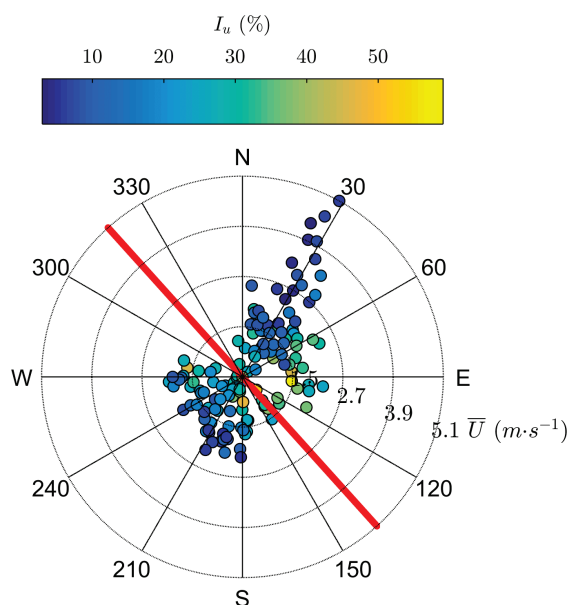


Figur 4.6 Vindrose for H08 den 06-08.02.17

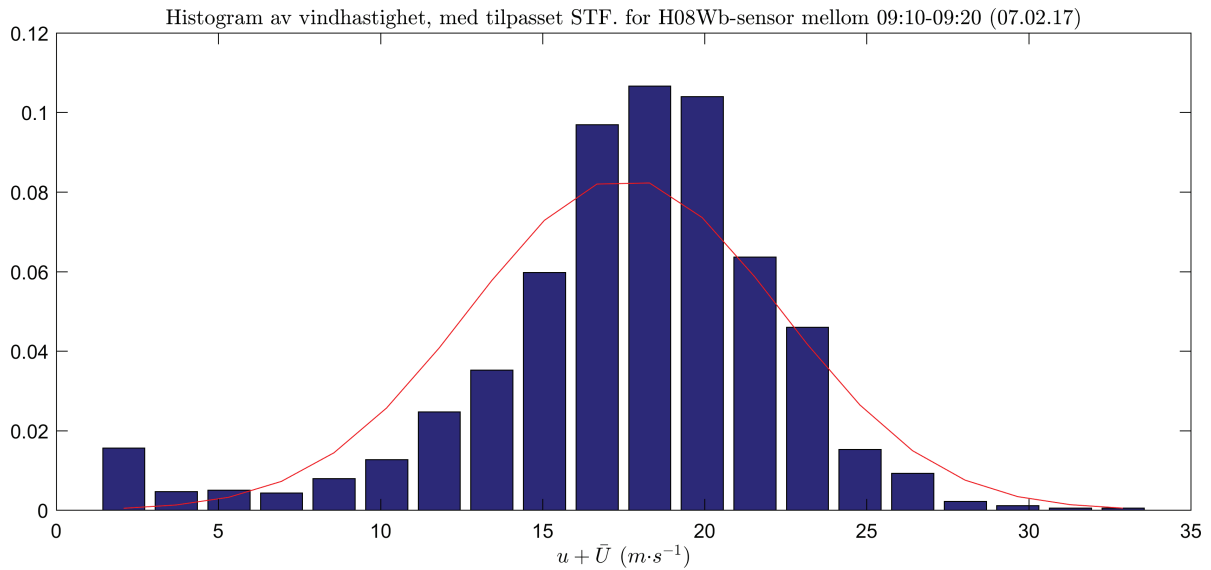


Figur 4.7 Vindrose for H08 den 07.02.17, med $\bar{U}_{dag} = 17.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

I tillegg er det også generert en vindrose den dagen med lite vind, se Figur 4.8. Broens orientering er markert med den røde linjen, hvor man ser at vinden blåser i gjennomsnitt nesten normalt på broens lengderetning. Her ser man også at vindens retning varierer mellom nordøstlig og sørvestlig vind, hvor retningen for vinden 07.02.17 hovedsakelig var kom fra nordøst. I likhet med Figur 4.10 og Figur 4.11 viser også disse figurene at ved lavere vindhastigheter er det en tendens til høyere turbulensintensitet, her vist som en fargeskala fra blå til gul, der gul er høyest turbulensintensitet.



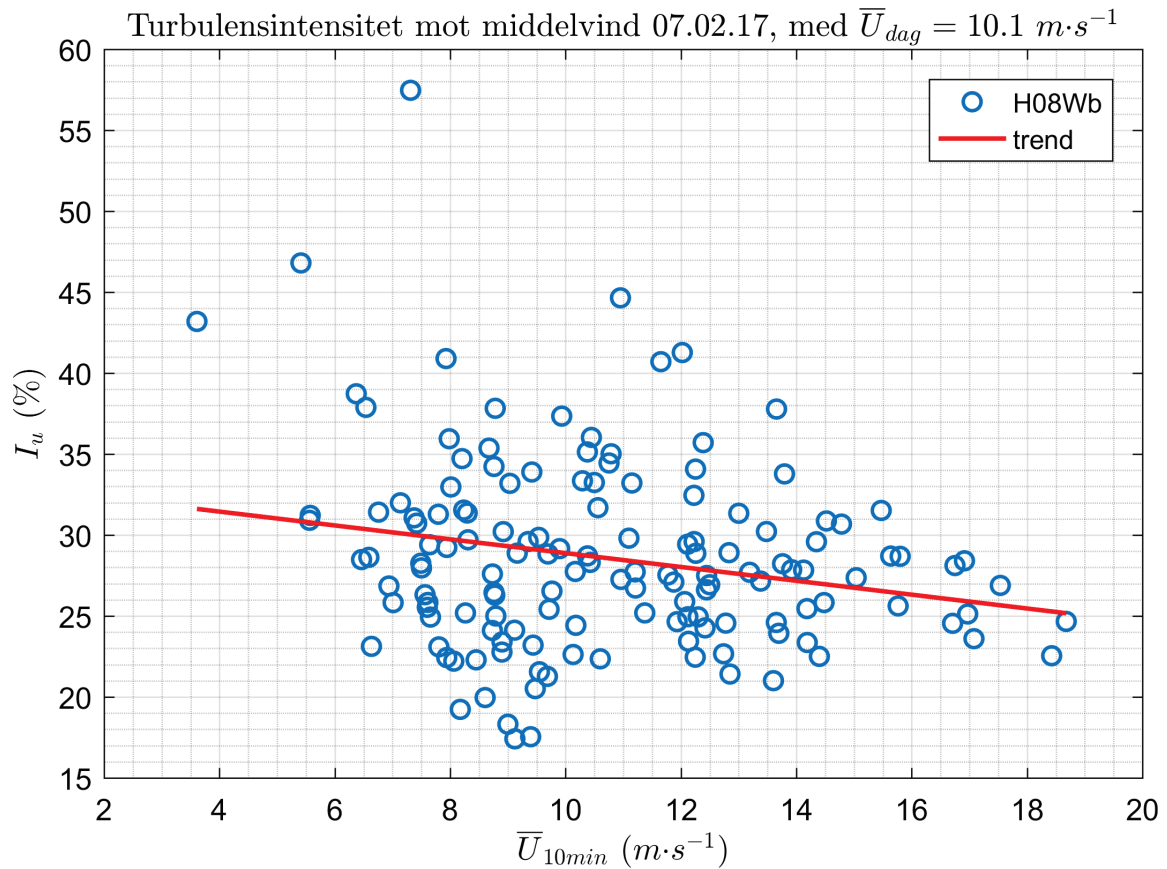
Figur 4.8 Vindrose for H08 den 10.03.17, med $\bar{U}_{dag} = 1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$



Figur 4.9 Histogram over horisontal turbulens fra vindmålingene mellom 09:10-09:20 ved 07.02.17, med $\bar{U} = 17.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

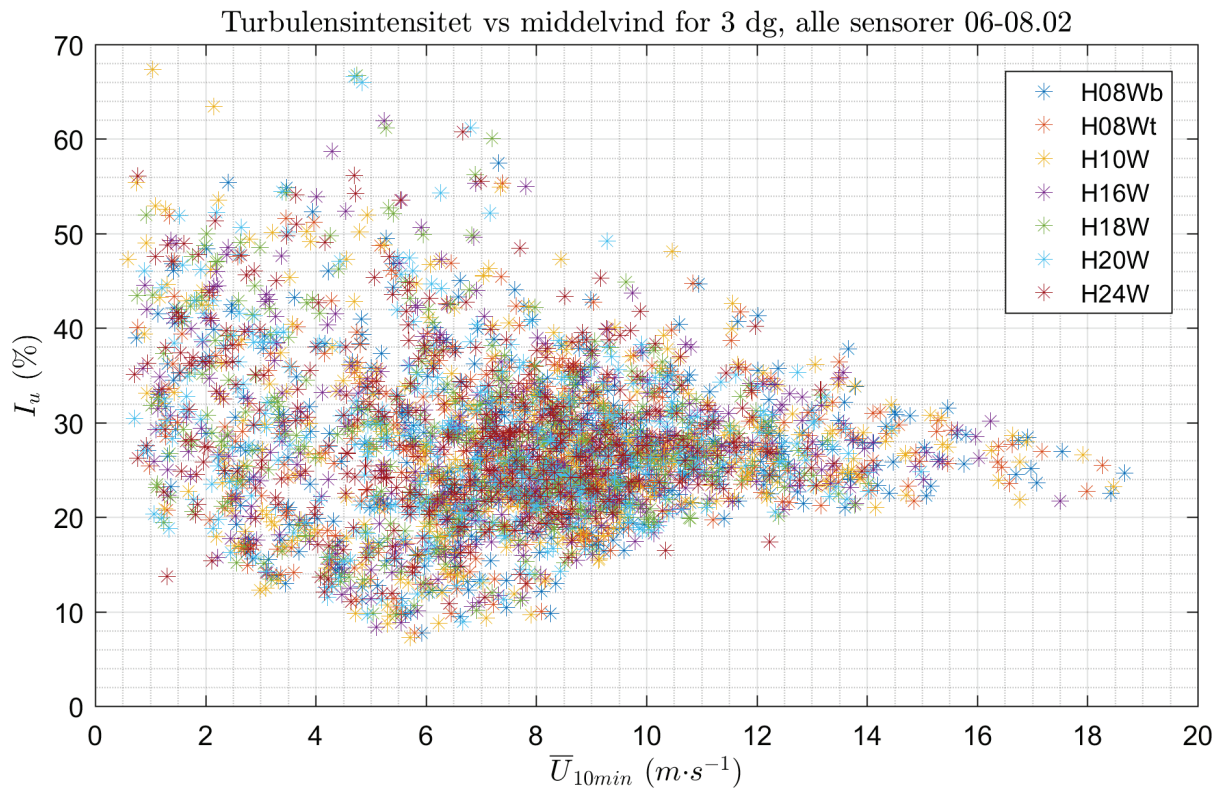
Figur 4.9 viser et histogram av vindhastighetskomponenten i u-retningen for den dagen det blåste mest, 07.02.17. I teorikapittelet var tilsvarende figur vist for en vilkårlig måling (02.03.17), se 2.3.1. I likhet med figuren fra teorikapittelet viser også dette histogrammet en viss grad av normalfordeling. Den røde kurven er laget ved en funksjon som heter «fitdist», se vedlegg C, i MATLAB som tilpasser sannsynlighetstetthet til måledata.

4.2 Turbulensintensitet



Figur 4.10 Turbulensintensitet mot middelvind, med trendlinje, for 07.02.17.

Figur 4.10 viser turbulensintensitet mot middelvind for den dagen med mest vind på broen for sensor H08Wb. I punktplottet som viser målinger fra alle anemometrene, se Figur 4.11, ser man at ved lavere vindhastigheter er turbulensintensitetene høyere og omvendt. Dette er vist ved at en tilpasset trendlinje er tegnet inn, se Figur 4.10, for å en forenklet sammenhengen mellom vindhastighet og turbulensintensitet. Som nevnt i teorikapittelet om turbulensintensitet, se kapittel 2.4.1, bekrefter resultatet fra Figur 4.10-12 at ved høyere vindhastigheter er turbulensintensiteten lavere. Fra likningene definert i kapittel 2.4.1 ser man også at ved høyere middelvindhastigheter øker nevneren som gjør at turbulensintensiteten reduseres.



Figur 4.11 Oversikt over turbulensintensiteter og middelvindhastigheter for 3 dager

4.3 Respons

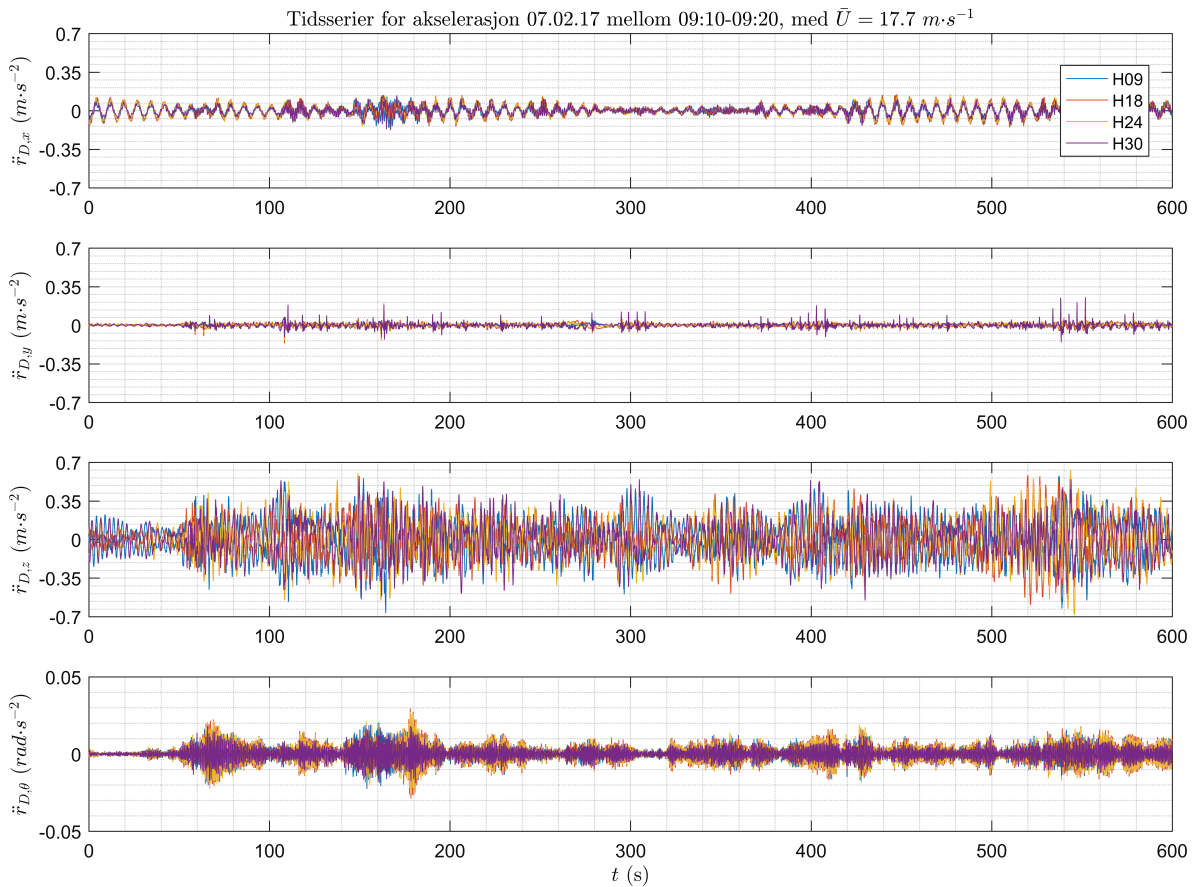
For analysen av respons er målte akselerasjoner fra brodekkets og det nordvestlige brotårnet benyttet som grunnlag. Det er også studert modellert respons, basert på elementmodellen postdoktor J. Wang har laget i Abaqus.

4.3.1 Akselerasjoner

Som nevnt i 3.2.2 om instrumentering av akselerometre, er det fire snitt på brodekke hvor det er et par av to akselerometre. Hvert akselerometer har et lokalt koordinatsystem hvor z-retningen er definert positiv ut ifra «pluggen» som vist i kapittelet om instrumentering, se Figur 3.13. For brodekket gjør dette at z-retning er definert positivt nedover. Akselerometrene i brodekket og i brotårnet er montert i forskjellige plan slik at den langsgående retningen for brodekket er y-retning, mens for brotårnet er x-retningen i broens lengderetning. Dermed er også den laterale retningen, altså normalt på broen, ulik for brotårnet og brodekket. For brotårnet er y-retningen angitt om den laterale akse, mens for brodekket er x-retningen den laterale akse. Dette er et viktig grunnlag for forståelse og tolkning av resultatene av akselerasjonene.

I tillegg til de translatoriske retningene er også rotasjonsbevegelsen rundt broens lengderetning analysert for både brotårnet og brodekket, for at de ulike torsjonssvingeformene skal bli presentert.

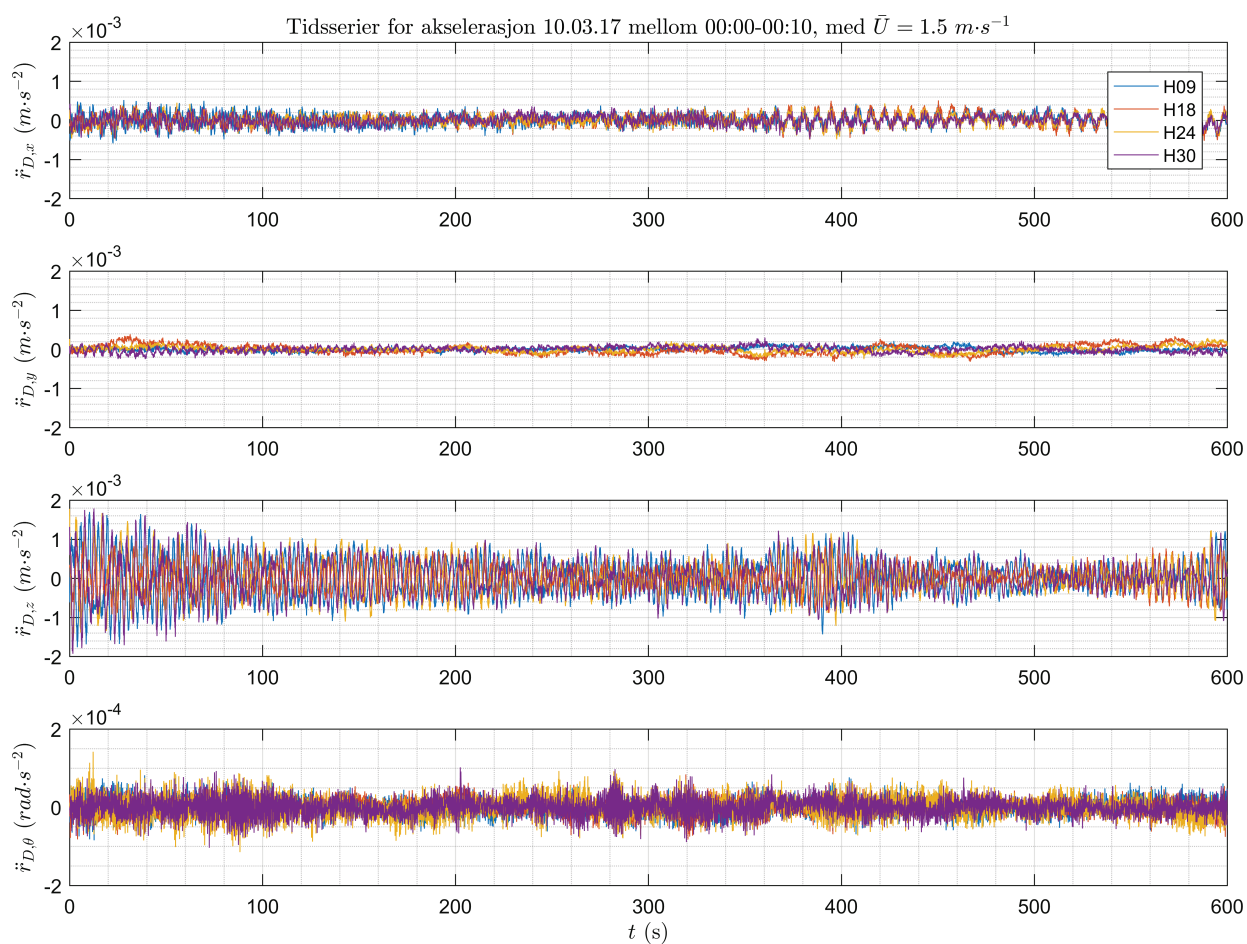
4.3.1.1 Brodekke



Figur 4.12 Tidsserier for akselerasjon for alle akselerometrene installert i brokassen, 09:10-09:20 den 07.02.17, med $\bar{U} = 17.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. De ulike retningene som er vist (fra topp til bunn) er lateral (x), langsgående (y), vertikal (z) og torsjonal om langsgående akse (θ).

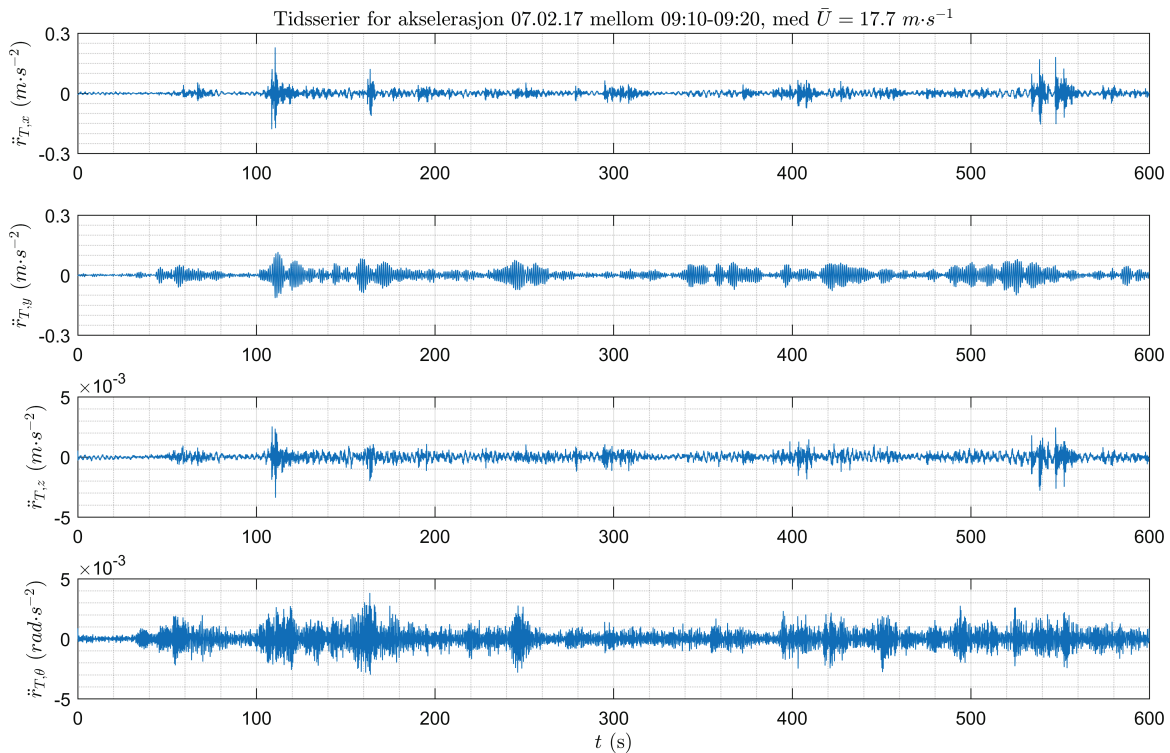
I .mat filene, som er generert ved hjelp av postdoktor E. Cheynet sin rutine for behandling av rådata, ligger informasjon om akselerasjoner i de translatoriske retningene samt torsjonsretningene. Basert på definisjonen om de lokale aksene til hvert akselerometer er akselerasjonsdataene hentet ut og lagt inn i en egen matrise før verdiene er plottet, se vedlegg C for detaljer i rutinen.

Figur 4.12 viser tidsserier for alle akselerometer-parene ved perioden med kraftig vind på broen. Fra figuren over ser man at størrelsen på responsen er jevn på alle de fire akselerometer-parene, der den vertikale responsen er dominerende. I tillegg ser man at langs med broen er responsen liten, som antatt siden broen er holdt fast i begge ender av lengderetningen. Dermed er ikke y-retningen (langsgående med broen) for brodekket videre analysert i oppgaven. Tilsvarende er tidsserier for alle akselerometer-parene ved perioden med svak vind vist i figuren nedenfor, se Figur 4.13.



Figur 4.13 Tidsserier for akselerasjon for alle akselerometer-parene installert i brokassen, 00:00-00:10 den 10.03.17, med $\bar{U} = 1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. De ulike retningene som er vist (fra topp til bunn) er lateral (x), langsgående (y), vertikal (z) og torsjon om langsgående akse (θ).

4.3.1.2 Brotårn



Figur 4.14 Tidsserier for akselerasjoner for akselerometer-paret installert i brotårnet, 09:10-09:20 den 07.02.17, med $\bar{U} = 17.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. De ulike retningene som er vist (fra topp til bunn) er langsgående (x), lateral (y), vertikal (z) og torsjon om langsgående akse (θ).

I likhet med responsen fra brodekket, er responsen fra brotårnet ved samme tidsintervall analysert. Brotårnet har som nevnt en liten forskjell i koordinatsystemet fra brodekkets koordinatsystem, der x -retningen nå er i broens lengderetning. Dette bekreftes av Figur 4.14, der man ser at den største responsen fra det nordvestlige tårnet er det øverste plottet. Man ser også at responsen i den vertikale retningen er liten i forhold til den horisontale responsen, som kan forklares med at brotårnet er holdt fast i bunn for å motvirke vertikal bevegelse. På grunnlag av dette er ikke den vertikale retningen for brotårnet videre analysert i denne oppgaven for brotårnet.

4.3.2 Abaqus-modell

Elementmodellen som er benyttet i denne oppgaven er laget i programmet Abaqus av postdoktor J. Wang ved Universitetet i Stavanger. Dette delkapittelet forklarer hvordan modellen er bygd opp og hvilke antagelser som er gjort.

Bjelkeelementer (B31) er benyttet for å modellere brokassen, kabler og brotårn med gitte tverrsnittsegenskaper. Brokassen og hver hovedkabel består av 39 noder, og brokassen har en karakteristisk elementlengde på 12 m, hvor to av elementene på hver ende av brokassen er på 7 m. Fiktive masselementer er benyttet for å oppnå det korrekte polare treghetsmomentet for brokassen og for å gi de nedre tilkoblingspunktene for de vertikale hengerne.

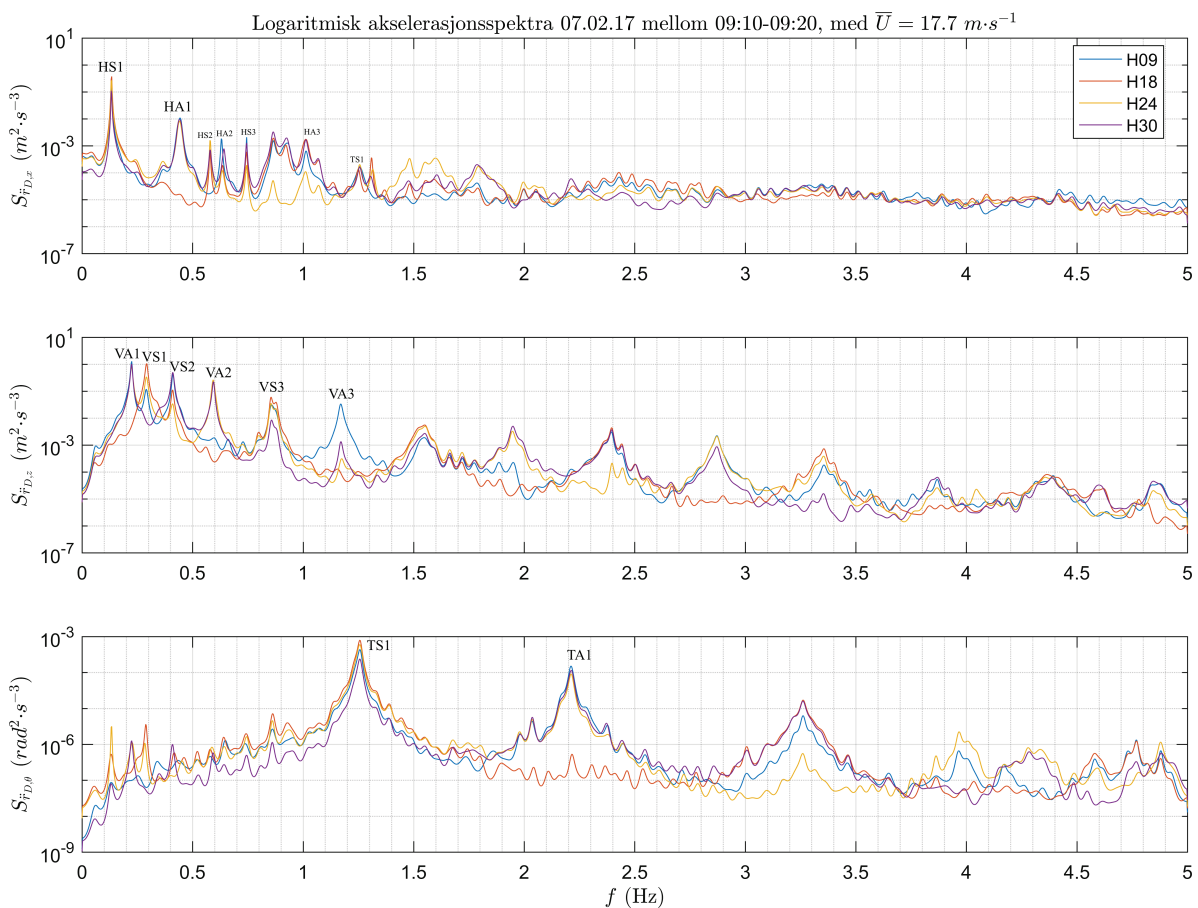
Grensebetingelsene for brotårnenes fundament og kabelfundamentene i fjell består alle av seks frihetsgrader som er fastholdt. Begge ender av brokassen er koblet til brotårnene slik at en av endene alltid kan bevege seg i broens lengderetning. Det er viktig å oppnå den korrekte statiske tilstanden til en hengebro før en dynamisk og modal analyse. I tillegg vesentlig å ta hensyn til de ikke-lineære egenskapene til hengerne, som kun kan holde på spenningskrefter. Disse egenskapene har derfor blitt vurdert i den numeriske modellering av broen [35].

For å kunne sammenlikne målte verdier med beregnede verdier i et plott er det i tilfellet for kraftig vind sammenliknet med en middelvindhastighet på 17.0 m/s. For tilfellet med svak vind var den laveste modellerte middelvindhastigheten 5.0 m/s. Derfor er sammenlikningen for svak vind kun benyttet for illustrasjon av noen like svingeformer som for kraftig vind.

4.3.3 Spektraltetthet

For beregning av spektraltetthet er Burgs metode benyttet, omtalt i kapittel 2.3.6. I MATLAB er derfor funksjonen «pburg» benyttet. Samplingsfrekvensen til akselerometrene er 10 Hz, som betyr at den korresponderende Nyquistfrekvensen er 5 Hz. For modellen laget i Abaqus er det benyttet en samplingsfrekvens på 20 Hz, som gir en Nyquistfrekvens på 10 Hz. Det er derfor satt en grense på 5 Hz, se vedlegg C for detaljer om rutine i MATLAB, for at en sammenlikning mellom modell, laget av postdoktor J. Wang i Abaqus, og virkelige målinger skal bli så klar som mulig.

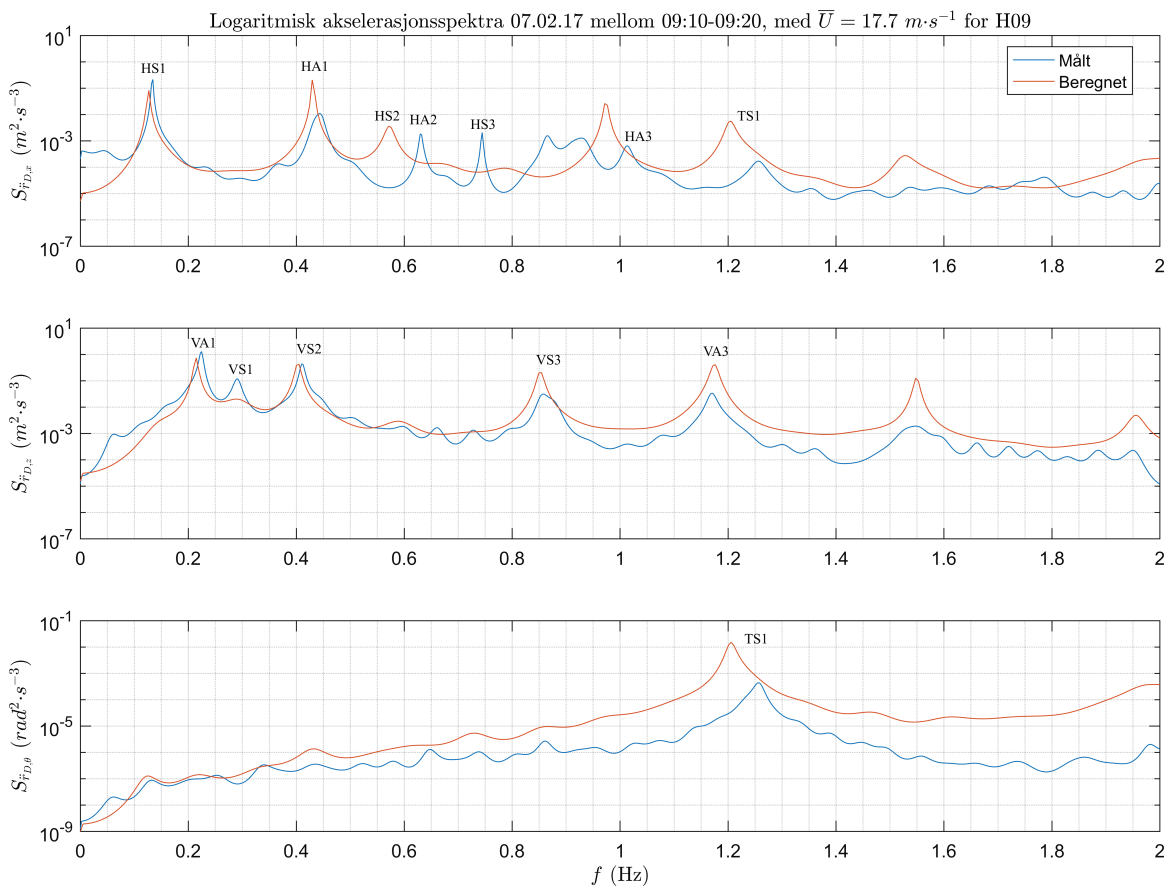
4.3.3.1 Brodekke



Figur 4.15 Akselerasjonsspektra for alle akselerometer-parene installert i brokassen med logaritmisk skala på y-aksen, 09:10-09:20 den 07.02.17, med $\bar{U} = 17.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. De ulike retningene som er vist (fra topp til bunn) er lateral (x), vertikal (z) og torsjon om langsgående akse (θ).

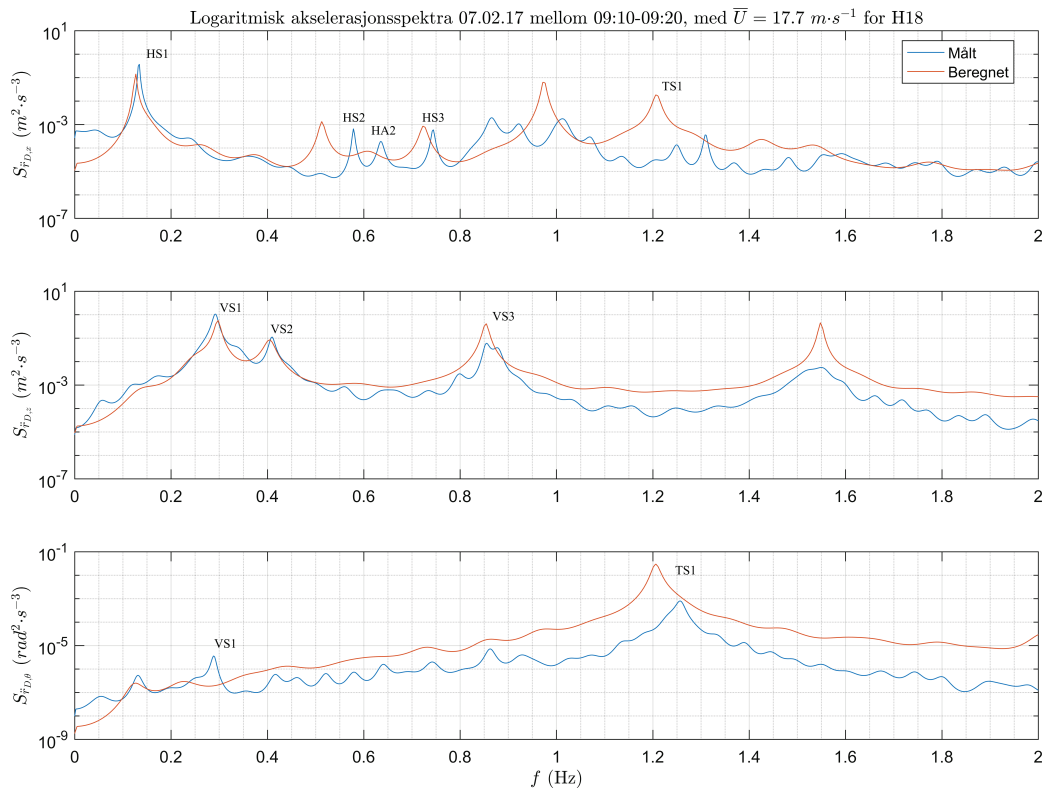
Fra figuren, se Figur 4.15, ser man den dynamiske responsen til brodekke i frekvensplan, for alle fire akselerometer-par hvor broen er utsatt for kraftig vind. I plottene er de ulike globale svingeformene tegnet inn med referanse til Tabell 3.3. Som nevnt i 3.2.2 om plassering av akselerometrene, vil man kunne se en respons fra rotasjonen om den laterale akse. Dette

bekreftes av figuren over, se Figur 4.15, der man ser at rundt 1.25 Hz (TS1), hvor spekteret for den laterale retningen også har en liten topp som nettopp er et bidrag fra torsjonen. Man ser også forventet resultat fra den laterale retningen (topp) der H09 registrerer alle de asymmetriske modene opp til 5 Hz, men ikke alle de symmetriske. Midt på broen registrerer akselerometer-paret (H18) alle de symmetriske modene opp til 5 Hz som antatt, men ikke alle de asymmetriske modene. I Figur 4.16 er det fokusert på akselerometer-paret nærmest det nordvestlige tårnet (H09) ved frekvenser mellom 0-2 Hz.

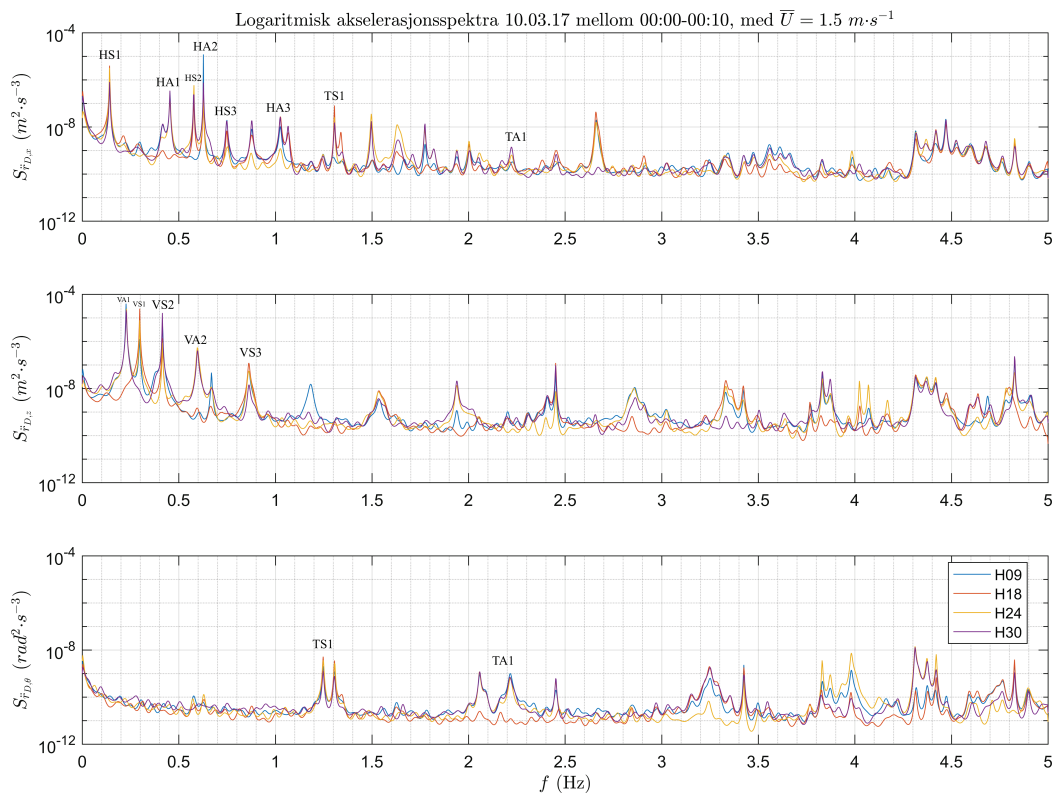


Figur 4.16 Akselerasjonsspektra for H09 nær det nordvestlige brotårnet med logaritmisk skala på y-aksen, 09:10-09:20 den 07.02.17, med $\bar{U} = 17.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ mellom 0-2 Hz. De ulike retningene som er vist (fra topp til bunn) er lateral (x) vertikal (z) og torsjon om langsgående akse (θ).

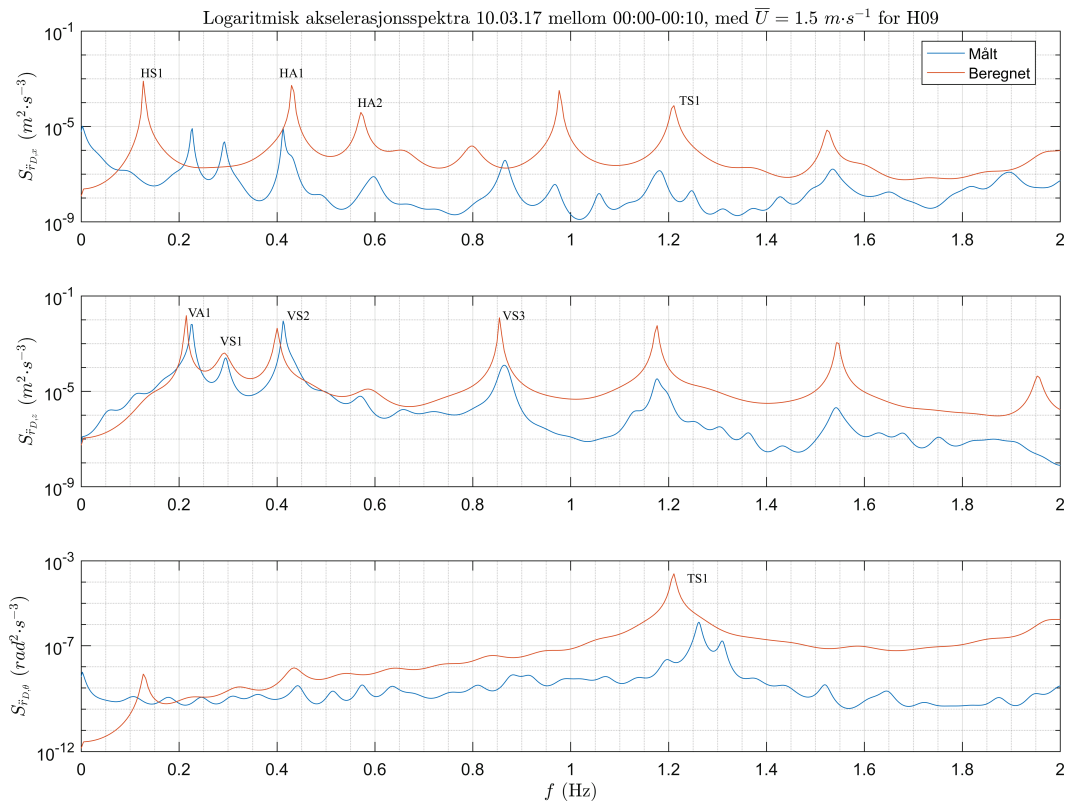
Man ser bidraget fra torsjonen på den laterale responsen mer tydelig i denne figuren, markert som TS1 i figurene. Fra Figur 4.16-17 er det en god samsvaring mellom målte verdier og beregnede verdier for responsspektra. I tillegg er det også vist samme frekvensintervall for akselerometer-paret nær midten av broen, se Figur 4.17. Resultater for svak vind er også presentert, se Figur 4.18-23. I likhet med dagen med kraftig vind, er responsen tilsvarende for svak vind, dog med betydeligere lavere størrelse på responsen.



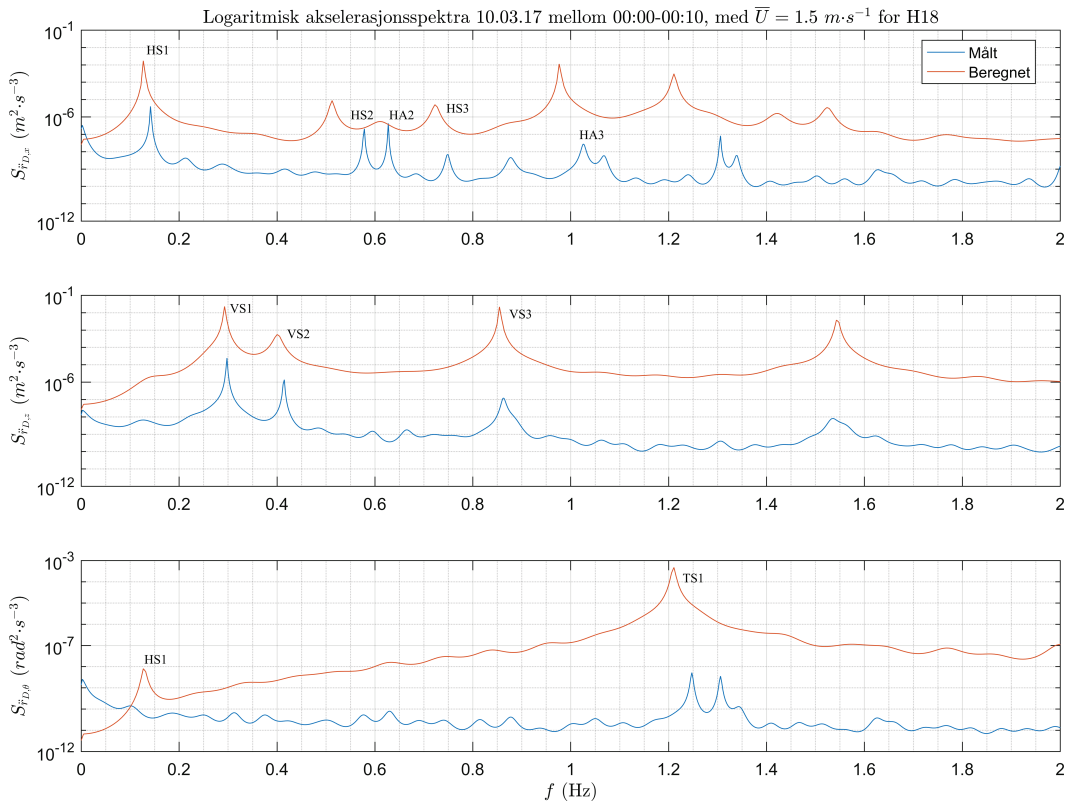
Figur 4.17 Akselerasjonsspektra for H18 nær midten av broen med logaritmisk skala på y-aksen, 09:10-09:20 den 07.02.17, med $\bar{U} = 17.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ mellom 0-2 Hz. De ulike retningene som er vist (fra topp til bunn) er lateral (x) vertikal (z) og torsjon om langsgående akse (θ).



Figur 4.18 Akselerasjonsspektra for alle akselerometer-parene installert i brokassen med logaritmisk skala på y-aksen, 00:00-00:10 den 10.03.17, med $\bar{U} = 1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. De ulike retningene som er vist (fra topp til bunn) er lateral (x), vertikal (z) og torsjon om langsgående akse (θ).



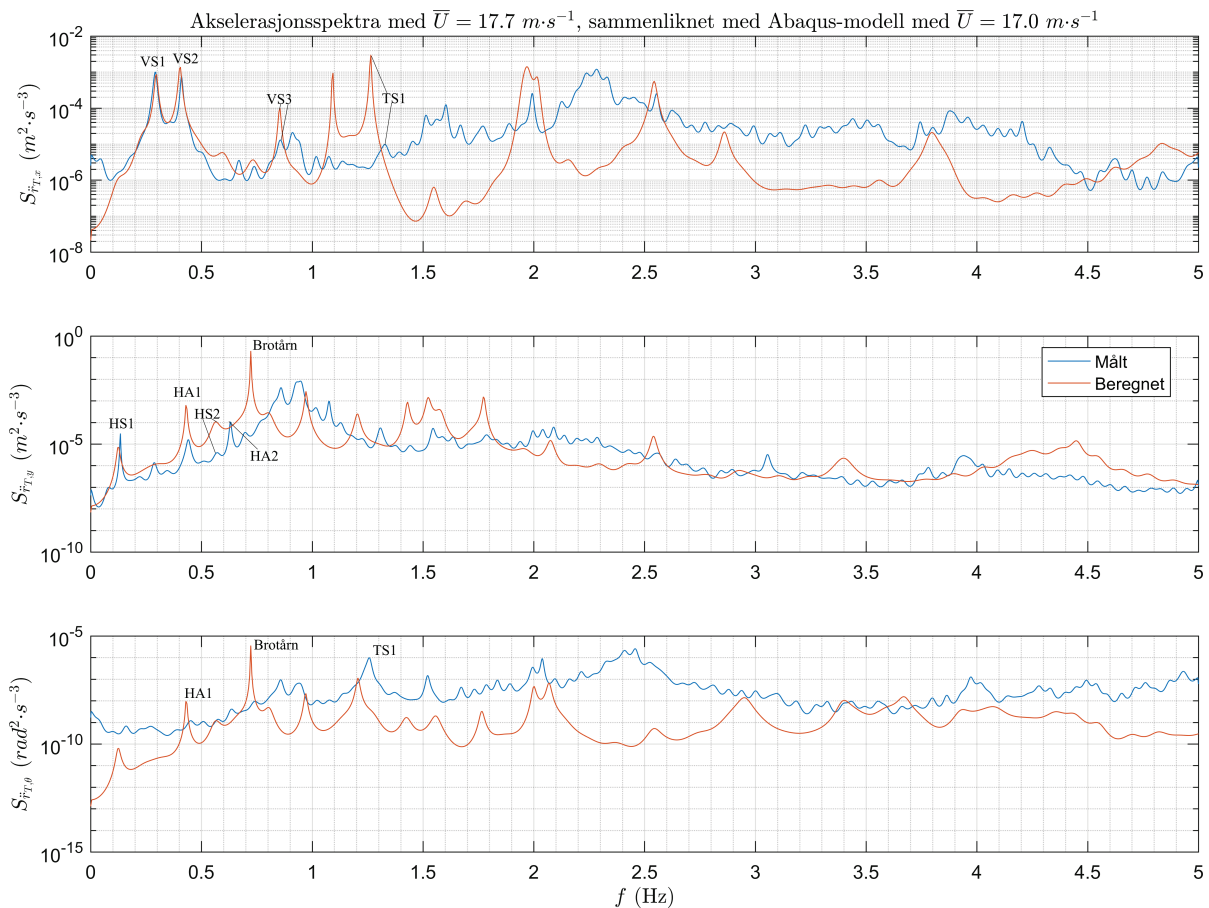
Figur 4.19 Akselerasjonsspektra for H09 nær det nordvestlige brotårnet med logaritmisk skala på y-aksen, 00:00-00:10 den 10.03.17, med $\bar{U} = 1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ mellom 0-2 Hz. De ulike retningene som er vist (fra topp til bunn) er lateral (x) vertikal (z) og torsjon om langsgående akse (θ).



Figur 4.20 Akselerasjonsspektra for H18 nær midten av broen med logaritmisk skala på y-aksen, 00:00-00:10 den 10.03.17, med $\bar{U} = 1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ mellom 0-2 Hz. De ulike retningene som er vist (fra topp til bunn) er lateral (x) vertikal (z) og torsjon om langsgående akse (θ).

4.3.3.2 Brotårn

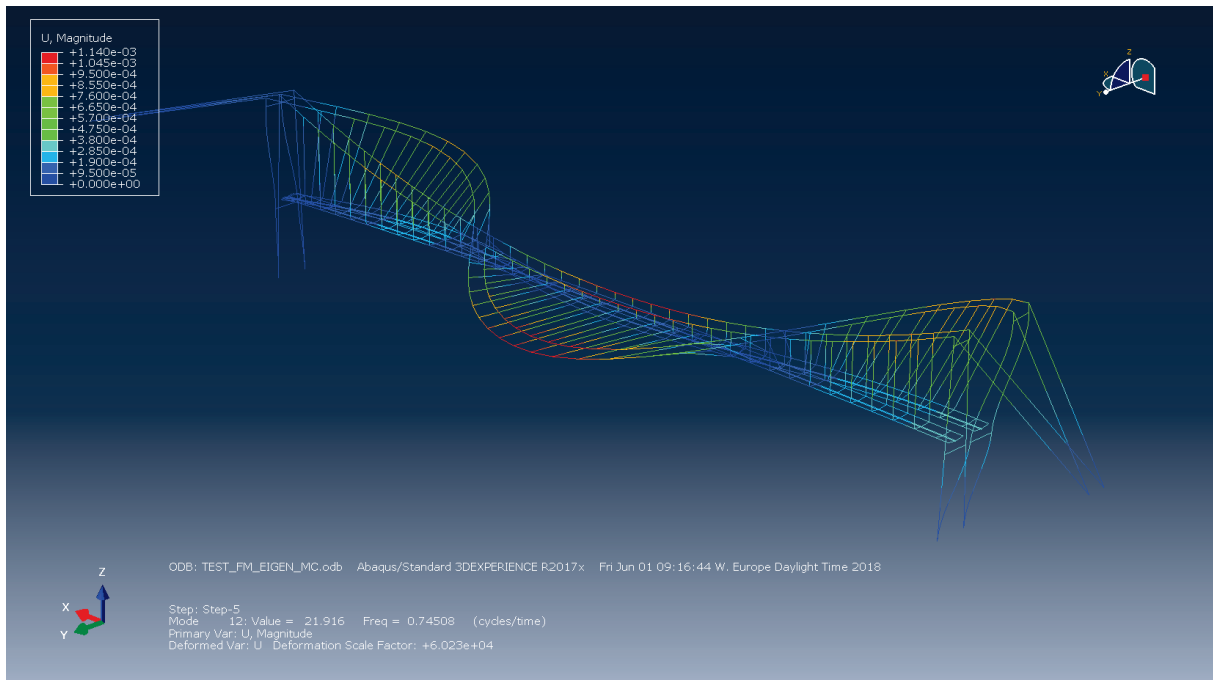
Som nevnt tidligere er ikke den vertikale retningen analysert videre fordi brotårnet er betydelig stivere. I plottene er det vist et responspektrum for modellen, laget av postdoktor J. Wang i elementprogrammet Abaqus, som man ser har noen av de samme toppene som responspektret for målingene.



Figur 4.21 Akselerasjonsspektra for akselerometer-paret installert i brotårnet med logaritmisk skala på y-aksen, 09:10-09:20 den 07.02.17, med $\bar{U} = 17.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. De ulike retningene som er vist (fra topp til bunn) er langsgående med brobanen (x), lateral (y) og torsjon om langsgående akse (θ).

Man ser allerede fra Figur 4.21 at de vertikale svingeformene er registrert for den langsgående retningen for brotårnet basert på verdiene i Tabell 3.3 og i resultatene fra brodekket.

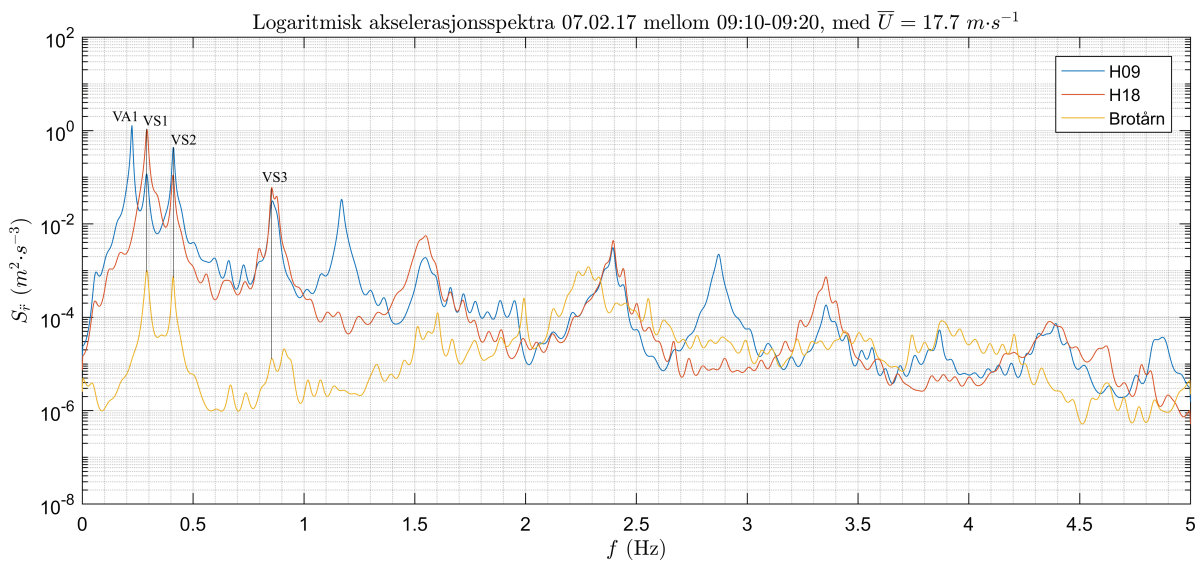
Responsen stemmer greit overens med responsen modellert i Abaqus, gitt at modellen ganske forenklet. Dette betyr at frekvensene rundt 1.25 Hz (TS1) egentlig skulle, til en viss grad, samsvart med frekvensene for målingene rundt 0.85 Hz (VS3) på grunn av akselerometrenes plassering i forhold til skjærsenter i brokassen. Fra modellen i Abaqus ser man at brotårnets egen svingeform er 0.745 Hz. Denne svingeformen er vist i Figur 4.22 nedenfor.



Figur 4.22 Lateral svingeform for det nordvestlige brotårnet, her til høyre i figuren. Laget av postdoktor J. Wang i Abaqus.

I en tidligere studie utført av Y. L. Xu et al. [36] på Tsing-Ma hengebroen var den resulterende første svingeformen for tilsvarende retning på rundt 0.524 Hz (i fase) og 0.541 Hz (ut-av-fase). I fase betyr at kablene svinger i takt hverandre, mens ut-av-fase betyr at kablene svinger uavhengig av hverandre. Hengebroen som var studert har et hovedspenn på 1337 m og brotårnene er omtrent 200 m høye. Egenfrekvensene for broene er plausible når man sammenlikner broene, da egenfrekvensen for brotårn med kabelsystem på Tsing-Ma hengebroen er omtrent 70 % av det nordvestlige brotårnet på Lysefjordbrua. Lysefjordbrua er av mindre skala med sine 446 m på hovedspenn og 102 m høye brotårn, som betyr at egenfrekvensene vil være, som vist ved denne sammenlikningen, høyere enn for Tsing-Ma hengebroen fordi større konstruksjoner har en større svingeperiode.

4.3.4 Sammenheng mellom brotårn og brodekke

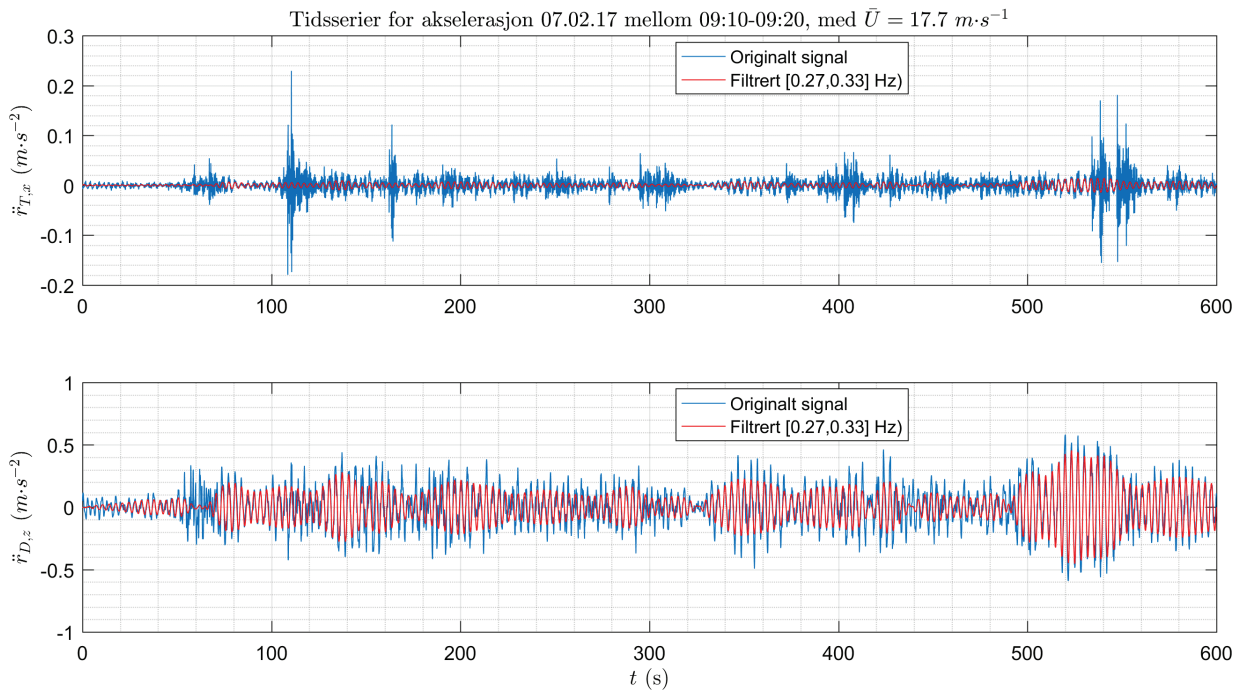


Figur 4.23 Sammenlikning av akselerasjonsspektra for brotårnet i broens lengderetning og brodekkets vertikale respons (ved H09 og H18) med logaritmisk skala på y-aksen, 09:10-09:20 den 07.02.17, med $\bar{U} = 17.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

I tillegg til resultatet som ble presentert i Figur 4.21 i forrige delkapittel, ser man enda mer tydelig i Figur 4.23 at det er en sammenheng mellom den vertikale responsen til brodekket og den langsgående responsen til brotårnet. Det er hovedsakelig de vertikale symmetriske svingeformene som overføres fra brodekket og til brotårnet.

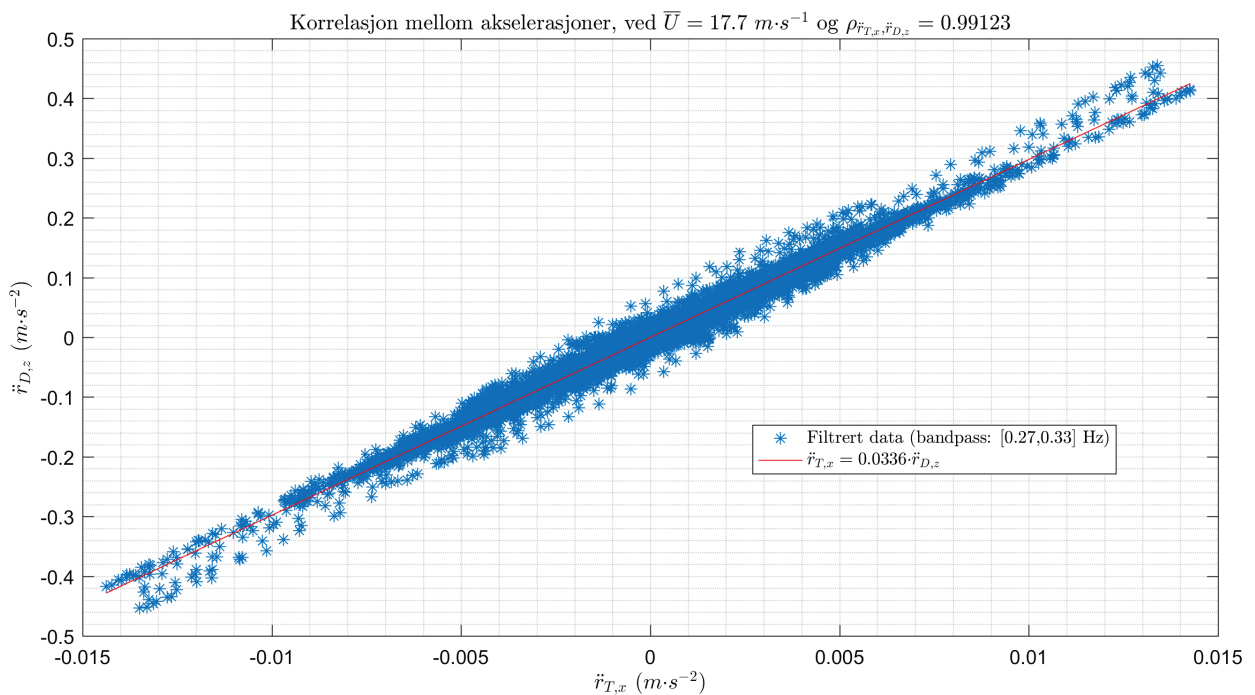
Med utgangspunkt i responspektra ser man at for rundt 0.3 Hz (VS1), 0.4 Hz (VS2) og 0.85 (VS3) Hz at brotårnets respons i broens lengderetning har samme topper som for den vertikale responsen til brodekket. Se vedlegg B for figurer av alle tre svingeformene.

For å undersøke dette nærmere, er signalene, altså akselerasjonene, rundt disse frekvensene båndpassfiltrert med et såkalt «FIR1-filter», se vedlegg C for rutine i MATLAB. Dette filteret fjerner unødvendig støy og fokuserer på området rundt angitt normalisert frekvens.

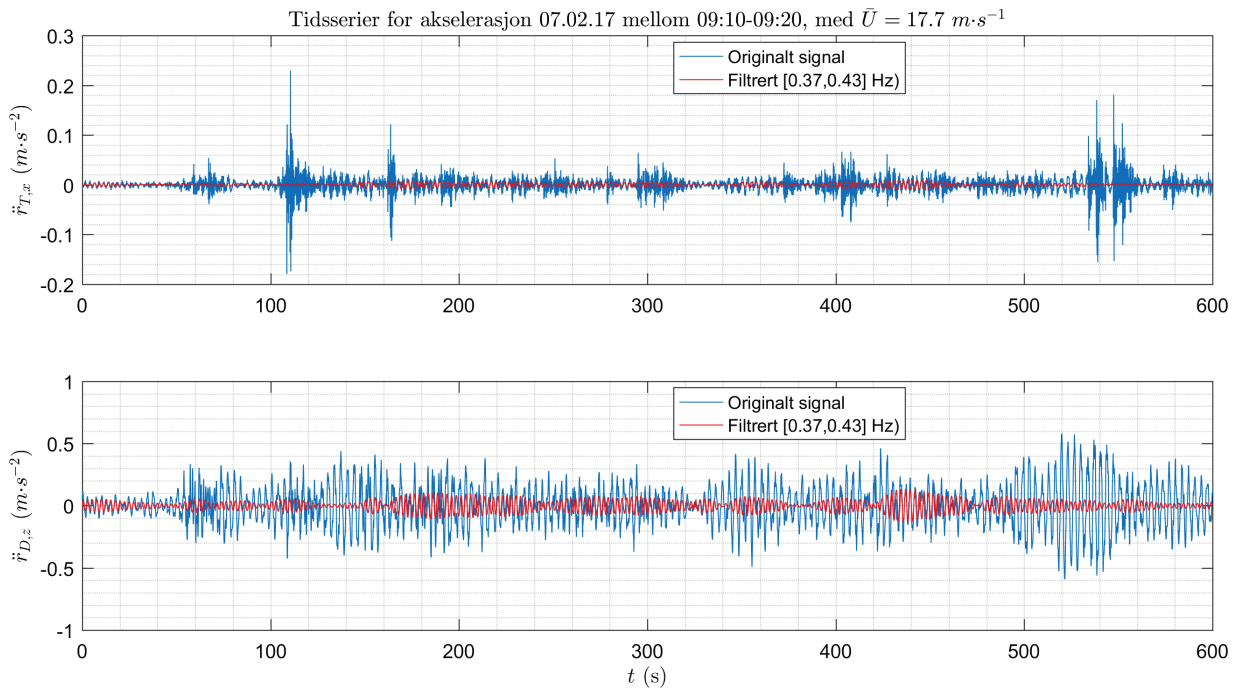


Figur 4.24 Tidsserier; sammenlikning mellom filtrert og opprinnelig respons for brotårnet i broens lengderetning og brodekkets vertikale retning (H18), for VS1 ved 09:10-09:20 den 07.02.17, med $\bar{U} = 17.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

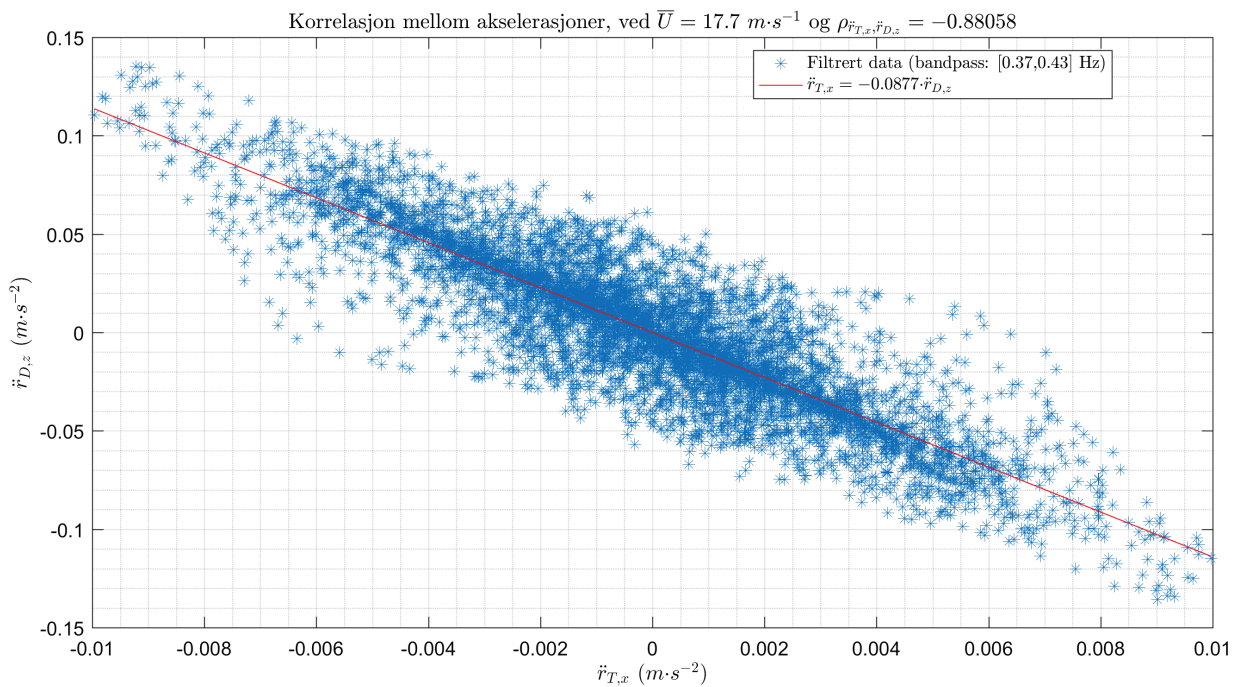
Det er presentert tidsserier som viser opprinnelig signal og filtrert signal for angitt frekvensintervall. I tillegg er også akselerasjonene plottet mot hverandre i et spredningsplott slik at man kan se den lineære sammenhengen og korrelasjonen mellom responsene, se Figur 4.24-32.



Figur 4.25 Filtrert signal for VS1 for brodekkets vertikale respons (H18) og brotårnets respons i lengderetningen, ved 09:10-09:20 den 07.02.17, med $\bar{U} = 17.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

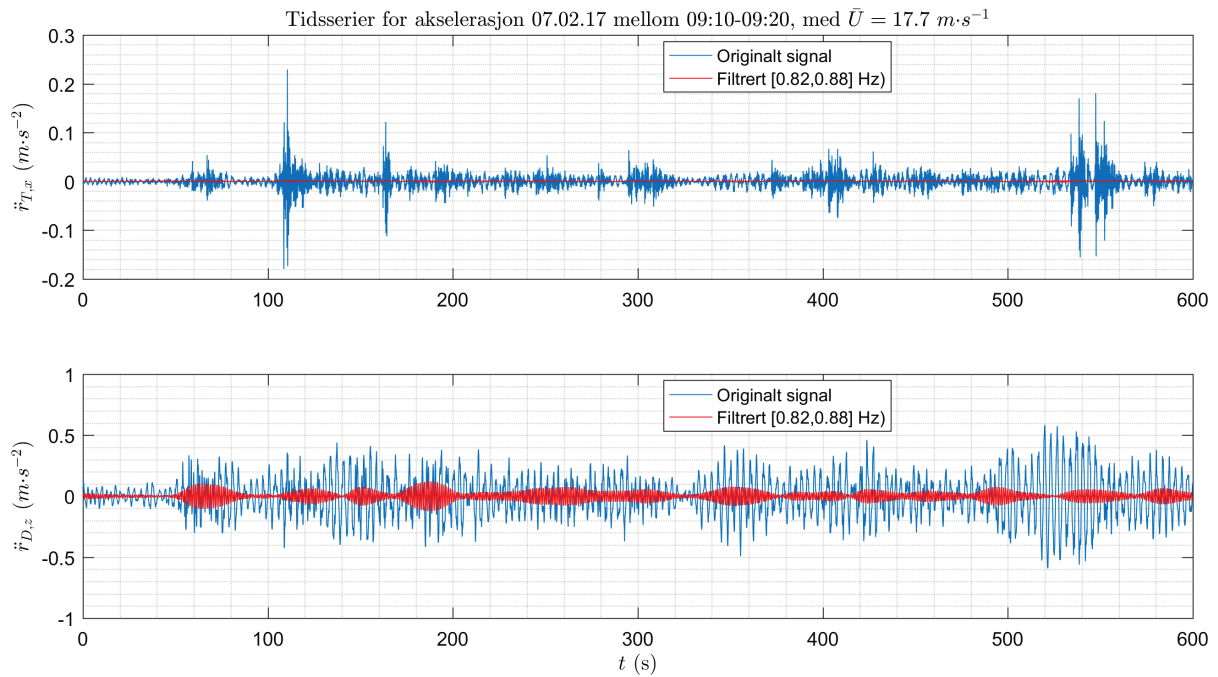


Figur 4.26 Tidsserier; sammenlikning mellom filtrert og opprinnelig respons for brotårnet i broens lengderetning og brodekkets vertikale retning (H18), for VS2 ved 09:10-09:20 den 07.02.17, med $\bar{U} = 17.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.



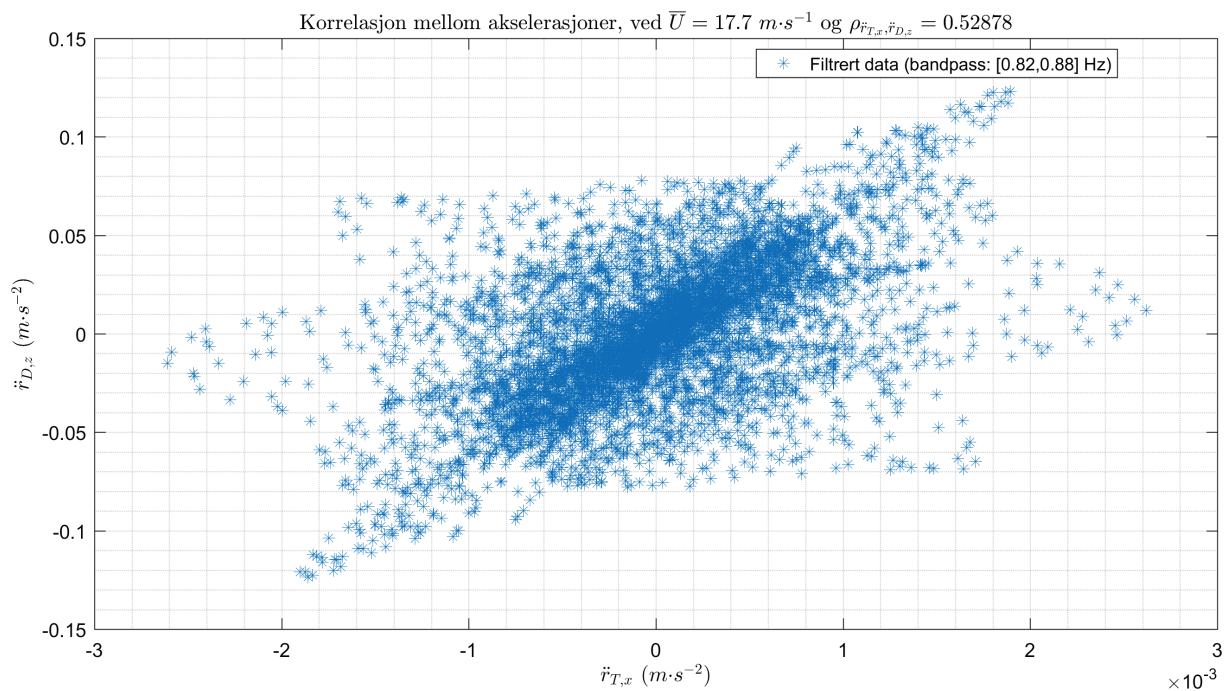
Figur 4.27 Filtrert signal for VS2 for brodekkets vertikale respons (H18) og brotårnets respons i broens lengderetning, ved 09:10-09:20 den 07.02.17, med $\bar{U} = 17.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Fra figurene ser man at korrelasjonen er størst for responsen med frekvensen rundt 0.3 Hz, men noe mindre rundt 0.4 Hz. Fortegnet til korrelasjonskoeffisienten sier noe om hvordan brodekke beveger seg i forhold til brotårnet. Dette betyr at hvis brodekket beveger seg nedover (positiv lokal z-retning), beveger brotårnet seg mot sørøstlig retning langs med broen (positiv lokal x-retning).



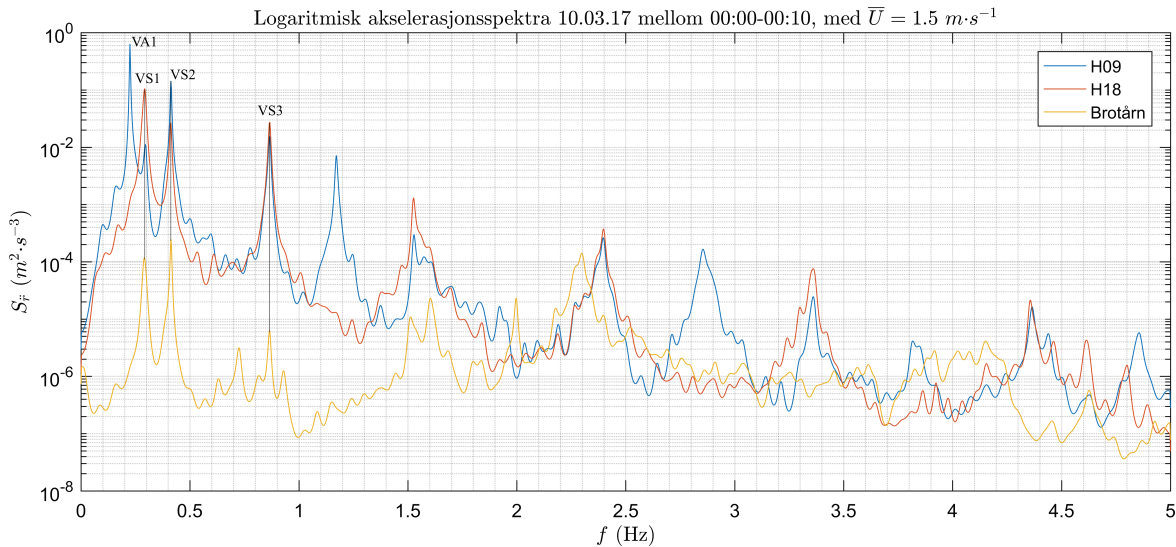
Figur 4.28 Tidsserier; sammenlikning mellom filtrert og opprinnelig respons for brotårnet i broens lengderetning og brodekkets vertikale retning (H18), for VS3 ved 09:10-09:20 den 07.02.17, med $\bar{U} = 17.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

For 2. symmetriske svingeform (VS2) ved 0.4 Hz ser man at korrelasjonskoeffisienten er negativ som betyr at brodekkets bevegelse er motsatt av brotårnets bevegelse som er plausibelt for denne svingeformen [12]. I tillegg er også 3. symmetriske svingeform (VS3) ved 0.85 Hz også vist i Figur 4.29.



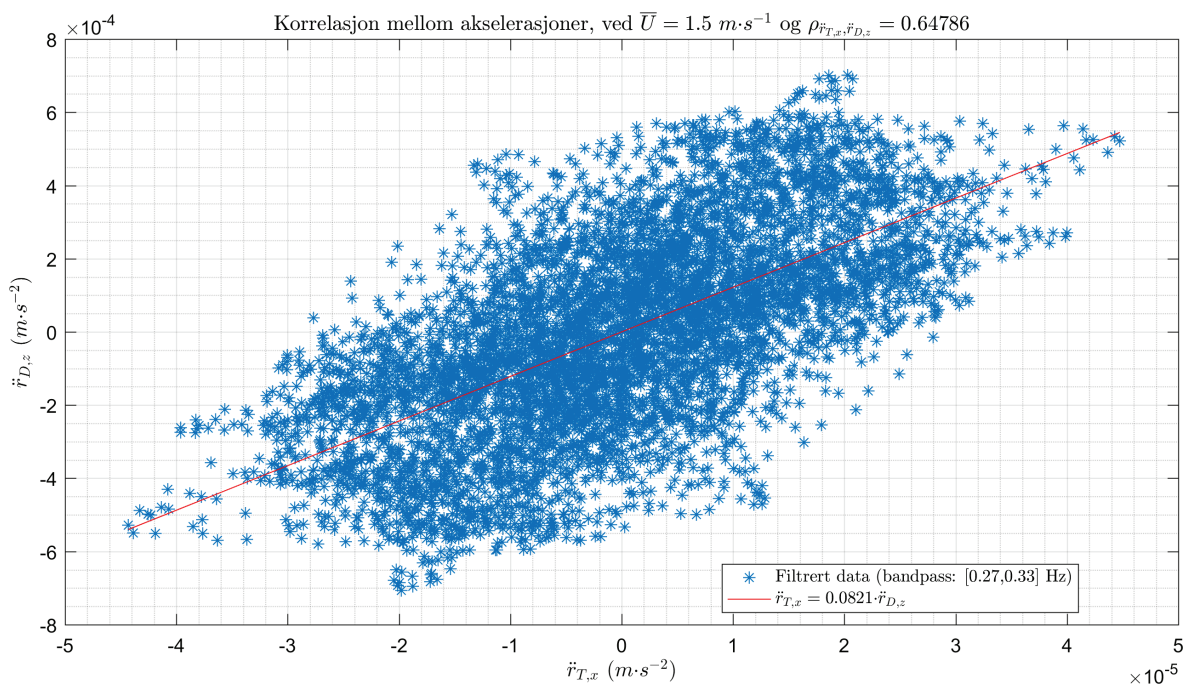
Figur 4.29 Filtrert signal for VS3 for brodekkets vertikale respons (H18) og brotårnets respons i broens lengderetning, ved 09:10-09:20 den 07.02.17, med $\bar{U} = 17.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Det er også presentert responspektrum for svak vind, se Figur 4.30. Også her ser man sammenhengen mellom brodekkets vertikale respons og brotårnets respons i lengderetningen av broen.

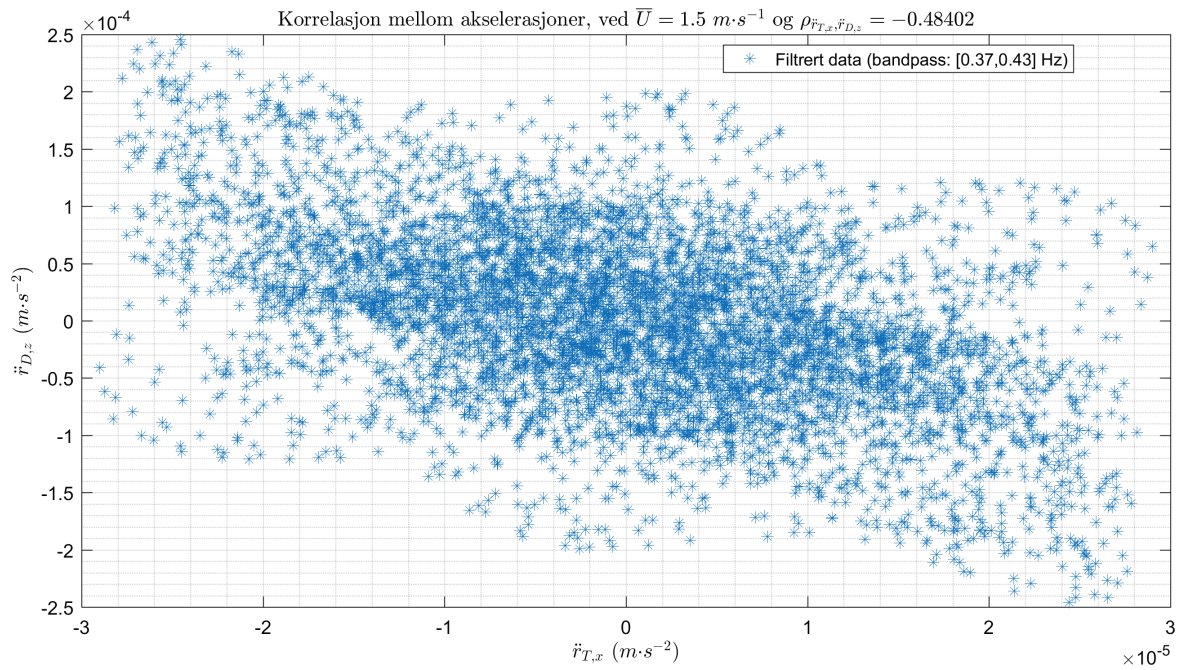


Figur 4.30 Sammenlikning av akselerasjonsspektra for brotårnet i broens lengderetning og brodekkets vertikale respons (ved H09 og H18) med logaritmisk skala på y-aksen, 00:00-00:10 den 10.03.17, med $\bar{U} = 1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

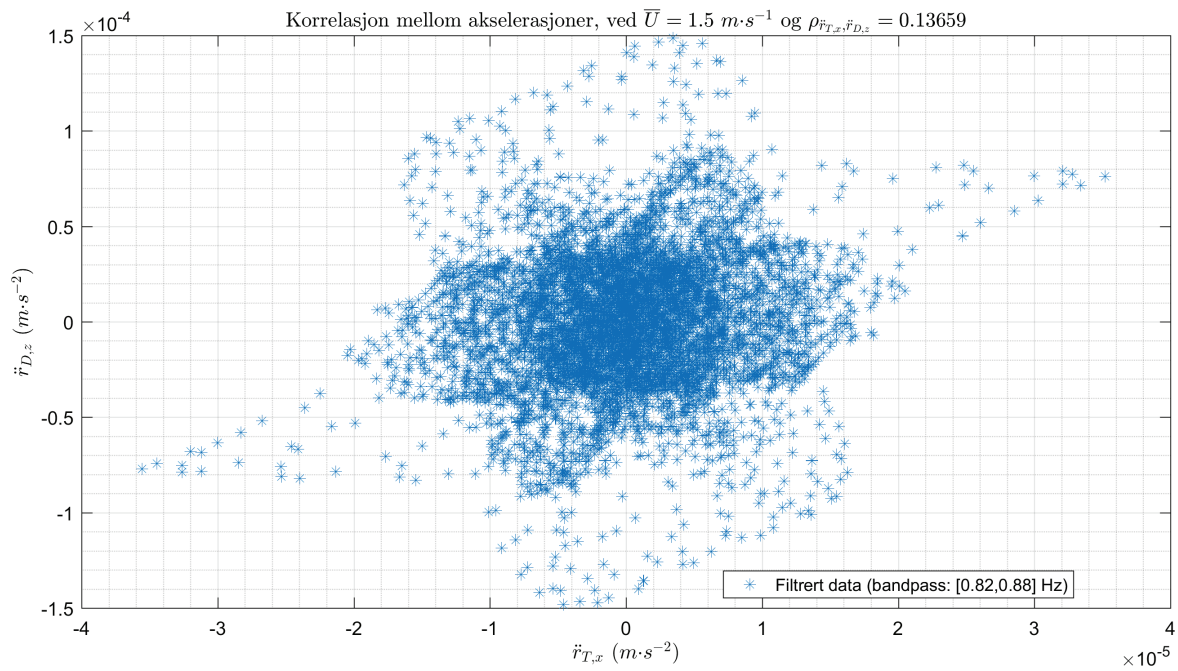
I likhet med tilfellet for kraftig vind er det en positiv korrelasjon mellom bevegelsen til brodekke i den vertikale retningen, og brotårnets bevegelse langsgående med broen for den første svingeform (VS1). Fra Figur 4.31 ser man at korrelasjonen er ikke like høy, da det ikke er like mye bevegelse på grunn av lite vind.



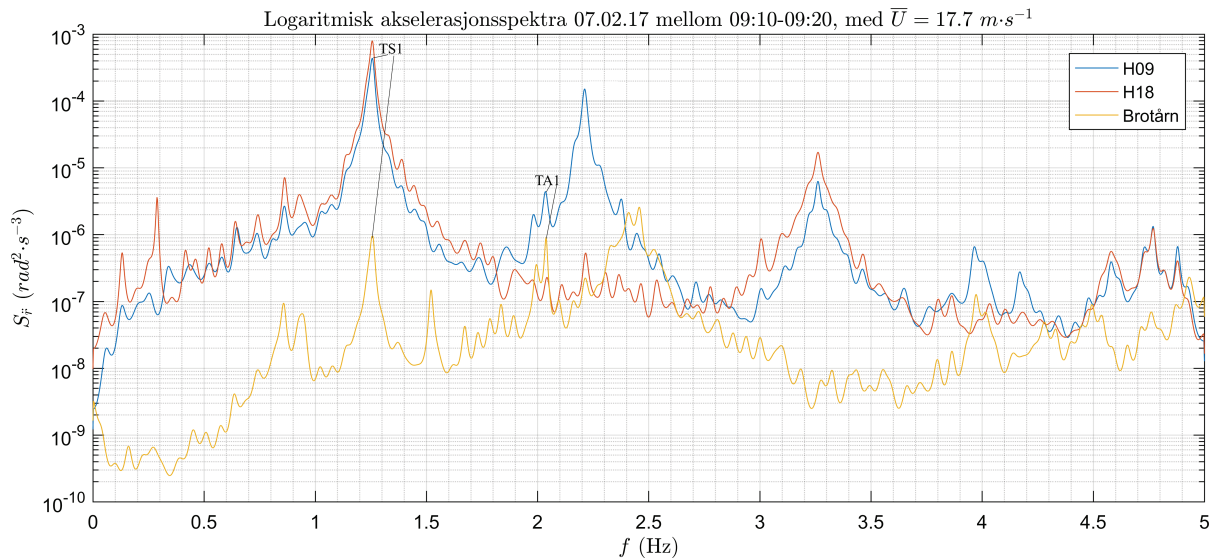
Figur 4.31 Filtret signal for VS1 for brodekkets vertikale respons (H18) og brotårnets respons i broens lengderetning, ved 00:00-00:10 den 10.03.17, med $\bar{U} = 1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.



Figur 4.32 Filtret signal for VS2 for brodekkets vertikale respons (H18) og brotårnets respons i broens lengderetning, ved 00:00-00:10 den 10.03.17, med $\bar{U} = 1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

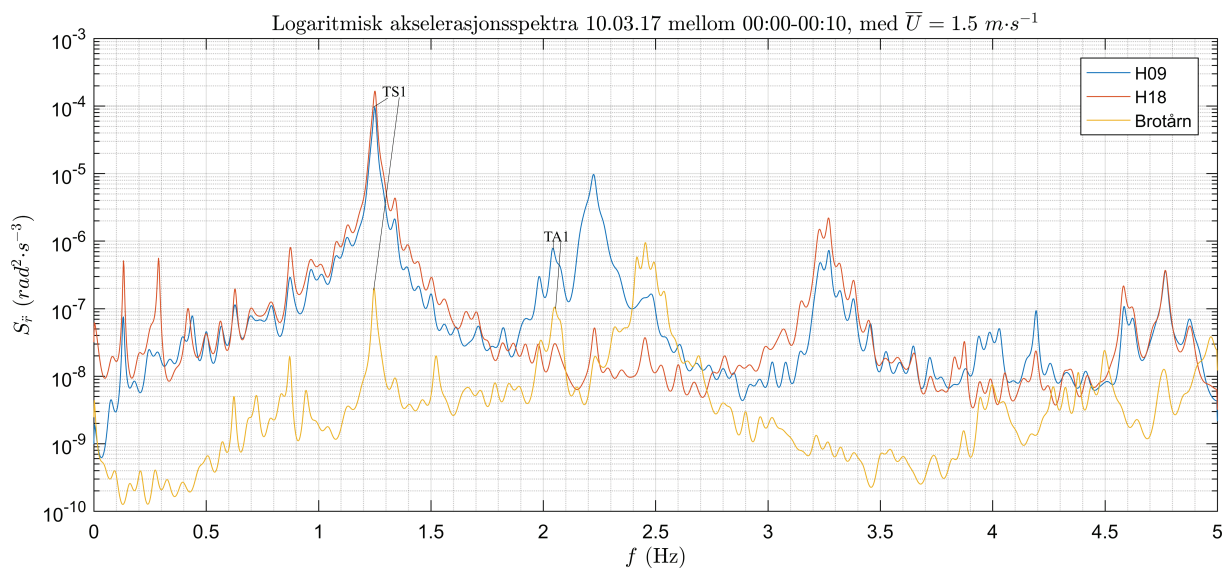


Figur 4.33 Filtret signal for VS3 for brodekkets vertikale respons og brotårnets respons i broens lengderetning, ved 00:00-00:10 den 10.03.17, med $\bar{U} = 1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.



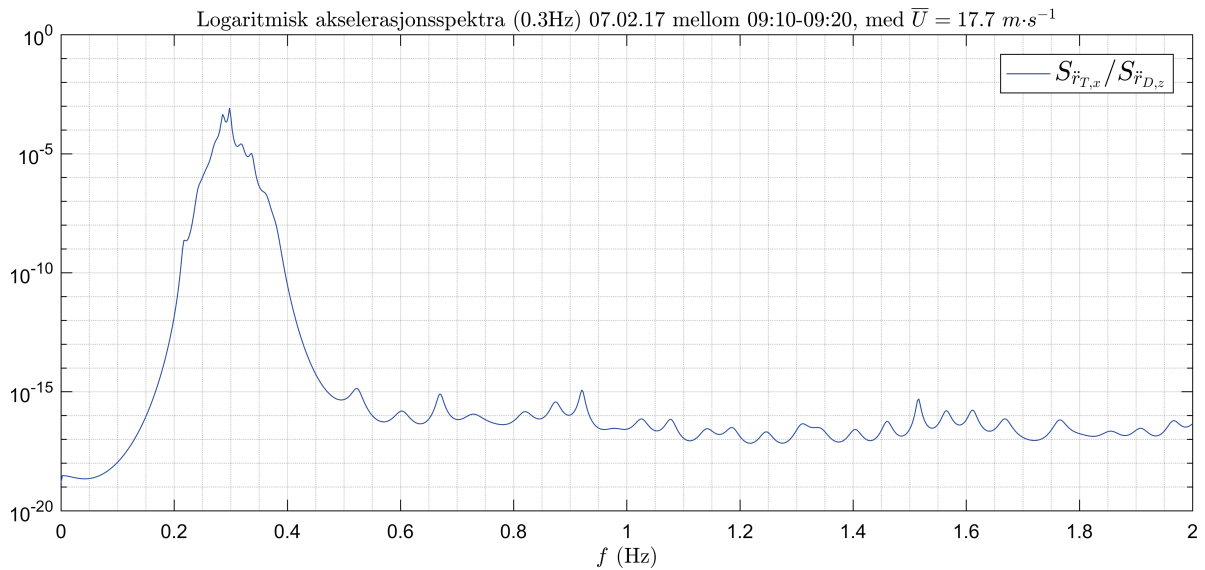
Figur 4.34 Sammenlikning av akselerasjonsspektra for brotårnet (torsjon om broens langsgående retning) og brodekke (torsjon om langsgående akse, ved H09 og H18) med logaritmisk skala på y-aksen, 09:10-09:20 den 07.02.17, med $\bar{U} = 17.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

For torsjonsresponsen ser man også at brotårnet også har både symmetrisk og asymmetrisk svingeform.



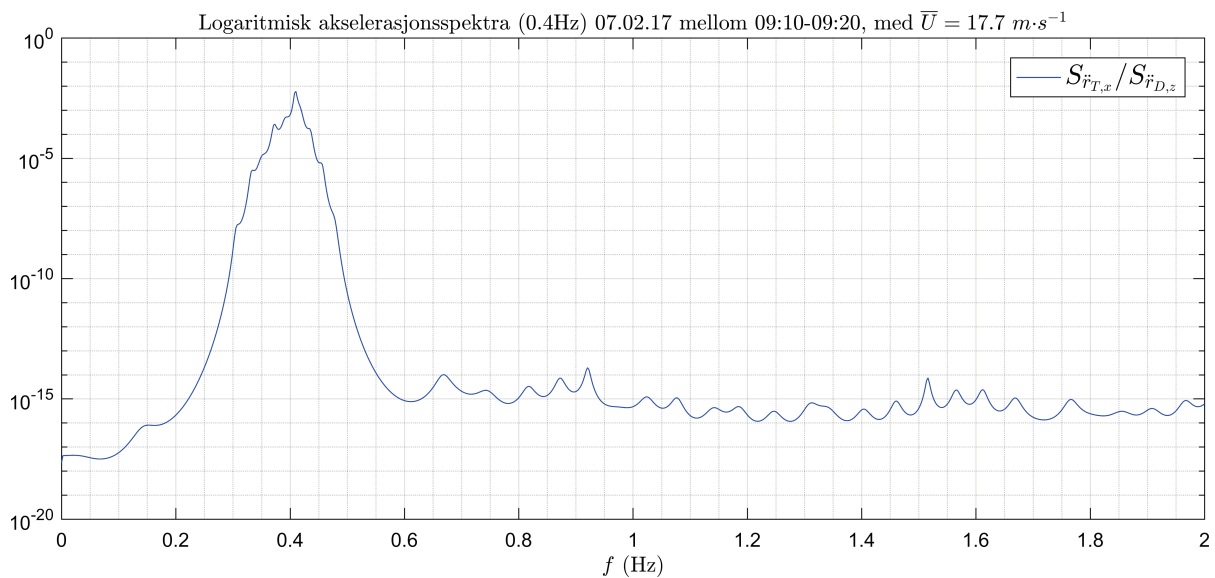
Figur 4.35 Sammenlikning av akselerasjonsspektra for brotårnet (torsjon om broens langsgående akse) og brodekke (torsjon om broens langsgående akse, ved H09 og H18) med logaritmisk skala på y-aksen, 00:00-00:10 den 10.03.17, med $\bar{U} = 1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Siden torsjonsresponsen er så lav er ikke korrelasjon for torsjon videre analysert i denne oppgaven. Man ser tydelig sammenheng ved toppene rundt den første torsjonssvingeformen (TS1), og man vet at de største responsene kommer fra den vertikale retningen til brodekket og brotårnet i broens lengderetning.

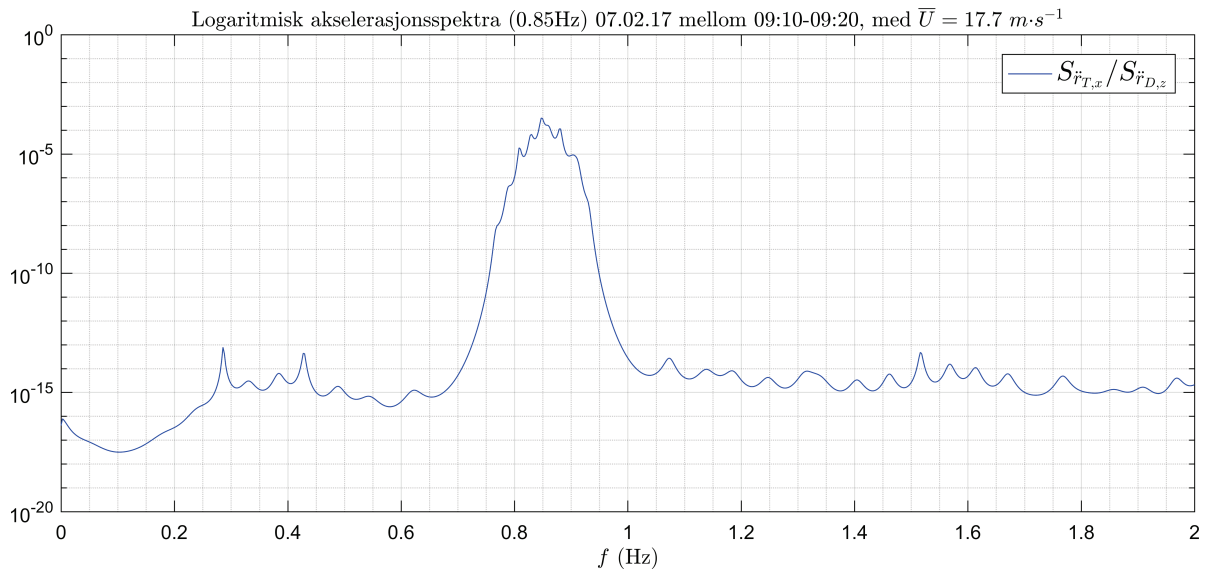


Figur 4.36 Filtrert responspektrum for VS1, med $\bar{U} = 17.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Forholdet mellom de filtrerte spektraene for kraftig vind, dvs. responspektrumet for brotårnet i broens lengderetning og brodekkets vertikale respons (H18), er presentert i Figur 4.36-38. Frekvensen ved toppunktet tilsvarer egenfrekvensen for aktuell svingeform, og verdien på y-aksen tilsvarer forholdet mellom kvadrert verdi for amplitude. Dermed er denne verdien benyttet i utarbeidelsen av en lineær relasjon mellom responsene.



Figur 4.37 Filtrert responspektrum for VS2, med $\bar{U} = 17.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.



Figur 4.38 Filtret responspektrum for VS3, med $\bar{U} = 17.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Resultatene fra beregningen av den lineære sammenhengen mellom responsene er vist i Tabell 4.1 nedenfor.

Tabell 4.1 Sammenlikning av lineær sammenheng mellom brodekkets og brotårnets respons, med målte data ($\bar{U} = 17.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) og Abaqus-modell.

	$\ddot{r}_{T,x}/\ddot{r}_{D,z}$	$\sqrt{S_{\ddot{r}_{T,x}}/S_{\ddot{r}_{D,z}}}$	$\ddot{r}_{T,x}/\ddot{r}_{D,z}$
Svingeform	Målt («polyfit»)	Målt (grafisk)	Beregnet (Abaqus)
VS1	0.0336	0.02872	0.0120
VS2	-0.0877	-0.07113	-0.0187
VS3	0.0346	0.01795	0.0289

Fra Tabell 4.1 ser man relasjonen mellom brotårnets respons i broens lengderetning og brodekkets respons i den vertikale retningen ved forskjellige beregningsmetoder. Den første metoden baserer seg på en lineær interpolasjonsmetode som skaper en linearitet mellom måledataene med funksjonen «polyfit» i MATLAB, se vedlegg C, som vist i figurene hvor responsene er plottet mot hverandre i et spredningsplott. Den andre metoden baserer seg på responsspektraene der forholdet mellom amplitudene ved responsene er analysert grafisk. Det er så tatt kvadratroten av dette forholdet som impliserer forholdet mellom responsene. Den siste metoden baserer seg på egenfrekvensene basert på forskyvningene beregnet i Abaqus. Beregningen av relasjonen mellom responsene er gjort ved at funksjonen «iomega», se vedlegg C for rutine, i MATLAB er brukt for å transformere forskyvningene til

akselerasjoner. I modellen er den langsgående retningen for brobanen i motsatt retning av akselerometrene i brotårnet som er tatt hensyn til i beregningene her. Som man kunne antyde fra resultatene presentert tidligere samsvarer relasjonen for den første svingeformen best i forhold til modellen laget i Abaqus. Dette er svingeformen med høyest korrelasjon mellom responsene, så dette er plausibelt.

5 Konklusjon

I denne oppgaven er det sett på sammenhengen mellom brotårnets respons i lengderetningen av hengebroen og brodekkets vertikale respons som resultat av svingninger på grunn av turbulens, som er originalt for denne oppgaven. I forhold til framgangsmåte for å sammenlikne responsene fant man ut at den beste metoden for å gjøre denne analysen var gjennom spektraltetthet og broens globale svingformer. Broens egenfrekvenser er tidligere analysert i diverse elementprogram, hvor denne oppgaven baserte seg på verdiene som ble vist i Tabell 3.3. Dette var egenfrekvenser som kun angikk brodekke, så ved hjelp av elementmodellen i Abaqus, laget av postdoktor J. Wang, utarbeidet man egenfrekvensene og svingformene til det nordvestlige brotårnet.

Man fant også ut at turbulensintensiteten stemmer nokså godt overens med teorien om at intensiteten avtar med økende middelvindhastigheter. Det vil si at vinden er mer stabil for høyere vindhastigheter enn for lavere vindhastigheter, som også er en grunn til at responsresultatene for tilfellet med svak vind er mer turbulent og resulterte i lavere korrelasjon.

På bakgrunn av funnene som er gjort i resultatene, er det en reell sammenheng mellom brodekkets vertikale respons og brotårnets respons i den langsgående retningen. Spesielt var alle de vertikale symmetriske svingformene for brodekke også tilstede i spektraene i brotårnets langsgående retning, som var vesentlig for denne konklusjonen. Mer spesielt viste resultatene at responsen til brotårnet var på omtrent 3 % av brodekkets respons ved kraftig vind, som er ganske plausibelt.

5.1 Videre studier

Det er også interessant med en analyse av svingformene som funksjon av middelvindhastigheten, da det i denne oppgaven det kun er fokusert på to 10 minutters intervaller med kraftig vind og svak vind. Samtidig er det også vesentlig å studere alle fire seksjoner ved brodekket i forhold til responsen til broen, da man i hovedsak studerte kun to av seksjonene i denne oppgaven (H09 og H18).

I forhold til vind, kan det også være interessant å studere vindens retning på broen og dekomponere vinden inn i broens koordinatsystem. Dermed kunne man studert responsen som en funksjon av vindens angrepsvinkel (α) og/eller «yaw angle» (β) på broen.

Referanser

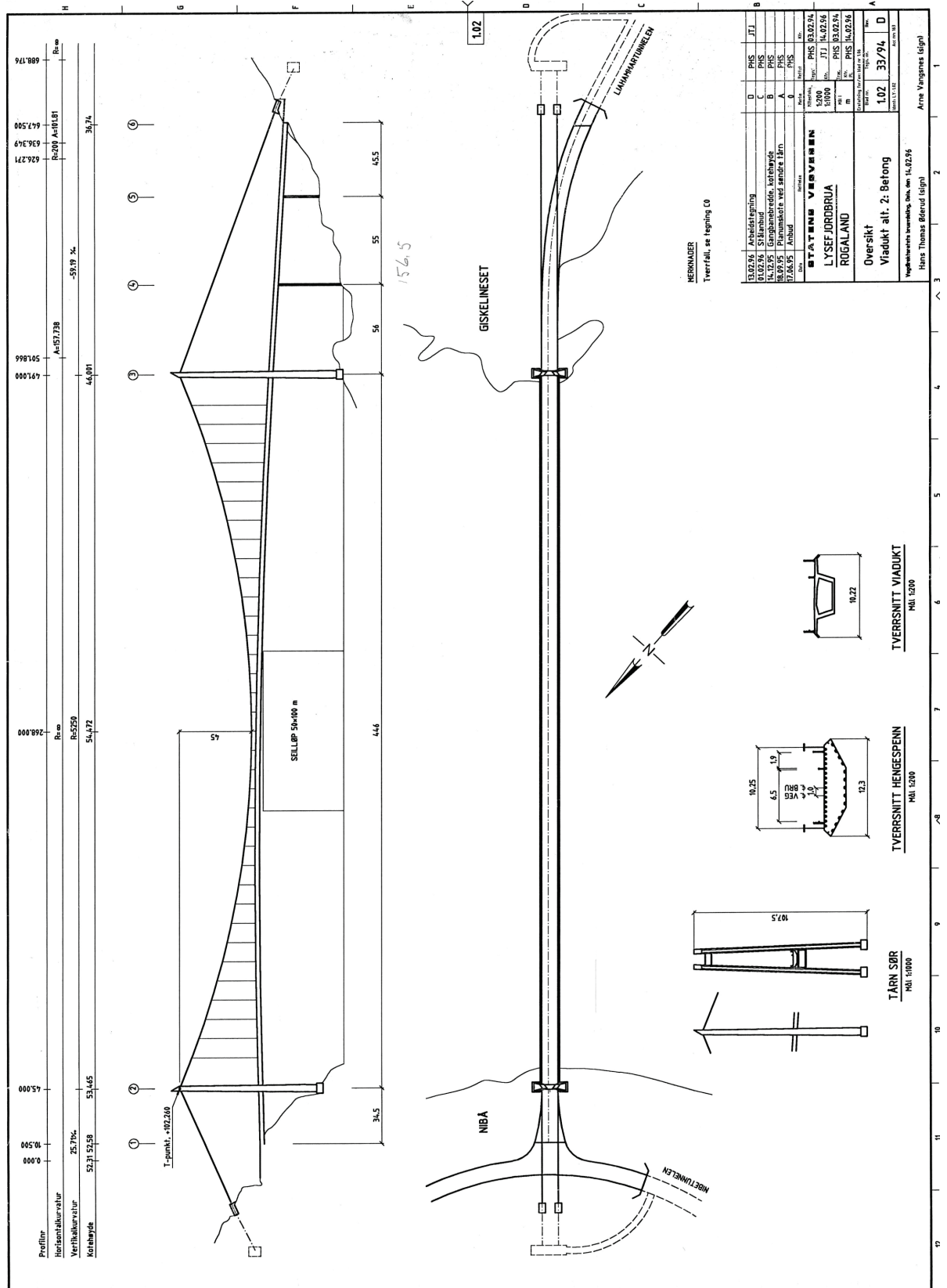
- [1] 2018. *Broer i Norge* [Online]. Hentet fra: <http://broer.no/liste/norge/spenn>. Lastet ned: 16.04.2018.
- [2] Statens vegvesen, "Konsekvensutredning for Rv13 Ryfylkeforbindelsen," Stavanger, SVV 02/2001, 2001. [Online]. Hentet fra: https://www.vegvesen.no/_attachment/63615/binary/19577, Lastet ned: 23.01.2018.
- [3] 2018. *Oversiktsbilde over Ryfylke* [Bilde]. Hentet fra: <http://kart.ssb.no/>. Lastet ned: 30.01.2018.
- [4] Statens vegvesen. 2017. *Fakta om Ryfast* [Online]. Hentet fra: <https://www.vegvesen.no/vegprosjekter/ryfast/Fakta>. Lastet ned: 25.01.2018.
- [5] S. M. Olsen, *Broer i Norge*. Bergen: Vigmostad & Bjørke, 2008.
- [6] N. J. Gimsing og C. T. Georgakis, *Cable supported bridges : concept and design*, 3. utg. Chichester, U.K.: John Wiley & Sons, 2012.
- [7] Y. L. Xu, *Wind Effects on Cable-Supported Bridges*, 1. utg. Singapore: Wiley, 2013.
- [8] 2018. *Hengebroer: Lengste spenn* [Online]. Hentet fra: <http://broer.no/liste/hengebroer/spenn>. Lastet ned: 10.04.2018.
- [9] L. Andresen og Ø. Torgersrud. 2017. *Utfordrende fundamentering for verdens lengste hengebru* [Online]. Hentet fra: <https://www.ngi.no/Nyheter/Aktuelt-fra-NGI/Utfordrende-fundamentering-for-verdens-lengste-hengebru>. Lastet ned: 10.04.2018.
- [10] Statens vegvesen, "Mulighetsstudie - Kryssing av Sognefjorden," 2011. [Online]. Hentet fra: https://www.vegvesen.no/_attachment/207480/binary/399909, Lastet ned: 10.04.2018.
- [11] Aas-Jakobsen, "Reference Portfolio - Lysefjord Bridge," 2011. Hentet fra: https://web.archive.org/web/20160303200040/http://www.aaj.no/bruer/pdf/Lysefjord_referanse_eng.pdf, Lastet ned: 29.01.2018.
- [12] E. Cheynet, "Wind-induced vibrations of a suspension bridge: A case study in full-scale," Dr. Philos., Department of Mechanical and Structural Engineering and Materials Science, University of Stavanger, Stavanger, no. 326, 2016.
- [13] F. Ricciardelli, "Prediction of the response of suspension and cable-stayed bridge towers to wind loading," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 64, nr. 2-3, s. 145-159, 1996.
- [14] E. N. Strømmen, *Theory of Bridge Aerodynamics*, 2. utg. Berlin: Springer, 2010.
- [15] J. D. Holmes, *Wind loading of structures*, 3. utg. London: Taylor & Francis, 2015.

- [16] *Eurokode 1: Laster på konstruksjoner - Del 1-4: Allmenne laster - Vindlaster*, NS-EN 1991-1-4:2005+NA:2009, 2009.
- [17] *N-003: Actions and action effects*, N-003 NORSOK, 2007.
- [18] D. E. Newland, *An introduction to random vibrations, spectral & wavelet analysis*, 3. utg. Essex: Prentice Hall, 1993.
- [19] C. Dyrbye og S. O. Hansen, *Wind loads on structures*, 1. utg. Chichester: Wiley, 1997.
- [20] SNL. 2018. *FFT*. Hentet fra: <https://snl.no/FFT>. Lastet ned: 10.05.2018.
- [21] Statens vegvesen, *Håndbok N400 - Bruprosjektering*, N400(2015), 2015.
- [22] L. A. Pereira, D. Fernandes, D. S. Gazzana, F. Libano og S. Haffner, "Application of the welch, burg and MUSIC methods to the detection of rotor cage faults of induction motors," i *Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2006. TDC'06. IEEE/PES*, 2006, s. 1-6: IEEE.
- [23] P. Welch, "The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short, modified periodograms," *IEEE Transactions on audio and electroacoustics*, vol. 15, nr. 2, s. 70-73, 1967.
- [24] J. P. Burg, *Maximum entropy spectral analysis*. Stanford University, 1975.
- [25] E. Simiu og R. H. Scanlan, *Wind effects on structures: fundamentals and applications to design*, 3. utg. 1996.
- [26] P. W. Bearman, "Vortex Shedding from Oscillating Bluff Bodies," *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 16, nr. 1, s. 195-222, 1984.
- [27] G. L. Larose, M. Falco og A. Cigada, "Aeroelastic response of the towers for the proposed bridge over Stretto di Messina," *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, vol. 57, nr. 2, s. 363-373, 1995.
- [28] S. S. Rao, *Mechanical Vibrations*, 5. utg. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2013.
- [29] C. H. K. Williamson og R. Govardhan, "Vortex-induced vibrations," *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 36, nr. 1, s. 413-455, 2004.
- [30] J. B. Jakobsen, "Fluctuating wind load and response of a line-like engineering structure with emphasis on motion-induced wind forces," Dr. Philos., Department of Structural Engineering, University of Trondheim (NTH), Trondheim, 1995.
- [31] J. T. Snæbjörnsson, J. B. Jakobsen, E. Cheynet og J. Wang, "Full scale monitoring of wind and traffic induced response of a suspension bridge," *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 276, s. 1-13, des. 2017. [Online]. Hentet fra doi: 10.1088/1757-899X/276/1/012007.

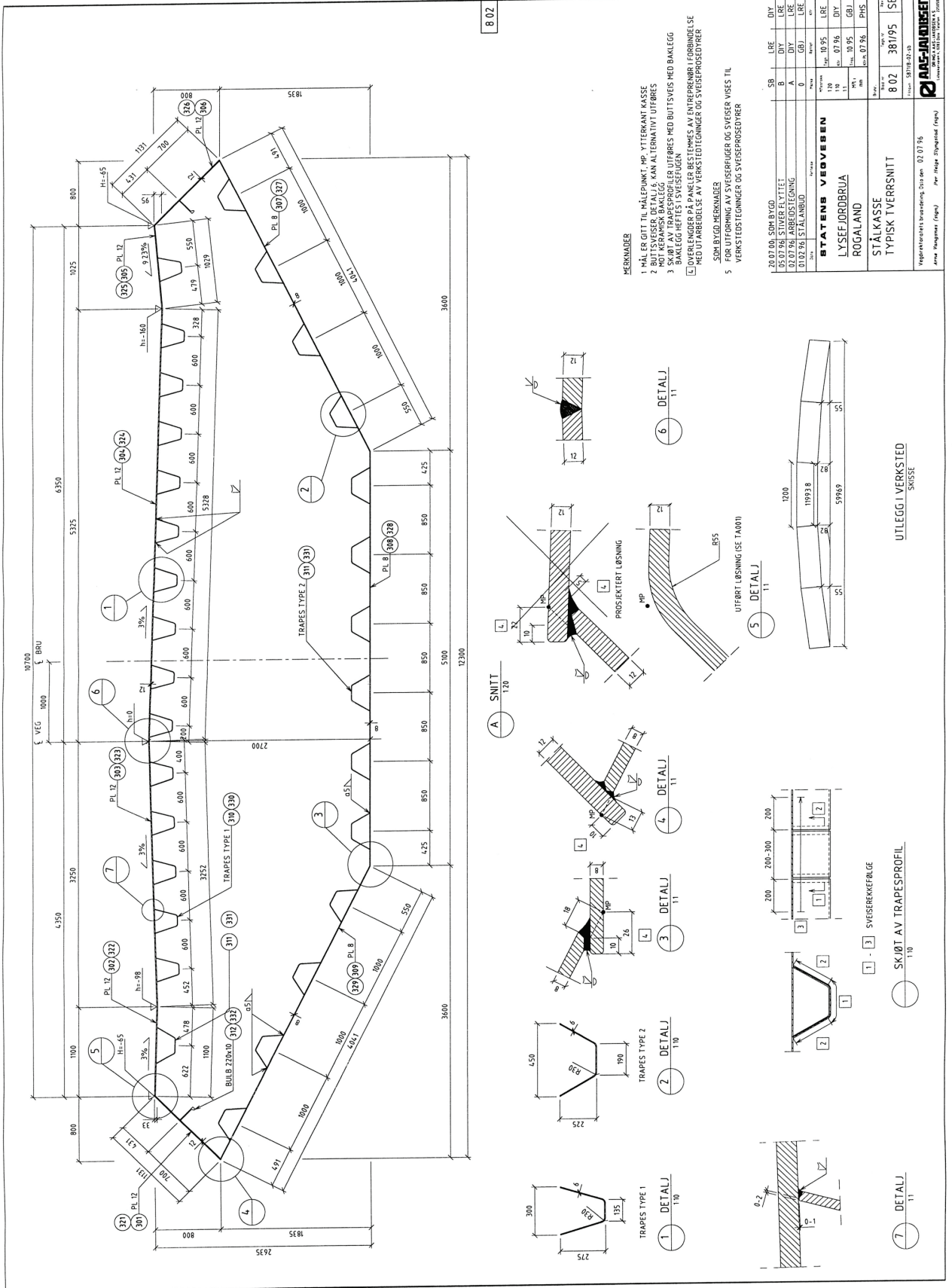
- [32] K. K. Dunham, "Årsrapport 2015 - Ferjefri E39," Statens Vegvesen, 2015. [Online]. Hentet fra: https://www.vegvesen.no/_attachment/1590590/binary/1142965?fast_title=%C3%85rsrapport+2015+-+Ferjefri+E39.pdf, Lastet ned: 30.01.2018.
- [33] K. K. Dunham og B. Stensvold, "Årsrapport 2016 - Ferjefri E39," Statens Vegvesen, 2016. [Online]. Hentet fra: https://www.vegvesen.no/_attachment/1923069/binary/1191557?fast_title=%C3%85rsrapport+2016+-+Ferjefri+E39.pdf, Lastet ned: 30.01.2018.
- [34] 2018. *How do Gill Ultrasonic Anemometers Work?* [Online]. Hentet fra: <http://gillinstruments.com/products/anemometer/principleofoperation2.html>. Lastet ned: 08.06.2018.
- [35] J. Wang, J. B. Jakobsen, E. Cheynet og J. Snæbjørnsson, "Time-domain analysis of wind-induced response of a suspension bridge in comparison with the full-scale measurements," presentert ved Proceedings of the ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, June 25-30, 2017, Trondheim, Norway, 2017.
- [36] Y. L. Xu, J. M. Ko og Z. Yu, "Modal analysis of tower-cable system of Tsing Ma long suspension bridge," *Engineering Structures*, vol. 19, nr. 10, s. 857-867, 1997.

Vedlegg A: Tegninger fra Statens vegvesen

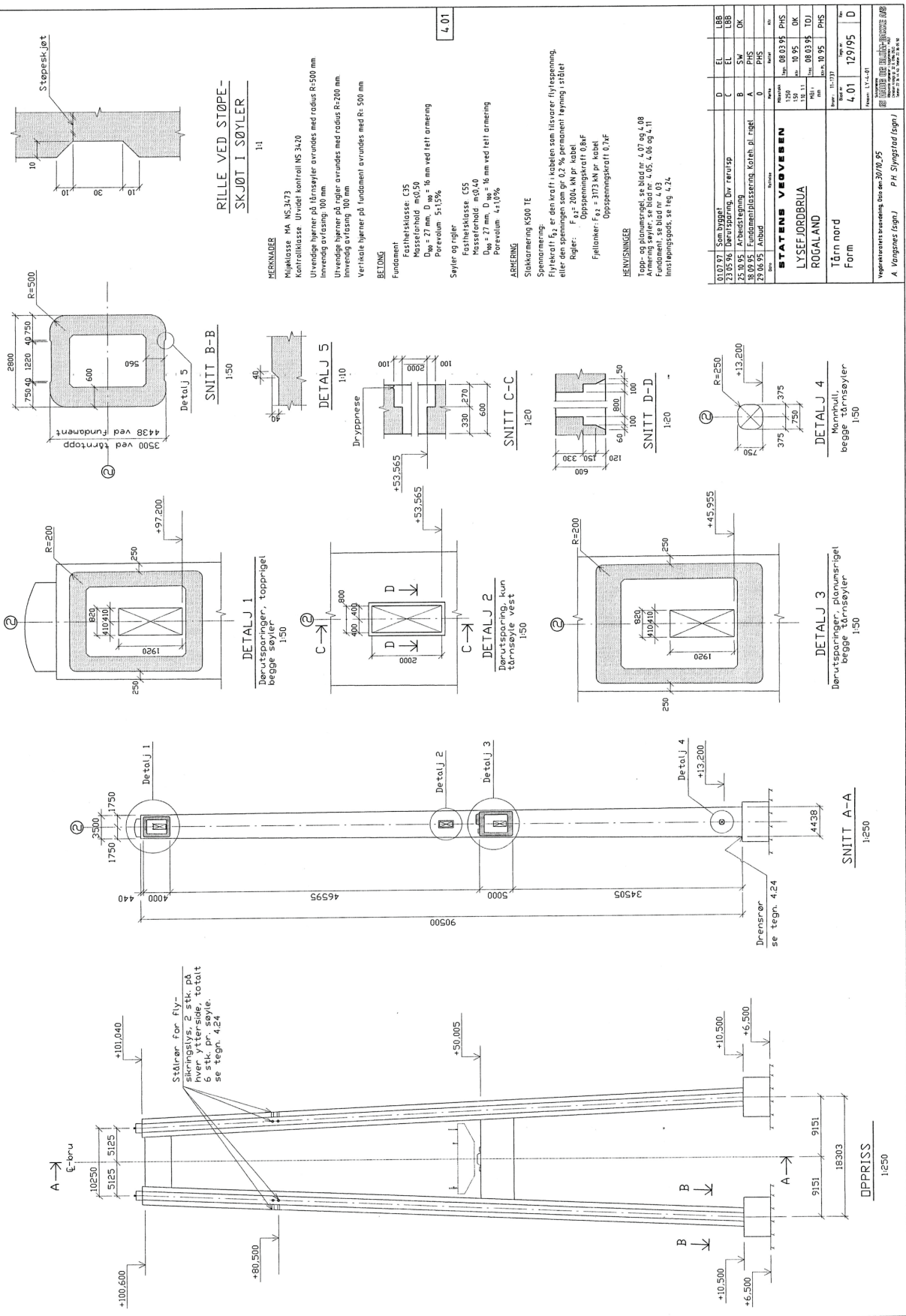
Oversikt



Brokasse



Brotårn



RILLE VED STØPE-SKJØT I SØYLER

1:1

MERKNADER
 Miljøklasse MA NS 3473
 Kontrollklasse Utvidet kontroll NS 3420
 Utvendige hjørner på tårnsøyer avrundet med radius R=500 mm
 Innvendig avfasing: 100 mm
 Utvendige hjørner på rigler avrundet med radius R=200 mm
 Innvendig avfasing: 100 mm
 Vertikale hjørner på fundament avrundet med R= 500 mm

BELTONG
 Fundament
 Fasthetsklasse: C35
 Masseforhold: m=0,50
 D_{agg} = 27 mm, D_{st} = 16 mm ved lett armering
 Porevolum: 5-15%

Søylor og rigler
 Fasthetsklasse: C55
 Masseforhold: m=0,40
 D_{agg} = 27 mm, D_{st} = 16 mm ved lett armering
 Porevolum: 4-10%

ARBEIDING
 Støkketegnning K500 TE
 Spennetegnning: F_{yk} er den kraft i kabelen som tilsvarer flyttestrekkning, eller den spenningen som gir 0,2 % permanent tøyning i stålet
 Rigler: F_{yk} = 2004 MN pr. kabel
 Oppspenningskraft 0,8F
 Fjellanker: F_{yk} = 3173 kN pr. kabel
 Oppspenningskraft 0,7F

RENVISNINGER
 Topp- og plannummerig, se blad nr. 4.07 og 4.08
 Fundament, se blad nr. 4.05, 4.06 og 4.11
 Fundament, se blad nr. 4.03
 Innstøpsgjøds, se teg. 4.24

Blad nr.	Blad tittel	D	EL	LB
10.07.97	Som bygget	C	EL	LB
23.03.98	Bygget	B	EL	LB
25.10.95	Arbeidstegning	A	SW	OK
18.09.95	Fundamentbløstegning, Koteh. pl. Tødel	D	PHS	OK
29.06.95	Arbeid	D	PHS	OK

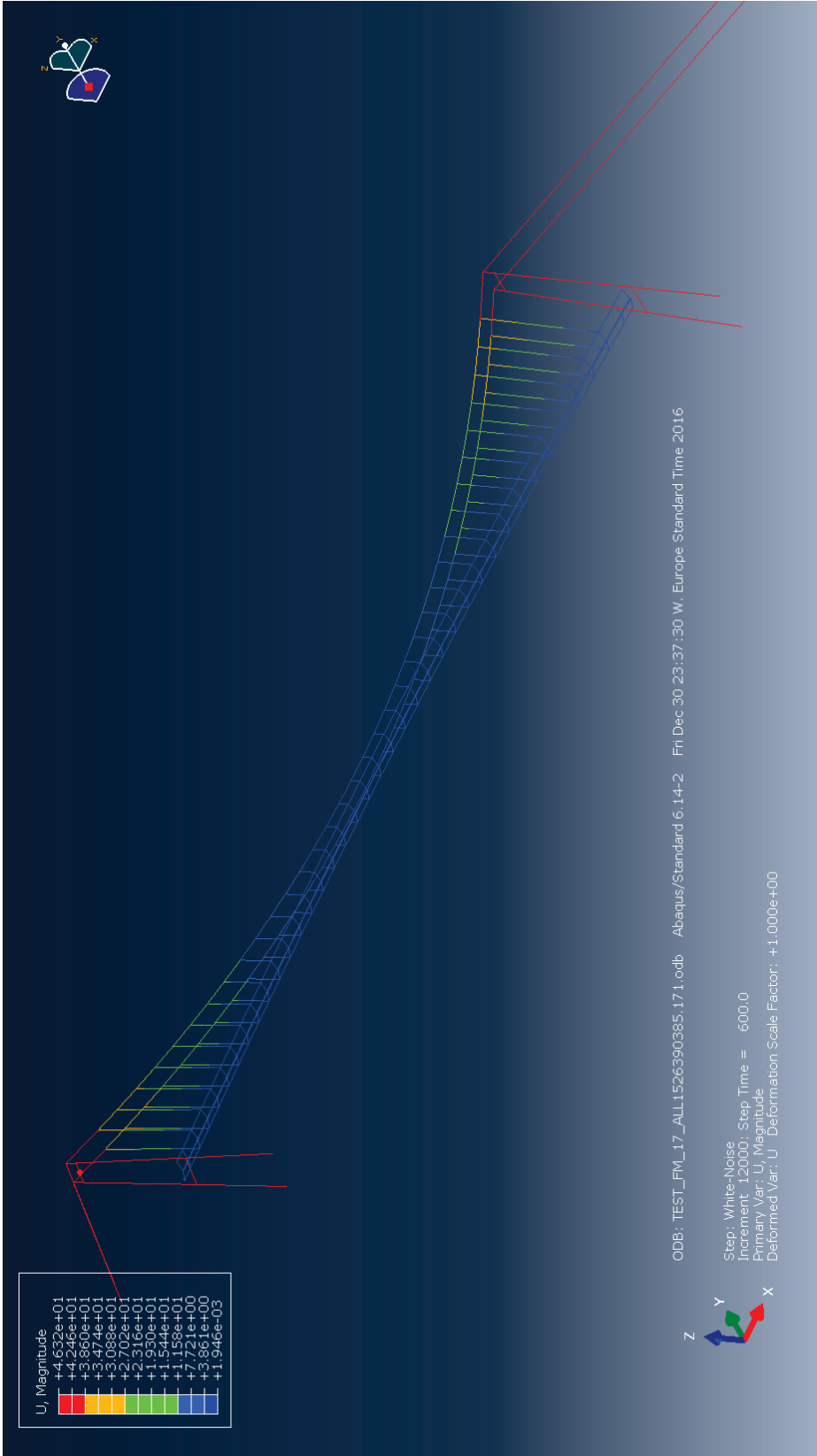
Blad nr.	Blad tittel	D	EL	LB
10.07.97	Som bygget	C	EL	LB
23.03.98	Bygget	B	EL	LB
25.10.95	Arbeidstegning	A	SW	OK
18.09.95	Fundamentbløstegning, Koteh. pl. Tødel	D	PHS	OK
29.06.95	Arbeid	D	PHS	OK

STATENS VEVESEN
 Rogaland
 Tårn nord
 Form

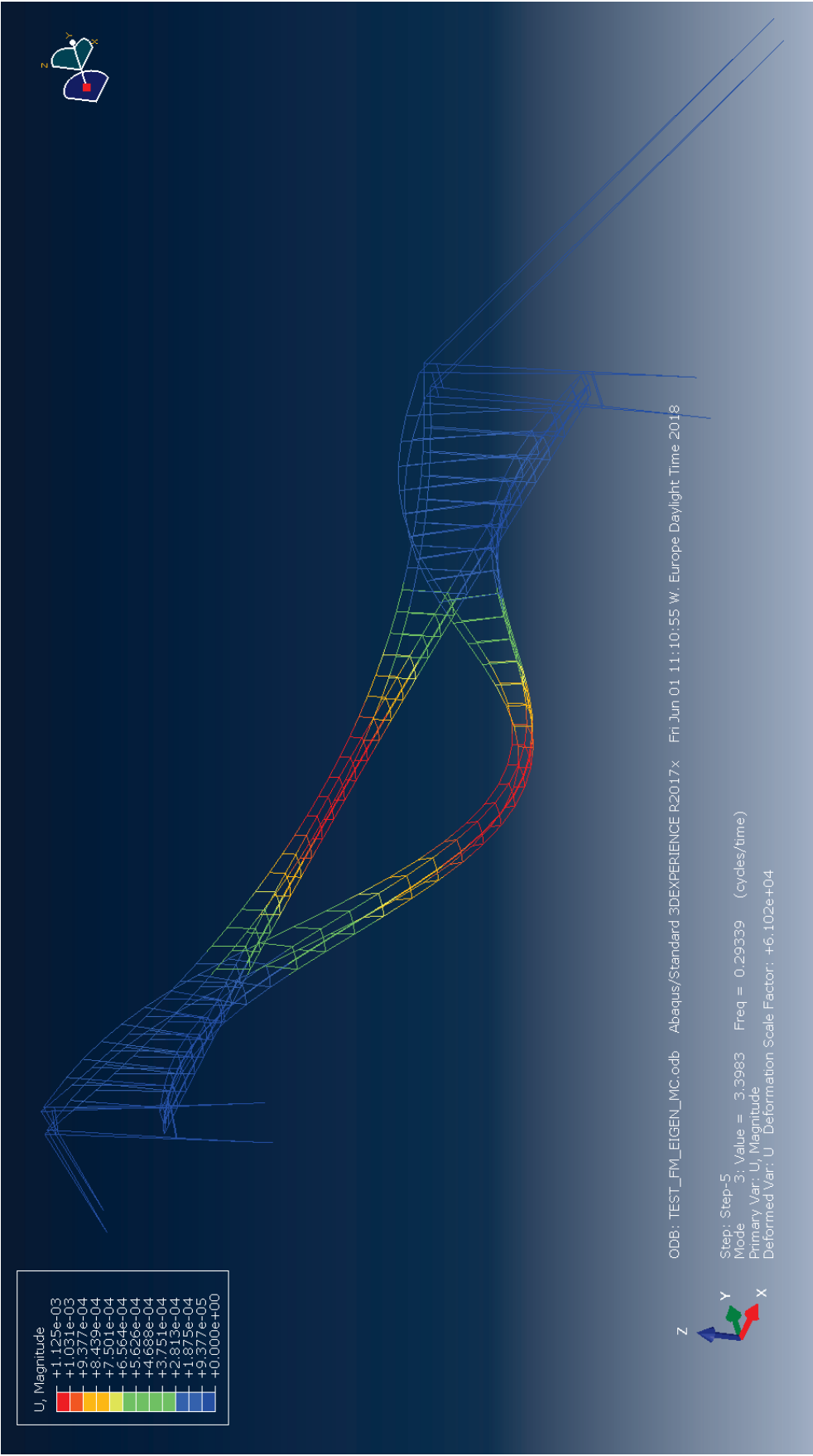
4.01 12/95 D

Vedlegg B: Abaqus-modell

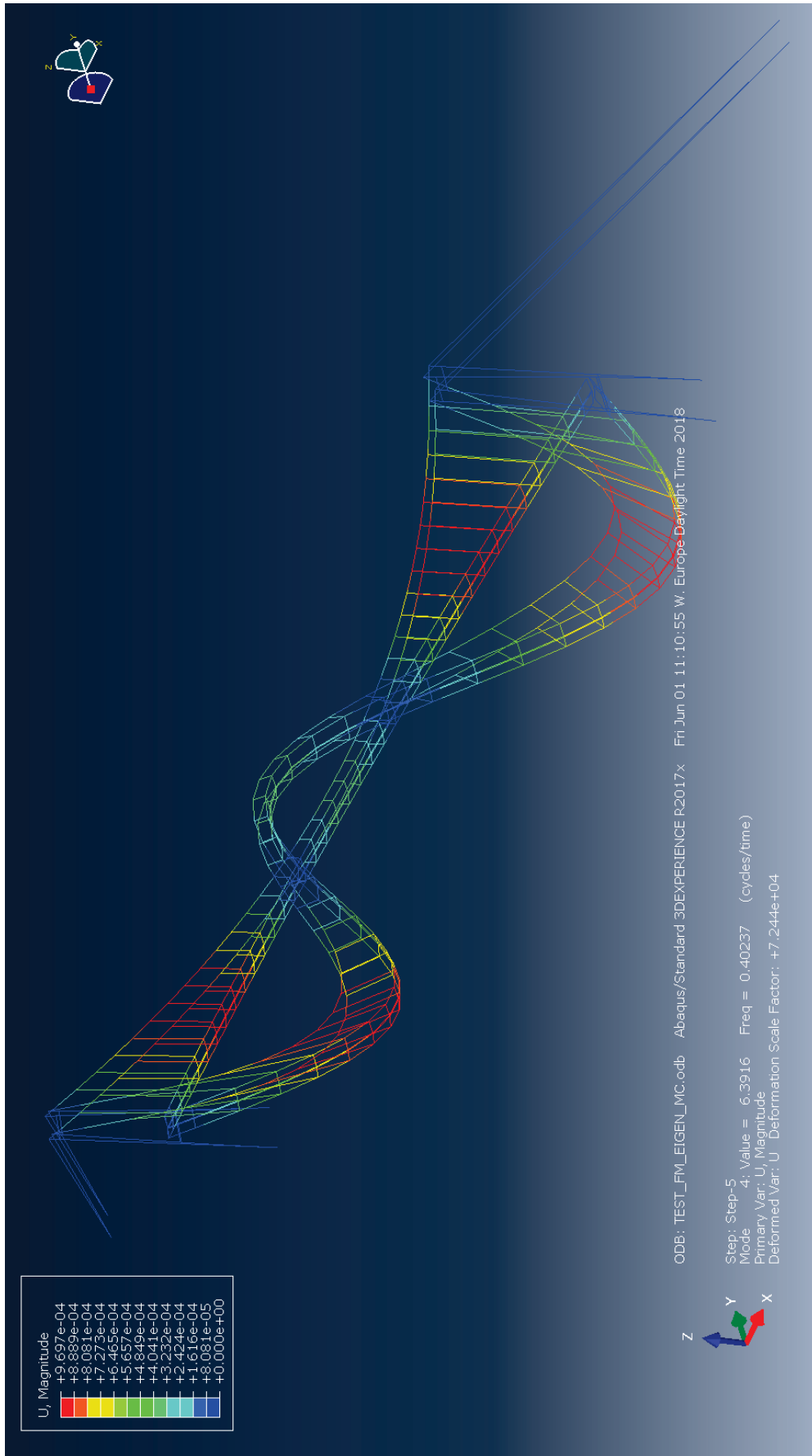
Oversikt

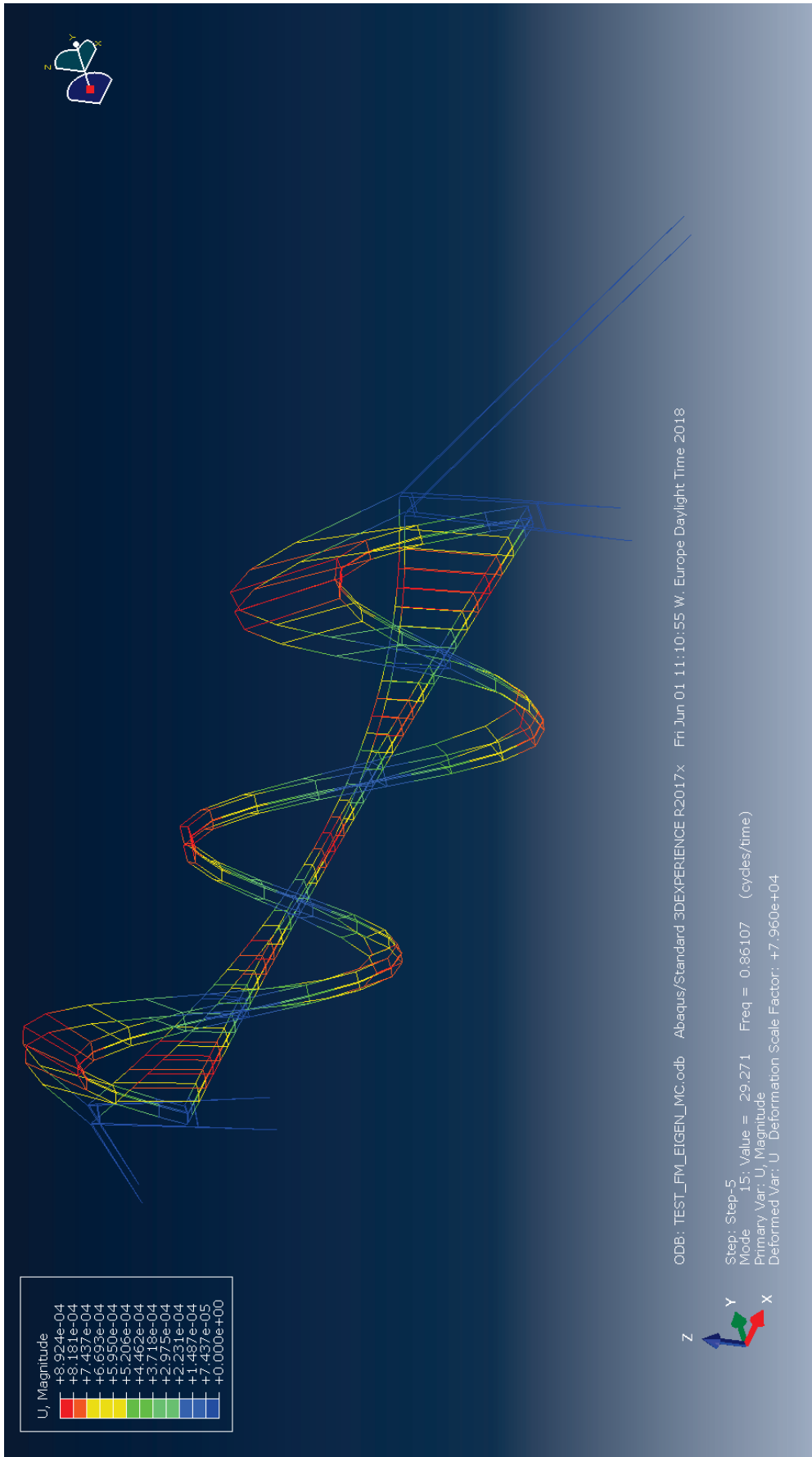


VS1



VS2





Vedlegg C: Matlab-rutiner

Beregning av middelvind:

```
% Beregning av middelvind for flere dager
clearvars;close all;clc;
load folder
fprintf('Choose the period of record \n\n');
REFfilter = 'StatsResult_201*';
DataSelection =
uipickfiles('FilterSpec',folderDataAnalysed,'REFfilter',REFfilter,...
    'Prompt','Choose the period of record' );
Ndays = numel(DataSelection); % Number of day selected
cd(main_folder);

meanH = [];meanDir = []; time_tot = [];
for ii=1:Ndays
    load(DataSelection{ii},'H', 'AnemoName','Dir','time')
    time_tot = [time_tot, time(:)];
    meanH=[meanH,nanmean(H,3)];
    meanDir=[meanDir,nanmean(Dir,3)];
end
time_tot = reshape(time_tot,1,[]);
% Sett inn antall dager (X) og dato (04.02-10.03)
save('data_Xdg_dato.mat','meanH','meanDir', 'time_tot','AnemoName');
```

Beregning av turbulensintensitet og middelvind:

```
% Script for å beregne middelverdi av vindhastighet og retning, turbulens.
clearvars;close all;clc; % sletter gamle variabler i Workspace og i Command windows
load folder
fprintf('Choose the period of record \n\n');
DaySelection = uipickfiles('FilterSpec',folderDataAnalysed,...
    'Prompt','Choose the period of record' );
Ndays = numel(DaySelection); % Antall dager valgt
NaNThres = 0.1; % Nedre grense for NaN-verdier
% Initialiserer de ulike matrisene
Iu = [];
Iv = [];
Iw = [];
meanU = [];
meanV = [];
meanW = [];
meanDir = [];
for ii=1:Ndays
    tic % Start telling
    load(DaySelection{ii},'H', 'AnemoName', 'Dir','W','time'); % Laster data fra
dag
    [Nsensors, Nsamples, N]=size(H);
    % Fyller matrisene med NaN som startverdi
    Iu0 = nan(Nsensors,Nsamples);
    Iv0 = nan(Nsensors,Nsamples);
    Iw0 = nan(Nsensors,Nsamples);
    meanU0 = nan(Nsensors,Nsamples);
    meanV0 = nan(Nsensors,Nsamples);
    meanW0 = nan(Nsensors,Nsamples);
    meanDir0 = nan(Nsensors,Nsamples);
    % Lager dummy-varibler for u og v retning
    dummyU = H.*cosd(Dir);
    dummyV = H.*sind(Dir);
    for jj=1:Nsensors
        for kk=1:Nsamples
```

```

        if numel(find(isnan(dummyU(jj, kk, :))))/N<NaNThres % Sjekker
grensebetingelsen ift. NaN
            if jj==3 % H10 sensor, kun 2D
                meanDir0(jj, kk) = getMeanDir(squeeze(Dir(jj, kk, :)));

[u, v, w]=tiltCorrection(squeeze(dummyU(jj, kk, :)), squeeze(dummyV(jj, kk, :)), [], 'method
', 'rot2');

                else
                    dummyW = squeeze(W(jj, kk, :));
                    if numel(find(isnan(dummyW)))/N<NaNThres % Sjekker
grensebetingelsen ift. NaN
                        meanDir0(jj, kk) = getMeanDir(squeeze(Dir(jj, kk, :)));

[u, v, w]=tiltCorrection(squeeze(dummyU(jj, kk, :)), squeeze(dummyV(jj, kk, :)), dummyW, 'me
thod', 'rot2');

                    end
                end
                % Beregning av middelvind og turbulensintensitet for hvert 10 min
                meanU0(jj, kk) = nanmean(u);
                meanV0(jj, kk) = nanmean(v);
                meanW0(jj, kk) = nanmean(w);
                Iu0(jj, kk)=nanstd(nandetrend(u))/meanU0(jj, kk); %
Turbulensintensitet = std.avvik/horisontal_middelvind
                Iv0(jj, kk)=nanstd(nandetrend(v))/meanU0(jj, kk);
                Iw0(jj, kk)=nanstd(nandetrend(w))/meanU0(jj, kk);
            end
        end
    end
    end
    %Samler alle dataene fra hver sensor i en matrise
    Iu = [Iu, Iu0];
    Iv = [Iv, Iv0];
    Iw = [Iw, Iw0];
    meanU = [meanU, meanU0];
    meanV = [meanV, meanV0];
    meanW = [meanW, meanW0];
    meanDir = [meanDir, meanDir0];
    toc % Slutt telling
end
% Lagrer definert utvalg av data, samt beregnede verdier i en mat.fil
% Sett antall dager (X) og dato (06-08.02)
save('data_Xdg_dato.mat', 'Iu', 'Iv', 'Iw', 'meanU', 'meanV', 'meanW', 'meanDir', 'AnemoName');

```

Turbulensintensitet, vindroser og middelvind:

```

% Plotting av turbulensintensitet vs middelvind for 3 dagers gjennomsnitt for alle
sensorer.
load('data_3dg_06-08.02.mat') % Laster data fra mat.fil
clf; close all; % Lukker alle åpne figurer
figure('position', [300, 100, 700, 400]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf, 'color', 'w'); % Hvit bakgrunn
for ii=1:7 % 7 sensorer
    plot(meanU(ii, :), Iu(ii, :).*100, '*')
    hold on
    box on
end
grid on; grid minor;
ylabel(' $ I_u \ (\%)$', 'Interpreter', 'latex');
xlabel('$ \overline{U}_{10min} \ (m\{\cdot\}s^{-1})$', 'Interpreter', 'latex')
title('Turbulensintensitet vs middelvind for 3 dg, alle sensorer 06-
08.02', 'interpreter', 'latex')
box on
legend('AnemoName', 'Location', 'northeast')
export_fig Iu_vs_U_3dg_06-08.02 -png -r300

```

```

% Plotting av turbulensintensitet vs middelvind for 3 dagers gjennomsnitt for H08Wb
(nærmest nordvestlig tårn)
load('data_3dg_06-08.02.mat') % Laster data fra mat.fil
clf; close all; % Lukker alle åpne figurer
figure('position', [300, 100, 600, 400]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf,'color','w'); % Hvit bakgrunn
IndS_anemo = 1; % Sensor H08Wb
plot(meanU(IndS_anemo,:),Iu(IndS_anemo,:).*100, '*')
grid on; grid minor;
ylabel(' $ I_u \ (\%)$', 'Interpreter', 'latex');
xlabel('$ \overline{U}_{10min} \ (m\{cdot\}s^{-1})$', 'Interpreter', 'latex')
title('Turbulensintensitet vs middelvind for 3 dg, for 06-
08.02', 'interpreter', 'latex')
box on
legend(AnemoName{IndS_anemo}, 'Location', 'northeast')
export_fig Iu_vs_U_3dg_H08Wb_06-08.02 -png -r400

% Plotting av turbulensintensitet vs middelvind for 1 dag for H08Wb (Nærmest tårn)
load('data_1dg_07.02.mat') % Laster data fra mat.fil
clf; close all; % Lukker alle åpne figurer
figure('position', [300, 100, 600, 400]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf,'color','w'); % Hvit bakgrunn
IndS_anemo = 1; % Sensor
plot(meanU(IndS_anemo,:),Iu(IndS_anemo,:).*100, 'o', 'LineWidth', 1.2)
ylabel(' $ I_u \ (\%)$', 'Interpreter', 'latex');
xlabel('$ \overline{U}_{10min} \ (m\{cdot\}s^{-1})$', 'Interpreter', 'latex')
title('Turbulensintensitet mot middelvind 07.02.17, med $ \overline{U}_{dag}=10.1 \ m\{cdot\}s^{-1}$', 'Interpreter', 'latex')
box on; grid on; grid minor
% Matrisene inneholder NaN, som inpaint_nans fyller inn med interpolerte
% verdier, siden polyfit ikke tolererer NaN-verdier.
MeanU = inpaint_nans(meanU,4);
IU = inpaint_nans(Iu,4);
coefficients = polyfit(MeanU,IU.*100, 1);
xFit = linspace(min(meanU(IndS_anemo,:)), max(meanU(IndS_anemo,:)), 1000);
yFit = polyval(coefficients , xFit);
hold on;
plot(xFit, yFit, 'r-', 'LineWidth', 1.5);
legend({AnemoName{IndS_anemo}, 'trend'}, 'Location', 'northeast')
export_fig Iu_vs_U_1dg_07.02_H08Wb_med_trendlinje -png -r400

% Plotting av vindrose for H08Wb-sensor nærmest tårn (3dg middelvind)
load('data_3dg_06-08.02.mat') % Laster data fra mat.fil
clf; close all; % Lukker alle åpne figurer
figure('position', [300, 100, 400, 400]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf,'color','w'); % Hvit bakgrunn
IndS_anemo = 1; % Sensor H08Wb
% Grenser og navn på akser
limU = [nanmin(meanU(IndS_anemo,:)), nanmax(meanU(IndS_anemo,:))]; % #3 limites for
the wind speed
name_U = '$ \overline{U} \ (m\{cdot\}s^{-1})$'; % Navn på variabel U
name_IU = '$ I_u \ (\%)$'; % Navn på variabel IU
ScatterWindRose(meanDir(IndS_anemo,:), meanU(IndS_anemo,:), 'Ylim', limU, 'labelY', name
_U, 'labelZ', name_IU, 'Z', Iu(IndS_anemo,:)*100);
% Setter aksene på toppen
th1 = findobj(gcf, 'Type', 'text');
th2 = findobj(gcf, 'Type', 'line');
for jj = 1:length(th1)
    uistack(th1(jj), 'top');
end
for jj = 1:length(th2)
    uistack(th2(jj), 'top');
end
export_fig Vindrose_H08Wb_3dg -png -r400

```

```

% Plotting av vindrose for H08Wb-sensor midt på broen (07.02.2017) Max. vind
load('data_ldg_07.02.mat') % Laster data fra mat.fil
clf; close all; % Lukker alle åpne figurer
figure('position', [300, 100, 400, 400]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf,'color','w'); % Hvit bakgrunn
IndS_anemo = 1; % Sensor H08Wb
% Grenser og navn på akser
limU = [nanmin(meanU(IndS_anemo,:)),nanmax(meanU(IndS_anemo,:))]; % #3 limites for
the wind speed
name_U = '$ \overline{U} \ (m\{cdot}s^{-1})$'; % Navn på variabel U
name_IU = '$ I_u \ (\%)$'; % Navn på variabel IU
ScatterWindRose(meanDir(IndS_anemo,:),meanU(IndS_anemo,:), 'Ylim',limU,'labelY',name
_U,'labelZ',name_IU,'Z',Iu(IndS_anemo,:)*100);
% Setter aksene på toppen
th1 = findobj(gcf,'Type','text');
th2 = findobj(gcf,'Type','line');
for jj = 1:length(th1)
    uistack(th1(jj),'top');
end
for jj = 1:length(th2)
    uistack(th2(jj),'top');
end
export_fig Vindrose_H08Wb_07.02 -png -r300

% 10.03.17 (lite vind)
load('data_ldg_10.03.mat') % Laster data fra mat.fil
figure('position', [300, 100, 400, 400]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf,'color','w'); % Hvit bakgrunn
IndS_anemo = 1; % Sensor
% Grenser og navn på akser
limU = [nanmin(meanU(IndS_anemo,:)),nanmax(meanU(IndS_anemo,:))]; % #3 limites for
the wind speed
name_U = '$ \overline{U} \ (m\{cdot}s^{-1})$'; % Navn på variabel U
name_IU = '$ I_u \ (\%)$'; % Navn på variabel IU
ScatterWindRose(meanDir(IndS_anemo,:),meanU(IndS_anemo,:), 'Ylim',limU,'labelY',name
_U,'labelZ',name_IU,'Z',Iu(IndS_anemo,:)*100);
% Setter aksene på toppen
th1 = findobj(gcf,'Type','text');
th2 = findobj(gcf,'Type','line');
for jj = 1:length(th1)
    uistack(th1(jj),'top');
end
for jj = 1:length(th2)
    uistack(th2(jj),'top');
end
export_fig Vindrose_H08Wb_10.03 -png -r400

% (07.02.17)
% Plotting av tidsserie for et døgn for sensor alle sensorer
% for horisontal middelvind, retning.
load('StatsResult_2017_02_07.mat') % Laster data fra mat.fil
clf; close all; % Lukker alle åpne figurer
figure('position', [300, 100, 900, 700]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf,'color','w'); % Hvit bakgrunn
subplot(2,1,1)
plot(time,nanmean(H,3))
datetick('x')
ylabel('$ \overline{H}_{10 \text{ min}} \ (m\{cdot}s^{-1})$', 'Interpreter', 'latex');
title('Tidsserier for vind 07.02.17, med $ \overline{H}_{\text{dag}}=10.0 \ m\{cdot}s^{-1}$', 'Interpreter', 'latex')
hold on
m_H = mean(mean(nanmean(H,3)));
plot(time,ones(length(time),1)*m_H,'-.')
grid on; grid minor
subplot(2,1,2)
plot(time,nanmean(Dir,3))
ylabel('$ (\circ)$', 'Interpreter', 'latex')
datetick('x')

```

```

hold on
m_Dir = mean(mean(nanmean(Dir,3)));
plot(time,ones(length(time),1)*m_Dir,'-.')
grid on; grid minor;
AnemoName{8}='Middel';
legend(AnemoName,'Location','best')
legend('boxoff')
export_fig tidsserie_07.02_døgn_H_Dir -png -r400

% Plotting av tidsserie for horisontalvind fra 09:00-12:00, 07.02.2017
load('StatsResult_2017_02_07.mat') % Laster data fra mat.fil
clf; close all; % Lukker alle åpne figurer
figure('position',[300, 100, 900, 700]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf,'color','w'); % Hvit bakgrunn
subplot(2,1,1)
IndT=55:73; %Tidsintervall
plot(time(IndT),nanmean(H(:,IndT,:),3))
xti = time(IndT(1):1:IndT(end));
set(gca,'XTick',xti)
datetick('x','kepticks')
ylabel('$ \overline{H}_{10 \text{ min}} \ (m\{\cdot\}s^{-1})$', 'Interpreter', 'latex');
title('Tidsserier for vind 07.02.17 mellom 09:00-12:00, med $ \overline{H}_{3t}=12.6 \ m\{\cdot\}s^{-1}$', 'Interpreter', 'latex')
hold on
m_H = mean(mean(nanmean(H(:,IndT,:),3)));
plot(time(IndT),ones(length(time(IndT)),1)*m_H,'-.')
grid minor; grid on;
subplot(2,1,2)
plot(time(IndT),nanmean(Dir(:,IndT,:),3))
ylabel('$ (\circ)$', 'Interpreter', 'latex')
xti = time(IndT(1):1:IndT(end));
set(gca,'XTick',xti)
datetick('x','kepticks')
hold on
m_Dir = mean(mean(nanmean(Dir(:,IndT,:),3)));
plot(time(IndT),ones(length(time(IndT)),1)*m_Dir,'-.')
grid on; grid minor;
AnemoName{8}='Middel';
legend(AnemoName,'Location','best')
legend('boxoff')
export_fig tidsserie_07.02_3t_H_Dir -png -r400

% Plotting av tidsserie for horisontal middelvind for 35 dager for alle sensorer
load('data_35dg_04.02-10.03.mat') % Laster data fra mat.fil
clf; close all; % Lukker alle åpne figurer
figure('position',[300, 100, 1500, 700]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf,'color','w'); % Hvit bakgrunn
plot(time_tot,meanH)
ylabel('$ \overline{H}_{10\text{min}} \ (m\{\cdot\}s^{-1})$', 'Interpreter',
'latex','fontsize',16);
% Definerer en tidsvektor for å markere 07.02
xti = time_tot([1 433 721 1441 2161 2881 3601 4321 4897]);
set(gca,'XTick',xti)
datetick('x','dd.mm','kepticks','keplimits')
hold on
m_H = mean(nanmean(meanH));
plot(time_tot,ones(length(time_tot),1)*m_H,'-.')
grid on; grid minor;
title('Horisontal middelvindehastighet for alle dager i
perioden','interpreter','latex','fontsize',20)
AnemoName{8}='Middel';
legend(AnemoName,'Location','best','interpreter','latex','fontsize',16)
legend('boxoff')
export_fig tidsserie_04.02-10.03_middelvind -png -r400

```

Sammenlikning av middelvindprofiler:

```
clearvars;close all;clc
% Definerer de ulike parametrene
dz=0.5;
z=0:dz:100;
z0 = 0.02;
zh = 0;
alpha = 0.128;
z1 = 10; % Referansehøyde
kr = 0.16;
C = 5.73e-2*(1+0.15)^0.5;
% Lager funksjoner av de fire vindprofilene
% logaritmisk lov profil
log_prof = @(z,z1,zh,z0) log((z-zh)/z0)./log((z1-zh)/z0);
Ulog = log_prof(z,z1,zh,z0);
% power lov profil
power_prof = @(z,z1,alpha) (z./z1).^(alpha);
Upower = power_prof(z,z1,alpha);
% Norsk Standard
ns_prof = @(z,z0,kr) (kr.*log(z/z0));
Uns = ns_prof(z,z0,kr);
% NORSOK
norsok_prof = @(z) (1+C*log(z/10));
Unorsok = norsok_prof(z);

%Plottet:
figure('position',[300, 300, 700, 400]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf,'color','w'); % Hvit bakgrunn
plot(Ulog,z,'r')
hold on
plot(Upower,z,'b-.','linewidth',1)
ylabel('z \ (m)','interpreter','latex')
hold on
plot(Uns,z,'k-.','linewidth',1)
hold on
plot(Unorsok,z,'c-.','linewidth',1)
h = xlabel('$\overline{U}/\overline{U}_{z=10}$');
set(h,'interpreter','Latex','FontSize',12)
legend({'Log' 'Power' 'NS-EN' 'NORSOK'},'Location','best')
title('Sammenlikning av middelvindprofiler','interpreter','latex')
grid on; grid minor;
export_fig Sammenlikning_vindprofiler -png -r600
```

Korrelasjon:

```
% Plot av tilfeldige verdier
clf; close all
figure('position',[300, 300, 800, 400]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf,'color','w'); % Hvit bakgrunn
x = -1 + (1+1)*rand(50,1);
y = -1 + (1+1)*rand(50,1);
subplot(1,2,1)
plot(x,y,'.','markersize',15)
box off
ax = gca;
ax.XAxisLocation = 'origin';
ax.YAxisLocation = 'origin';
xlabel('x')
ylabel('y')
title('Tilfeldige verdier som ikke er korrelerte','interpreter','latex')
set(gca,'xtick',[])
set(gca,'ytick',[])
subplot(1,2,2)
x = -1 + (1+1)*rand(50,1);
```

```

y = 5*x + (-1 + (1+1)*rand(50,1));
plot(x,y, '.', 'markersize', 15)
box off
ax = gca;
ax.XAxisLocation = 'origin';
ax.YAxisLocation = 'origin';
set(gca, 'xtick', [])
set(gca, 'ytick', [])
xlabel('x')
ylabel('y')
title('Tilfeldige verdier som er korrelerte', 'interpreter', 'latex')
export_fig korrelasjon -png -r400

```

Histogram:

```

% Plotting av histogram sammen med tilpasset normalfordeling (u-komponent)
for max. vind (07.02.17)
load('StatsResult_2017_02_07.mat')
clf; close all
figure('position', [300, 300, 1000, 400]) % Ny figur med spesifikk
størrelse
set(gcf, 'color', 'w'); % Hvit bakgrunn
IndT = 56;
IndS_anemo = 1;
numOfBins = 20; % Antall søyler
dummyU = H.*cosd(Dir);
dummyV = H.*sind(Dir);
dummyW = squeeze(W(IndS_anemo, IndT, :));
[u, v, w]=tiltCorrection(squeeze(dummyU(IndS_anemo, IndT, :)), squeeze(dummyV(IndS_anemo, IndT, :)), dummyW, 'method', 'rot2');
[histFreq, histXout] = hist(u, numOfBins);
binWidth = histXout(2)-histXout(1);
bar(histXout, histFreq/binWidth/sum(histFreq));
xlabel('$ u + \bar{U} \ (m\{\cdot\}s^{-1})$', 'Interpreter', 'latex');
title('Histogram av vindhastighet, med tilpasset STF. for H08Wb-sensor
mellom 09:10-09:20 (07.02.17)', 'interpreter', 'latex')
hold on
% Tilpasser en normalfordeling til å passe til STF.
PD = fitdist(u, 'normal');
y = pdf(PD, histXout);
plot(histXout, pdf(PD, histXout), 'r');
export_fig histogram_normalfordeling_u_07.02_H08Wb_(09.10-09.20) -png -r400

```

```

% Plotting av histogram sammen med tilpasset normalfordeling (u-komponent)
for (02.03.17)
load('StatsResult_2017_03_02.mat')
figure('position', [300, 300, 1000, 400]) % Ny figur med spesifikk
størrelse
set(gcf, 'color', 'w'); % Hvit bakgrunn
IndT = 1;
IndS_anemo = 1;
numOfBins = 20; % Antall søyler
dummyU = H.*cosd(Dir);
dummyV = H.*sind(Dir);
dummyW = squeeze(W(IndS_anemo, IndT, :));
[u, v, w]=tiltCorrection(squeeze(dummyU(IndS_anemo, IndT, :)), squeeze(dummyV(IndS_anemo, IndT, :)), dummyW, 'method', 'rot2');
[histFreq, histXout] = hist(u, numOfBins);
binWidth = histXout(2)-histXout(1);
bar(histXout, histFreq/binWidth/sum(histFreq));
xlabel('$ u + \bar{U} \ (m\{\cdot\}s^{-1})$', 'Interpreter', 'latex');

```



```

title('Histogram av vindhastighet, med tilpasset STF. for H08Wb-sensor
mellom 00:00-00:10 (02.03.17)', 'interpreter', 'latex')
hold on
% Tilpasser en normalfordeling til å passe til STF.
PD = fitdist(u, 'normal');
y = pdf(PD, histXout);
plot(histXout, pdf(PD, histXout), 'r');
export_fig histogram_normalfordeling_u_02.03_H08Wb_(00.00-00.10) -png -r400

```

10 min vind:

```

% TIDSSERIER FOR VIND
% Kraftig vind(07.02.17)
% Plotting av tidsserier for 10min intervall for H08Wb ( med retning (SUBPLOT)
load('StatsResult_2017_02_07.mat')
clf; close all
figure('position', [300, 300, 1000, 600]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf, 'color', 'w'); % Hvit bakgrunn
subplot(2,1,1)
dummyU = H.*cosd(Dir);
dummyV = H.*sind(Dir);
IndT = 56; % 10 min intervall (1:144)
IndS_anemo = 1; % Sensor (1:7)
dummyW = squeeze(W(IndS_anemo, IndT, :));
[u,v,w]=tiltCorrection(squeeze(dummyU(IndS_anemo, IndT, :)), squeeze(dummyV(IndS_anemo
, IndT, :)), dummyW, 'method', 'rot2');
u = inpaint_nans(u,4); % Interpolerer verdier for å erstatte NaNs
plot(t,u);
hold on
m_U1 = nanmean(u);
plot(t,ones(length(t),1)*m_U1)
ylabel('$ u + \bar{U} \ (m{\cdot}s^{-1})$', 'Interpreter', 'latex');
title('Tidsserier for vind 07.02.17 mellom 09:10-09:20, med $\overline{U}=17.7 \ $
m{\cdot}s^{-1}$', 'Interpreter', 'latex')
vline([380 420], 'k')
grid minor; grid on;
legend({'H08Wb' 'Middel'}, 'Location', 'best')
subplot(2,1,2)
dir = inpaint_nans(squeeze(Dir(IndS_anemo, IndT, :)), 4); % Interpolerer verdier for å
erstatte NaNs
plot(t,dir)
hold on
m_Dir = mean(mean(dir));
plot(t,ones(length(t),1)*m_Dir)
ylabel('$ \circ$', 'Interpreter', 'latex')
xlabel('$ t \ (s)$', 'Interpreter', 'latex')
vline([380 420], 'k')
grid minor; grid on;
export_fig tidsserie_subplot_10min_H08Wb_07.02(09.10-09.20) -png -r600

% Plotting av tidsserier for 40s intervall for H08Wb (midt på bro)
load('StatsResult_2017_02_07.mat')
figure('position', [300, 300, 900, 500]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf, 'color', 'w'); % Hvit bakgrunn
dt=0.1; t=0:dt:400*dt; t=t';
dummyU = H.*cosd(Dir);
dummyV = H.*sind(Dir);
IndT = 56; % 10 min intervall (1:144)
IndS_anemo = 1; % Sensor (1:7)
time_int = 3801:4201;
dummyW = squeeze(W(IndS_anemo, IndT, :));
[u,v,w]=tiltCorrection(squeeze(dummyU(IndS_anemo, IndT, :)), squeeze(dummyV(IndS_anemo
, IndT, :)), dummyW, 'method', 'rot2');
subplot(2,1,1)
u = inpaint_nans(u,4); % Interpolerer verdier for å erstatte NaNs
plot(t,u(time_int));

```

```

m_U1 = nanmean(u(time_int));
hold on
plot(t,ones(length(t),1)*m_U1)
ylabel('$ u + \bar{U} \ (m{\cdot}s^{-1})$', 'Interpreter', 'latex');
title('Tidsserier for vind 07.02.17 mellom 09:16:20-09:17:00, med
$\overline{U}=17.7 \ m{\cdot}s^{-1}$', 'Interpreter', 'latex')
grid minor; grid on;
legend({'H08Wb' 'Middel'}, 'Location', 'best')
subplot(2,1,2)
dir = inpaint_nans(squeeze(Dir(IndS_anemo,IndT,time_int)),4); % Interpolerer
verdier for å erstatte NaNs
plot(t,dir);
m_Dir = mean(mean(dir));
hold on
plot(t,ones(length(t),1)*m_Dir)
ylabel('$ (\circ)$', 'Interpreter', 'latex')
xlabel('$ t \ $ (s)', 'Interpreter', 'latex')
grid minor; grid on;
export_fig tidsserie_40s_H08Wb_07.02_subplot -png -r600

% Plotting av tidsserie for 10min intervall for H08Wb med mye vind sammenliknet med
en dag med mindre vind
clearvars
load('StatsResult_2017_02_07.mat')
figure('position', [300, 300, 900, 500]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf, 'color', 'w'); % Hvit bakgrunn
dummyU = H.*cosd(Dir);
dummyV = H.*sind(Dir);
IndT = 56; % 10 min intervall (1:144)
IndS_anemo = 1; % Sensor (1:7)
dummyW = squeeze(W(IndS_anemo,IndT,:));
[u,v,w]=tiltCorrection(squeeze(dummyU(IndS_anemo,IndT,:)),squeeze(dummyV(IndS_anemo
,IndT,:)),dummyW,'method','rot2');
subplot(2,1,1)
u = inpaint_nans(u,4); % Interpolerer verdier for å erstatte NaNs
plot(t,u);
hold on
m_U1 = nanmean(u);
plot(t,ones(length(t),1)*m_U1)
ylabel('$ u + \bar{U} \ (m{\cdot}s^{-1})$', 'Interpreter', 'latex');
title('Tidsserie for vind 07.02.17 mellom 09:10-09:20, med $\overline{U}=17.7 \
m{\cdot}s^{-1}$', 'Interpreter', 'latex')
grid minor; grid on;
legend({'H08Wb' 'Middel'}, 'Location', 'best')
load('StatsResult_2017_03_10.mat')
dummyU = H.*cosd(Dir);
dummyV = H.*sind(Dir);
IndT = 1; % 10 min intervall (1:144)
IndS_anemo = 1; % Sensor (1:7)
dummyW = squeeze(W(IndS_anemo,IndT,:));
[u,v,w]=tiltCorrection(squeeze(dummyU(IndS_anemo,IndT,:)),squeeze(dummyV(IndS_anemo
,IndT,:)),dummyW,'method','rot2');
u = inpaint_nans(u,4); % Interpolerer verdier for å erstatte NaNs
subplot(2,1,2)
plot(t,u);
hold on
m_U1 = nanmean(u);
plot(t,ones(length(t),1)*m_U1)
ylabel('$ u + \bar{U} \ (m{\cdot}s^{-1})$', 'Interpreter', 'latex');
xlabel('$ t \ $ (s)', 'Interpreter', 'latex')
title('Tidsserie for vind 10.03.17 mellom 00:00-00:10, med $\overline{U}=1.5 \
m{\cdot}s^{-1}$', 'Interpreter', 'latex')
grid minor; grid on;
export_fig tidsserie_10min_subplot_maxmin_H08Wb -png -r600

% Plotting av tidsserie for 10min intervall for H08Wb 02.03.17
clearvars
load('StatsResult_2017_03_02.mat')

```

```

figure('position', [300, 300, 1000, 400]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf,'color','w'); % Hvit bakgrunn
dummyU = H.*cosd(Dir);
dummyV = H.*sind(Dir);
IndT = 1; % 10 min intervall (1:144)
IndS_anemo = 1; % Sensor (1:7)
dummyW = squeeze(W(IndS_anemo,IndT,:));
[u,v,w]=tiltCorrection(squeeze(dummyU(IndS_anemo,IndT:)),squeeze(dummyV(IndS_anemo
,IndT:)),dummyW,'method','rot2');
u = inpaint_nans(u,4); % Interpolerer verdier for å erstatte NaNs
plot(t,u);
hold on
m_U1 = nanmean(u);
plot(t,ones(length(t),1)*m_U1)
xlabel('$ t \ $ (s)', 'Interpreter', 'latex')
ylabel(' $ u + \bar{U} \ (m\dot{s}^{-1})$', 'Interpreter', 'latex');
title('Tidsserie for vind 02.03.17 mellom 00:00-00:10, med $\overline{U}=5.1 \ $
m\dot{s}^{-1}$', 'Interpreter', 'latex')
grid minor; grid on;
legend({'H08Wb' 'Middel','Location','best'})
export_fig tidsserie_10min_H08Wb_02.03(00.00-00.10) -png -r600

```

Akselerasjoner (Brotårn):

```

% AKSELERASJONER
% BROTÅRN
% Akselerasjoner for brotårn mellom 09:10-09:20 07.02.17 (SUBPLOT)
load('StatsResult_2017_02_07.mat')
clf; close all
figure('position', [300, 300, 1000, 600]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf,'color','w'); % Hvit bakgrunn
IndT = 56;
Directions = {'x' 'y' 'z' '\theta'}; % x, y og \theta
AT = [Aox_Tower(IndT,:);Aoy_Tower(IndT,:);Aoz_Tower(IndT,:);Aot_Tower_x(IndT,:)];
for ii=1:size(Directions,2)
    subplot(size(Directions,2),1,ii)
    plot(t,AT(ii,:));
    Direct = Directions{ii};
    if ii==1
        title('Tidsserier for akselerasjon 07.02.17 mellom 09:10-09:20, med
$\bar{U}=17.7 \ m\dot{s}^{-1}$', 'Interpreter', 'latex')
    end
    if ii==1 || ii==2 || ii==3
        ylabel(sprintf(' $ \ddot{r}_{T,%s} \ (m\dot{s}^{-2})$', Direct),
'Interpreter', 'latex');
    else
        ylabel(sprintf(' $ \ddot{r}_{T,%s} \ (rad\dot{s}^{-2})$', Direct),
'Interpreter', 'latex');
    end
    grid on; grid minor;
    if ii==1 || ii==2
        ylim([-0.3 0.3])
        yticks([-0.3 0 0.3])
    end
    hold on
end
xlabel('$ t \ $ (s)', 'Interpreter', 'latex')
export_fig tidsserie_AccT_max_wind_10min_07.02(09.10-09.20)_subplot -png -r600

% Akselerasjon for brotårn, horisontal retning (x) (09:10-09:20) 07.02.17,
% sammenliknet med 10.03.17 (00:00-00:10)
figure('position', [300, 300, 1000, 500]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf,'color','w'); % Hvit bakgrunn
subplot(2,1,1)
plot(t,Aox_Tower(IndT,:));
hold on
m_ATx = nanmean(Aox_Tower(IndT,:));

```

```

plot(t,ones(length(t),1)*m_ATx)
ylim([-0.3 0.3])
yticks([-0.3 0 0.3])
ylabel(sprintf(' $\ddot{r}_{T,%s} \ (m\dot{s}^{-2})$', 'x'), 'Interpreter',
'latex');
title('Tidsserie for akselerasjon 07.02.17 mellom 09:10-09:20, med $\bar{U}=17.7 \ m\dot{s}^{-1}$', 'Interpreter', 'latex')
grid on; grid minor;
subplot(2,1,2)
load('StatsResult_2017_03_10.mat')
IndT = 1;
plot(t,Aox_Tower(IndT,:));
hold on
m_ATx = nanmean(Aox_Tower(IndT,:));
plot(t,ones(length(t),1)*m_ATx)
ylim([-0.001 0.001])
yticks([-0.001 0 0.001])
ylabel(sprintf(' $\ddot{r}_{T,%s} \ (m\dot{s}^{-2})$', 'x'), 'Interpreter',
'latex');
xlabel('$ t \ (s)$', 'Interpreter', 'latex')
title('Tidsserie for akselerasjon 10.03.17 mellom 00:00-00:10, med $\bar{U}=1.5 \ m\dot{s}^{-1}$', 'Interpreter', 'latex')
grid on; grid minor;
export_fig tidsserie_AccTx_10min_max_wind_subplot -png -r600

```

Akselerasjoner (Brodekke):

```

% Subplot av alle fire sensorer for alle 4 retninger
% (07.02.17)
load('StatsResult_2017_02_07.mat')
clf; close all;
figure('position', [100, 100, 1000, 700]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf, 'color', 'w'); % Hvit bakgrunn
IndT = 56;
Nsensors = 4;
Directions = {'x' 'y' 'z' '\theta'}; % x, y, z og \theta
for jj=1:size(Directions,2)
    for ii=1:Nsensors
        AD = [squeeze(Aox(ii,IndT,:)) squeeze(Aoy(ii,IndT,:))
squeeze(Aoz(ii,IndT,:)) squeeze(Aot(ii,IndT,:))];
        subplot(size(Directions,2),1,jj)
        plot(t,AD(jj,:));
        hold on
    end
    Direct = Directions{jj};
    if jj==1
        title('Tidsserier for akselerasjon 07.02.17 mellom 09:10-09:20, med
$\bar{U}=17.7 \ m\dot{s}^{-1}$', 'Interpreter', 'latex')
    end
    if jj==1 || jj==2 || jj==3
        ylabel(sprintf(' $\ddot{r}_{D,%s} \ (m\dot{s}^{-2})$', Direct),
'Interpreter', 'latex');
        ylim([-0.7 0.7])
        yticks([-0.7 -0.35 0 0.35 0.7])
    else
        ylabel(sprintf(' $\ddot{r}_{D,%s} \ (rad\dot{s}^{-2})$', Direct),
'Interpreter', 'latex');
    end
    grid on; grid minor;
    if jj==1
        legend(AccelName, 'Location', 'best')
    end
end
end
xlabel('$ t \ (s)$', 'Interpreter', 'latex')
export_fig tidsserie_AccDxyztheta_max_wind_07.02(09.10-09.20)_subplot -png -r600
%(10.03.17)
load('StatsResult_2017_03_10.mat')

```

```

figure('position', [100, 100, 1000, 700]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf, 'color', 'w'); % Hvit bakgrunn
IndT = 1;
Nsensors = 4;
Directions = {'x' 'y' 'z' '\theta'}; % x, y og z
for jj=1:size(Directions,2)
    for ii=1:Nsensors
        AD = [squeeze(Aox(ii,IndT,:)) squeeze(Aoy(ii,IndT,:))
squeeze(Aoz(ii,IndT,:)) squeeze(Aot(ii,IndT,:))];
        subplot(size(Directions,2),1,jj)
        plot(t,AD(jj,:));
        hold on
    end
    Direct = Directions{jj};
    if jj==1
        title('Tidsserier for akselerasjon 10.03.17 mellom 00:00-00:10, med
\bar{U}=1.5 \ m{\cdot}s^{-1}$','Interpreter', 'latex')
    end
    if jj==1 || jj==2 || jj==3
        ylabel(sprintf(' \ddot{r}_{D,%s} \ (m{\cdot}s^{-2})$',Direct),
'Interpreter', 'latex');
        ylim([-0.002 0.002])
        yticks([-0.002 -0.001 0 0.001 0.002])
    else
        ylabel(sprintf(' \ddot{r}_{D,%s} \ (rad{\cdot}s^{-2})$',Direct),
'Interpreter', 'latex');
    end
    grid on; grid minor;
    if jj==1
        legend(AccelName,'Location','best')
    end
end
xlabel('$ t \ $(s)','Interpreter','latex')
export_fig tidsserie_AccDxyztheta_min_wind_10.03(00.00-00.10)_subplot -png -r600

% Brodekke, subplot alle sensorer, z-retning 07.02.17
clearvars
load('StatsResult_2017_02_07.mat')
figure('position', [100, 100, 1000, 800]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf, 'color', 'w'); % Hvit bakgrunn
IndT = 56;
Nsensors = 4;
for ii=1:Nsensors
    subplot(Nsensors,1,ii)
    plot(t,squeeze(Aoz(ii,IndT,:)));
    hold on
    m_ADz = nanmean(squeeze(Aoz(ii,IndT,:)));
    plot(t,ones(length(t),1)*m_ADz)
    A = AccelName{ii};
    ylabel(sprintf(' \ddot{r}_{D,%s} \ (m{\cdot}s^{-2}) \ (%s)$','z',A),
'Interpreter', 'latex');
    if ii==1
        title('Tidsserier for akselerasjon 07.02.17 mellom 09:10-09:20, med
\bar{U}=17.7 \ m{\cdot}s^{-1}$','Interpreter', 'latex')
    end
    grid on; grid minor;
    ylim([-0.7 0.7])
    yticks([-0.7 0 0.7])
end
xlabel('$ t \ $(s)','Interpreter','latex')
export_fig tidsserie_AccDz_max_wind_07.02(09.10-09.20)_subplot -png -r500
%
load('StatsResult_2017_03_10.mat')
figure('position', [100, 100, 1000, 800]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf, 'color', 'w'); % Hvit bakgrunn
IndT = 1;
Nsensors = 4;
for ii=1:Nsensors

```

```

        subplot(Nsensors,1,ii)
        plot(t,squeeze(Aoz(ii,IndT,:)));
        hold on
        m_ADz = nanmean(squeeze(Aoz(ii,IndT,:)));
        plot(t,ones(length(t),1)*m_ADz)
        A = AccelName{ii};
        ylabel(sprintf(' $\ddot{r}_{D,%s}$ \ (m{\dot}s^{-2}) \ (%s)$','z',A),
'Interpreter','latex');
        if ii==1
            title('Tidsserier for akselerasjon 10.03.17 mellom 00:00-00:10, med
$\bar{U}=1.5 \ m{\dot}s^{-1}$','Interpreter','latex')
            end
            grid on; grid minor;
            ylim([-0.002 0.002])
            yticks([-0.002 0 0.002])
        end
        xlabel('$ t \ $(s)','Interpreter','latex')
        export_fig tidsserie_AccDz_min_wind_10.03(00.00-00.10)_subplot -png -r500

% Vertikal akselerasjon sammenlikning (H18) med lite og mye vind
load('StatsResult_2017_02_07.mat')
figure('position',[300, 300, 1100, 500]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf,'color','w'); % Hvit bakgrunn
IndT = 56;
IndS_accel = 2;
subplot(2,1,1)
plot(t,squeeze(Aoz(IndS_accel,IndT,:)));
hold on
m_ADz = nanmean(squeeze(Aoz(IndS_accel,IndT,:)));
ylim([-0.7 0.7])
yticks([-0.7 0 0.7])
plot(t,ones(length(t),1)*m_ADz)
ylabel(sprintf(' $\ddot{r}_{D,%s}$ \ (m{\dot}s^{-2}) \ (H18)$','z'),
'Interpreter','latex');
title('Tidsserie for akselerasjon 07.02.17 mellom 09:10-09:20, med $\bar{U}=17.7 \
m{\dot}s^{-1}$','Interpreter','latex')
grid on; grid minor;
subplot(2,1,2)
load('StatsResult_2017_03_10.mat')
IndT = 1;
plot(t,squeeze(Aoz(IndS_accel,IndT,:)));
hold on
m_ADz = nanmean(squeeze(Aoz(IndS_accel,IndT,:)));
plot(t,ones(length(t),1)*m_ADz)
ylim([-0.01 0.01])
yticks([-0.01 0 0.01])
ylabel(sprintf(' $\ddot{r}_{D,%s}$ \ (m{\dot}s^{-2}) \ (H18)$','z'),
'Interpreter','latex');
xlabel('$ t \ $(s)','Interpreter','latex')
title('Tidsserie for akselerasjon 10.03.17 mellom 00:00-00:10, med $\bar{U}=1.5 \
m{\dot}s^{-1}$','Interpreter','latex')
grid on; grid minor;
export_fig tidsserie_AccDz_sammenlikning_H18 -png -r600

```

Filtrering

```

% KRAFTIG VIND
% Støyreduksjon for måledata (bandpass-filter) 0.3 Hz (VS1)
clearvars
load('StatsResult_2017_02_07.mat') %innlastning av data
clf; close all;
figure('position',[300, 300, 1000, 500]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf,'color','w'); % Hvit bakgrunn
IndT = 56; % 09:10-09:20
IndS = 2; % H18
x_T = detrend(Aox_Tower(IndT,:)); % Fjerner lineær trend
x_D = detrend(squeeze(Aoz(IndS,IndT,:))); % Fjerner lineær trend

```

```

Delta = t(2)-t(1); % Tidssteg
fN = 1/(2*Delta); % Nyquistfrekvens
fmin = 0.27; % Laveste frekvens
fmax = 0.33; % Høyeste frekvens
N = 200; % Filtreringsgrad
[b_D,a_D] = fir1(N,[fmin fmax]/fN); % Designfilter for brodekke
[b_T,a_T] = fir1(N,[fmin fmax]/fN); % Designfilter for brotårn
af_D = filtfilt(b_D,a_D,x_D); % Filtrering av brodekkets respons
af_T = filtfilt(b_T,a_T,x_T); % Filtrering av brotårnets respons
% Lineær sammenheng
P = polyfit(af_T,af_D,1);
yfit=P(1)*af_T+P(2);
% plot
plot(af_T,af_D,'*')
hold on
plot(af_T,yfit,'r-')
xlabel('$\ddot{r}_{T,x} \ (m\dot{s}^{-2})$', 'interpreter', 'latex')
ylabel('$\ddot{r}_{D,z} \ (m\dot{s}^{-2})$', 'interpreter', 'latex')
A = corrcoef(af_T,af_D); % Korrelasjon mellom responsene
title(['Korrelasjon mellom akselerasjoner, ved $\overline{U}=17.7 \ m\dot{s}^{-1}$
og $\rho_{\ddot{r}_{T,x},\ddot{r}_{D,z}} =
',num2str(A(2)),$', 'interpreter', 'latex'])
legend(['Filtrert data (bandpass: [' ,num2str(fmin), ', ', num2str(fmax), ']'
Hz)'], sprintf('$\ddot{r}_{T,x} =
%.3g\dot{\ddot{r}}_{D,z}$',1/P(1)), 'interpreter', 'latex', 'location', 'best')
grid on; grid minor;
export_fig Acc_TxDz_H18_corr_0.3Hz_max_wind_bandpass -png -r300

figure('position', [300, 300, 1000, 500]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf, 'color', 'w'); % Hvit bakgrunn
subplot(2,1,1)
plot(t,x_T,t,af_T,'r-')
ylabel('$\ddot{r}_{T,x} \ (m\dot{s}^{-2})$', 'Interpreter', 'latex');
legend({'Originalt signal', ['Filtrert [' ,num2str(fmin), ', ', num2str(fmax), ']'
Hz]}), 'location', 'best')
title('Tidsserier for akselerasjon 07.02.17 mellom 09:10-09:20, med $\bar{U}=17.7 \ m\dot{s}^{-1}$', 'Interpreter', 'latex')
grid on; grid minor;
subplot(2,1,2)
plot(t,x_D,t,af_D,'r-')
legend({'Originalt signal', ['Filtrert [' ,num2str(fmin), ', ', num2str(fmax), ']'
Hz]}), 'location', 'best')
xlabel('$ t \ (s)$', 'Interpreter', 'latex')
ylabel('$\ddot{r}_{D,z} \ (m\dot{s}^{-2})$', 'Interpreter', 'latex');
grid on; grid minor;
export_fig Acc_TxDz_H18_tidsserier_0.3Hz_max_wind_bandpass -png -r300

% Støyreduksjon for måledata (bandpass-filter) 0.4 Hz (VS2)
clearvars
load('StatsResult_2017_02_07.mat') %innlastning av data
clf; close all;
figure('position', [300, 300, 1000, 500]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf, 'color', 'w'); % Hvit bakgrunn
IndT = 56; % 09:10-09:20
IndS = 2; % H18
x_T = detrend(Aox_Tower(IndT,:))'; % Fjerner lineær trend
x_D = detrend(squeeze(Aoz(IndS,IndT,:))); % Fjerner lineær trend
Delta = t(2)-t(1); % Tidssteg
fN = 1/(2*Delta); % Nyquistfrekvens
fmin = 0.37; % Laveste frekvens
fmax = 0.43; % Høyeste frekvens
N = 200; % Filtreringsgrad
[b_D,a_D] = fir1(N,[fmin fmax]/fN); % Designfilter for brodekke
[b_T,a_T] = fir1(N,[fmin fmax]/fN); % Designfilter for brotårn
af_D = filtfilt(b_D,a_D,x_D); % Filtrering av brodekkets respons
af_T = filtfilt(b_T,a_T,x_T); % Filtrering av brotårnets respons
% Lineær sammenheng
P = polyfit(af_T,af_D,1);

```

```

yfit=P(1)*af_T+P(2);
% plot
plot(af_T,af_D,'*')
hold on
plot(af_T,yfit,'r-')
xlabel('$\ddot{r}_{T,x} \ (m\{\cdot\}s^{-2})$', 'interpreter','latex')
ylabel('$\ddot{r}_{D,z} \ (m\{\cdot\}s^{-2})$', 'interpreter','latex')
A = corrcoef(af_T,af_D); % Korrelasjon mellom responsene
title(['Korrelasjon mellom akselerasjoner, ved $\overline{U}=17.7 \ m\{\cdot\}s^{-1}$
og $\rho_{\{\ddot{r}_{T,x},\ddot{r}_{D,z}\}} =
',num2str(A(2)),$'],'interpreter','latex')
legend(['Filtrert data (bandpass: [' ,num2str(fmin),' ',num2str(fmax),' ]
Hz)'],sprintf('$\ddot{r}_{T,x} =
%.3g\{\cdot\}\ddot{r}_{D,z}$',1/P(1)),'interpreter','latex','location','best')
grid on; grid minor;
export_fig Acc_TxDz_H18_corr_0.4Hz_max_wind_bandpass -png -r300

figure('position', [300, 300, 1000, 500]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf,'color','w'); % Hvit bakgrunn
subplot(2,1,1)
plot(t,x_T,t,af_T,'r-')
ylabel('$\ddot{r}_{T,x} \ (m\{\cdot\}s^{-2})$', 'Interpreter', 'latex');
legend({'Originalt signal', ['Filtrert [' ,num2str(fmin),' ',num2str(fmax),' ]
Hz)']}, 'location', 'best')
title('Tidsserier for akselerasjon 07.02.17 mellom 09:10-09:20, med $\bar{U}=17.7 \ m\{\cdot\}s^{-1}$', 'Interpreter', 'latex')
grid on; grid minor;
subplot(2,1,2)
plot(t,x_D,t,af_D,'r-')
legend({'Originalt signal', ['Filtrert [' ,num2str(fmin),' ',num2str(fmax),' ]
Hz)']}, 'location', 'best')
xlabel('$t \ (s)$', 'Interpreter', 'latex')
ylabel('$\ddot{r}_{D,z} \ (m\{\cdot\}s^{-2})$', 'Interpreter', 'latex');
grid on; grid minor;
export_fig Acc_TxDz_H18_tidsserier_0.4Hz_max_wind_bandpass -png -r300

%% Støyreduksjon for måledata (bandpass-filter) 0.85 Hz (VS3)
clearvars
load('StatsResult_2017_02_07.mat') %innlastning av data
clf; close all;
figure('position', [300, 300, 1000, 500]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf,'color','w'); % Hvit bakgrunn
IndT = 56; % 09:10-09:20
IndS = 2; % H18
x_T = detrend(Aox_Tower(IndT,:)); % Fjerner lineær trend
x_D = detrend(squeeze(Aoz(IndS,IndT,:))); % Fjerner lineær trend
Delta = t(2)-t(1); % Tidssteg
fN = 1/(2*Delta); % Nyquistfrekvens
fmin = 0.82; % Laveste frekvens
fmax = 0.88; % Høyeste frekvens
N = 200; % Filtreringsgrad
[b_D,a_D] = fir1(N,[fmin fmax]/fN); % Designfilter for brodekke
[b_T,a_T] = fir1(N,[fmin fmax]/fN); % Designfilter for brotårn
af_D = filtfilt(b_D,a_D,x_D); % Filtrering av brodekkets respons
af_T = filtfilt(b_T,a_T,x_T); % Filtrering av brotårnets respons
% plot
plot(af_T,af_D,'*')
xlabel('$\ddot{r}_{T,x} \ (m\{\cdot\}s^{-2})$', 'interpreter','latex')
ylabel('$\ddot{r}_{D,z} \ (m\{\cdot\}s^{-2})$', 'interpreter','latex')
A = corrcoef(af_T,af_D);
title(['Korrelasjon mellom akselerasjoner, ved $\overline{U}=17.7 \ m\{\cdot\}s^{-1}$
og $\rho_{\{\ddot{r}_{T,x},\ddot{r}_{D,z}\}} =
',num2str(A(2)),$'],'interpreter','latex')
legend(['Filtrert data (bandpass: [' ,num2str(fmin),' ',num2str(fmax),' ]
Hz)'], 'location', 'best')
grid on; grid minor;
export_fig Acc_TxDz_H18_corr_0.85Hz_max_wind_bandpass -png -r300

```



```

figure('position', [300, 300, 1000, 500]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf, 'color', 'w'); % Hvit bakgrunn
subplot(2,1,1)
plot(t,x_T,t,af_T,'r-')
ylabel('$\ddot{r}_{T,x} \ (m\{\cdot\}s^{-2})$', 'Interpreter', 'latex');
legend({'Originalt signal', ['Filtrert [' , num2str(fmin), ', ', num2str(fmax), ']'
Hz] }}, 'location', 'best')
title('Tidsserier for akselerasjon 07.02.17 mellom 09:10-09:20, med $\bar{U}=17.7 \ m\{\cdot\}s^{-1}$', 'Interpreter', 'latex')
grid on; grid minor;
subplot(2,1,2)
plot(t,x_D,t,af_D,'r-')
legend({'Originalt signal', ['Filtrert [' , num2str(fmin), ', ', num2str(fmax), ']'
Hz] }}, 'location', 'best')
xlabel('$ t \ (s)$', 'Interpreter', 'latex')
ylabel('$\ddot{r}_{D,z} \ (m\{\cdot\}s^{-2})$', 'Interpreter', 'latex');
grid on; grid minor;
export_fig Acc_TxDz_H18_tidsserier_0.85Hz_max_wind_bandpass -png -r300

%% Beregning av relasjon mellom responsene (Abaqus)
load('Lysefjord_Mode.mat')
% Defined Acceleration values as Accel, Time is the steps of time
dt = 0.05; posi = 20;
acc_nt = iomega(dx_nt,dt,1,3);
acc_ddz = iomega(ddz(:,posi),dt,1,3);

%VS1
VS1 = 3;
r_VS1 = -acc_nt(VS1)/acc_ddz(VS1);

%VS2
VS2 = 4;
r_VS2 = -acc_nt(VS2)/acc_ddz(VS2);

%VS3
VS3 = 15;
r_VS3 = -acc_nt(VS3)/acc_ddz(VS3);

% SVAK VIND
% Støyreduksjon for måledata (bandpass-filter) 0.3 Hz (VS1)
clearvars
load('StatsResult_2017_03_10.mat') %innlastning av data
clf; close all;
figure('position', [300, 300, 1000, 500]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf, 'color', 'w'); % Hvit bakgrunn
IndT = 1; % 00:00-00:10
IndS = 2; % H18
x_T = detrend(Aox_Tower(IndT,:))'; % Fjerner lineær trend
x_D = detrend(squeeze(Aoz(IndS,IndT,:))); % Fjerner lineær trend
Delta = t(2)-t(1); % Tidssteg
fN = 1/(2*Delta); % Nyquistfrekvens
fmin = 0.27; % Laveste frekvens
fmax = 0.33; % Høyeste frekvens
N = 200; % Filtreringsgrad
[b_D,a_D] = fir1(N,[fmin fmax]/fN); % Designfilter for brodekke
[b_T,a_T] = fir1(N,[fmin fmax]/fN); % Designfilter for brotårn
af_D = filtfilt(b_D,a_D,x_D); % Filtrering av brodekkets respons
af_T = filtfilt(b_T,a_T,x_T); % Filtrering av brotårnets respons
% Lineær sammenheng
P = polyfit(af_T,af_D,1);
yfit=P(1)*af_T+P(2);
% plot
plot(af_T,af_D,'*')
hold on
plot(af_T,yfit,'r-')
xlabel('$\ddot{r}_{T,x} \ (m\{\cdot\}s^{-2})$', 'interpreter', 'latex')

```

```

ylabel('$\ddot{r}_{D,z} \ (m\{\cdot\}s^{-2})$', 'interpreter', 'latex')
A = corrcoef(af_T,af_D);
title(['Korrelasjon mellom akselerasjoner, ved $\overline{U}=1.5 \ m\{\cdot\}s^{-1}$
og $\rho_{\ddot{r}_{T,x},\ddot{r}_{D,z}} =
',num2str(A(2)),$'],'interpreter','latex')
legend(['Filtrert data (bandpass: [' ,num2str(fmin),' ',num2str(fmax),' ]
Hz)'],sprintf('$\ddot{r}_{T,x} =
%.3g\{\cdot\}\ddot{r}_{D,z}$',1/P(1)),'interpreter','latex','location','best')
grid on; grid minor;
export_fig Acc_TxDz_H18_corr_0.3Hz_min_wind_bandpass -png -r300

figure('position', [300, 300, 1000, 500]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf,'color','w'); % Hvit bakgrunn
subplot(2,1,1)
plot(t,x_T,t,af_T,'r-')
ylabel('$\ddot{r}_{T,x} \ (m\{\cdot\}s^{-2})$', 'Interpreter', 'latex');
legend({'Originalt signal', ['Filtrert [' ,num2str(fmin),' ',num2str(fmax),' ]
Hz)'],'location','best')
title('Tidsserier for akselerasjon 10.03.17 mellom 00:00-00:10, med $\bar{U}=1.5 \ m\{\cdot\}s^{-1}$', 'Interpreter', 'latex')
grid on; grid minor;
subplot(2,1,2)
plot(t,x_D,t,af_D,'r-')
legend({'Originalt signal', ['Filtrert [' ,num2str(fmin),' ',num2str(fmax),' ]
Hz)'],'location','best')
xlabel('$ t \ (s)$', 'Interpreter', 'latex')
ylabel('$\ddot{r}_{D,z} \ (m\{\cdot\}s^{-2})$', 'Interpreter', 'latex');
grid on; grid minor;
export_fig Acc_TxDz_H18_tidsserier_0.3Hz_min_wind_bandpass -png -r300

% Støyreduksjon for måledata (bandpass-filter) 0.4 Hz (VS2)
clearvars
load('StatsResult_2017_03_10.mat') %innlastning av data
clf; close all;
figure('position', [300, 300, 1000, 500]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf,'color','w'); % Hvit bakgrunn
IndT = 1; % 00:00-00:10
IndS = 2; % H18
x_T = detrend(Aox_Tower(IndT,:)); % Fjerner lineær trend
x_D = detrend(squeeze(Aoz(IndS,IndT,:))); % Fjerner lineær trend
Delta = t(2)-t(1); % Tidssteg
fN = 1/(2*Delta); % Nyquistfrekvens
fmin = 0.37; % Laveste frekvens
fmax = 0.43; % Høyeste frekvens
N = 200; % Filtreringsgrad
[b_D,a_D] = fir1(N,[fmin fmax]/fN); % Designfilter for brodekke
[b_T,a_T] = fir1(N,[fmin fmax]/fN); % Designfilter for brotårn
af_D = filtfilt(b_D,a_D,x_D); % Filtrering av brodekkets respons
af_T = filtfilt(b_T,a_T,x_T); % Filtrering av brotårnets respons
% plot
plot(af_T,af_D, '*')
xlabel('$\ddot{r}_{T,x} \ (m\{\cdot\}s^{-2})$', 'interpreter', 'latex')
ylabel('$\ddot{r}_{D,z} \ (m\{\cdot\}s^{-2})$', 'interpreter', 'latex')
A = corrcoef(af_T,af_D); % Korrelasjon mellom responsene
title(['Korrelasjon mellom akselerasjoner, ved $\overline{U}=1.5 \ m\{\cdot\}s^{-1}$
og $\rho_{\ddot{r}_{T,x},\ddot{r}_{D,z}} =
',num2str(A(2)),$'],'interpreter','latex')
legend(['Filtrert data (bandpass: [' ,num2str(fmin),' ',num2str(fmax),' ]
Hz)'],'location','best')
grid on; grid minor;
export_fig Acc_TxDz_H18_corr_0.4Hz_min_wind_bandpass -png -r300

figure('position', [300, 300, 1000, 500]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf,'color','w'); % Hvit bakgrunn
subplot(2,1,1)
plot(t,x_T,t,af_T,'r-')
ylabel('$\ddot{r}_{T,x} \ (m\{\cdot\}s^{-2})$', 'Interpreter', 'latex');

```

```

legend({'Originalt signal', ['Filtrert [' , num2str(fmin), ', ', num2str(fmax), ']'
Hz) ']} , 'location', 'best')
title('Tidsserier for akselerasjon 10.03.17 mellom 00:00-00:10, med  $\bar{U}=1.5 \ \
m\{\cdot\}s^{-1}$ $', 'Interpreter', 'latex')
grid on; grid minor;
subplot(2,1,2)
plot(t,x_D,t,af_D,'r-')
legend({'Originalt signal', ['Filtrert [' , num2str(fmin), ', ', num2str(fmax), ']'
Hz) ']} , 'location', 'best')
xlabel('$ t \ $ (s)', 'Interpreter', 'latex')
ylabel('$ \ddot{r}_{D,z} \ \ (m\{\cdot\}s^{-2})$ ', 'Interpreter', 'latex');
grid on; grid minor;
export_fig Acc_TxDz_H18_tidsserier_0.4Hz_min_wind_bandpass -png -r300

% Støyreduksjon for måledata (bandpass-filter) 0.85 Hz (VS3)
clearvars
load('StatsResult_2017_03_10.mat') %innlastning av data
clf; close all;
figure('position', [300, 300, 1000, 500]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf, 'color', 'w'); % Hvit bakgrunn
IndT = 1; % 00:00-00:10
IndS = 2; % H18
x_T = detrend(Aox_Tower(IndT,:)); % Fjerner lineær trend
x_D = detrend(squeeze(Aoz(IndS,IndT,:))); % Fjerner lineær trend
Delta = t(2)-t(1); % Tidssteg
fN = 1/(2*Delta); % Nyquistfrekvens
fmin = 0.82; % Laveste frekvens
fmax = 0.88; % Høyeste frekvens
N = 200; % Filtreringsgrad
[b_D,a_D] = fir1(N,[fmin fmax]/fN); % Designfilter for brodekke
[b_T,a_T] = fir1(N,[fmin fmax]/fN); % Designfilter for brotårn
af_D = filtfilt(b_D,a_D,x_D); % Filtrering av brodekkets respons
af_T = filtfilt(b_T,a_T,x_T); % Filtrering av brotårnets respons
% plot
plot(af_T,af_D,'*')
xlabel('$ \ddot{r}_{T,x} \ \ (m\{\cdot\}s^{-2})$ ', 'interpreter', 'latex')
ylabel('$ \ddot{r}_{D,z} \ \ (m\{\cdot\}s^{-2})$ ', 'interpreter', 'latex')
A = corrcoef(af_T,af_D); % Korrelasjon mellom responsene
title(['Korrelasjon mellom akselerasjoner, ved  $\overline{U}=1.5 \ \ m\{\cdot\}s^{-1}$ 
og  $\rho_{\{\ddot{r}_{T,x}, \ddot{r}_{D,z}\}} =$ 
', num2str(A(2)), '$'], 'interpreter', 'latex')
legend(['Filtrert data (bandpass: [' , num2str(fmin), ', ', num2str(fmax), ']'
Hz) ']} , 'location', 'best')
grid on; grid minor;
export_fig Acc_TxDz_H18_corr_0.85Hz_min_wind_bandpass -png -r300

figure('position', [300, 300, 1000, 500]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf, 'color', 'w'); % Hvit bakgrunn
subplot(2,1,1)
plot(t,x_T,t,af_T,'r-')
ylabel('$ \ddot{r}_{T,x} \ \ (m\{\cdot\}s^{-2})$ ', 'Interpreter', 'latex');
legend({'Originalt signal', ['Filtrert [' , num2str(fmin), ', ', num2str(fmax), ']'
Hz) ']} , 'location', 'best')
title('Tidsserier for akselerasjon 10.03.17 mellom 00:00-00:10, med  $\bar{U}=1.5 \ \
m\{\cdot\}s^{-1}$ $', 'Interpreter', 'latex')
grid on; grid minor;
subplot(2,1,2)
plot(t,x_D,t,af_D,'r-')
legend({'Originalt signal', ['Filtrert [' , num2str(fmin), ', ', num2str(fmax), ']'
Hz) ']} , 'location', 'best')
xlabel('$ t \ $ (s)', 'Interpreter', 'latex')
ylabel('$ \ddot{r}_{D,z} \ \ (m\{\cdot\}s^{-2})$ ', 'Interpreter', 'latex');
grid on; grid minor;
export_fig Acc_TxDz_H18_tidsserier_0.85Hz_min_wind_bandpass -png -r300

```

Responsspektra:

```
% BROTÅRN
% Akselerasjonsspektra for 07.02 for brotårn i xy og theta-retninger,
% sammenliknet med Abaqus-modell
load('StatsResult_2017_02_07.mat'); load('Tower_U17_C4.mat'); % Innlasting av data
clf; close all;
figure('position', [100, 100, 1000, 700]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf,'color','w'); % Hvit bakgrunn
fs = 10; % Samplingsfrekvens, f=1/(t(2)-t(1));
fs_Ab = 20; % Samplingsfrekvens (Abaqus)
m = 200; % AR filter grad
NFFT = 4096; % Antall DFT punkter, [] = 254
IndT = 56; % 09:10-09:20
Directions = {'x' 'y' '\theta'}; % x, y og \theta
dt=0.05; % Tidssteg
Aox_Tower_Ab = diff(U_x,2)./(dt^2); Aoy_Tower_Ab = diff(U_y,2)./(dt^2);
Aot_Tower_x_Ab = diff(U_rx,2)./(dt^2); % Deriverer forskyvningen 2 ganger
AT_Ab = [detrend(Aox_Tower_Ab) detrend(Aoy_Tower_Ab) detrend(Aot_Tower_x_Ab)];
AT =
[detrend(Aox_Tower(IndT,:));detrend(Aoy_Tower(IndT,:));detrend(Aot_Tower_x(IndT,:))
];
S = zeros(2049,3); S_Ab = zeros(2049,3); % Startmatrise
f = zeros(2049,3); f_Ab = zeros(2049,3); % Startmatrise
for jj=1:size(Directions,2)
    [S(:,jj),f(:,jj)] = pburg(AT(jj,:),m,NFFT,fs); % Power spektra ved Burgs
metode
    [S_Ab(:,jj),f_Ab(:,jj)] = pburg(AT_Ab(jj,:),m,NFFT,fs_Ab); % Power spektra ved
Burgs metode
    subplot(size(Directions,2),1,jj)
    plot(f(:,jj),S(:,jj));
    hold on
    plot(f_Ab(:,jj),S_Ab(:,jj))
    Direct = Directions{jj};
    if jj==1
        title('Akselerasjonsspektra med  $\overline{U}=17.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,
sammenliknet med Abaqus-modell med  $\overline{U}=17.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ','Interpreter', 'latex')
    end
    if jj==1 || jj==2
        ylabel(sprintf('  $S_{\ddot{r}_{T,s}}$  \ (m^2\cdot\text{s}^{-3})$','Direct),
'Interpreter', 'latex');
    else
        ylabel(sprintf('  $S_{\ddot{r}_{T,s}}$  \ (rad^2\cdot\text{s}^{-3})$','Direct),
'Interpreter', 'latex');
    end
    if jj==2
        legend({'Målt','Beregnet'},'Location','best')
    end
    grid on; grid minor;
    xlim([0 fs/2]) % Begrensning på x-akse
    hold on
end
xlabel('$f \ $(Hz)','Interpreter','latex')
export_fig PST_AccTxytheta -png -r600

% Logaritmisk plot
figure('position', [100, 100, 1000, 700]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf,'color','w'); % Hvit bakgrunn
for jj=1:size(Directions,2)
    subplot(size(Directions,2),1,jj)
    semilogy(f(:,jj),S(:,jj));
    hold on
    semilogy(f_Ab(:,jj),S_Ab(:,jj));
    Direct = Directions{jj};
    if jj==1
```

```

        title('Akselerasjonsspektra med  $\overline{U}=17.7 \text{ m}\{\cdot\}s^{-1}$ ,
sammenliknet med Abaqus-modell med  $\overline{U}=17.0 \text{ m}\{\cdot\}s^{-1}$ }',
'Interpreter', 'latex')
    end
    if jj==1 || jj==2
        ylabel(sprintf('  $S_{\{\cdot\cdot\{r\}_T,\{s\}\}} \backslash \backslash (m^2\{\cdot\}s^{-3})$ }',Direct),
'Interpreter', 'latex');
    else
        ylabel(sprintf('  $S_{\{\cdot\cdot\{r\}_T,\{s\}\}} \backslash \backslash (rad^2\{\cdot\}s^{-3})$ }',Direct),
'Interpreter', 'latex');
    end
    if jj==2
        legend({'Målt','Beregnet'},'Location','best')
    end
    grid on; grid minor;
    xlim([0 fs/2]) % Begrensning på x-akse
    hold on
end
xlabel('$f \text{ (Hz)}$', 'Interpreter', 'latex')
export_fig PST_AccTxytheta_semilogy -png -r600

% Svak vind (10.03.17)
load('StatsResult_2017_02_07.mat'); load('Tower_U5_C4.mat') % Innlasting av data
clf; close all;
figure('position', [100, 100, 1000, 700]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf, 'color', 'w'); % Hvit bakgrunn
fs = 10; % Samplingsfrekvens, f=1/(t(2)-t(1));
fs_Ab = 20; % Samplingsfrekvens (Abaqus)
m = 200; % AR filter grad
NFFT = 4096; % Antall DFT punkter, [] = 254
IndT = 1; % 00:00-00:10
Directions = {'x' 'y' '\theta'}; % x, y og \theta
dt=0.05; % Tidssteg (Abaqus)
Aox_Tower_Ab = diff(U_x,2)./(dt^2); Aoy_Tower_Ab = diff(U_y,2)./(dt^2);
Aot_Tower_x_Ab = diff(U_rx,2)./(dt^2); % Deriverer forskyvningen 2 ganger
AT_Ab = [detrend(Aox_Tower_Ab) detrend(Aoy_Tower_Ab) detrend(Aot_Tower_x_Ab)];
AT =
[detrend(Aox_Tower(IndT,:));detrend(Aoy_Tower(IndT,:));detrend(Aot_Tower_x(IndT,:))
];
S = zeros(2049,3); S_Ab = zeros(2049,3); % Startmatrise
f = zeros(2049,3); f_Ab = zeros(2049,3); % Startmatrise
for jj=1:size(Directions,2)
    [S(:,jj),f(:,jj)] = pburg(AT(jj,:),m,NFFT,fs); % Power spektra ved Burgs
metode
    [S_Ab(:,jj),f_Ab(:,jj)] = pburg(AT_Ab(jj,:),m,NFFT,fs_Ab); % Power spektra ved
Burgs metode
    subplot(size(Directions,2),1,jj)
    plot(f(:,jj),S(:,jj));
    hold on
    plot(f_Ab(:,jj),S_Ab(:,jj))
    Direct = Directions{jj};
    if jj==1
        title('Akselerasjonsspektra med  $\overline{U}=1.5 \text{ m}\{\cdot\}s^{-1}$ ,
sammenliknet med Abaqus-modell med  $\overline{U}=5.0 \text{ m}\{\cdot\}s^{-1}$ }',
'Interpreter', 'latex')
    end
    if jj==1 || jj==2
        ylabel(sprintf('  $S_{\{\cdot\cdot\{r\}_T,\{s\}\}} \backslash \backslash (m^2\{\cdot\}s^{-3})$ }',Direct),
'Interpreter', 'latex');
    else
        ylabel(sprintf('  $S_{\{\cdot\cdot\{r\}_T,\{s\}\}} \backslash \backslash (rad^2\{\cdot\}s^{-3})$ }',Direct),
'Interpreter', 'latex');
    end
    if jj==2
        legend({'Målt','Beregnet'},'Location','best')
    end
    grid on; grid minor;
    xlim([0 fs/2]) % Begrensning på x-akse

```

```

    hold on
end
xlabel('$f \ $(Hz)', 'Interpreter', 'latex')
export_fig PST_AccTxytheta_min_wind -png -r600

% Logaritmisk plot
figure('position', [100, 100, 1000, 700]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf, 'color', 'w'); % Hvit bakgrunn
for jj=1:size(Directions,2)
    subplot(size(Directions,2),1,jj)
    semilogy(f(:,jj),S(:,jj));
    hold on
    semilogy(f_Ab(:,jj),S_Ab(:,jj));
    Direct = Directions{jj};
    if jj==1
        title('Akselerasjonsspektra med  $\overline{U}=1.5 \text{ m}\{\cdot\}s^{-1}$ ,
sammenliknet med Abaqus-modell med  $\overline{U}=5.0 \text{ m}\{\cdot\}s^{-1}$ '), 'Interpreter', 'latex')
    end
    if jj==1 || jj==2
        ylabel(sprintf(' $ S_{\ddot{r}}_{T,%s} \ (m^2\{\cdot\}s^{-3})$', Direct),
'Interpreter', 'latex');
    else
        ylabel(sprintf(' $ S_{\ddot{r}}_{T,%s} \ (rad^2\{\cdot\}s^{-3})$', Direct),
'Interpreter', 'latex');
    end
    if jj==2
        legend({'Målt', 'Beregnet'}, 'Location', 'best')
    end
    grid on; grid minor;
    xlim([0 fs/2]) % Begrensning på x-akse
    hold on
end
xlabel('$f \ $(Hz)', 'Interpreter', 'latex')
export_fig PST_AccTxytheta_semilogy_min_wind -png -r600

% BRODEKKE
% Akselerasjonsspektra for 07.02 for brodekke i lateral retning(x), vertikal
retning(z) og torsjonal retning(theta)
% alle fire akselerometere.
load('StatsResult_2017_02_07.mat');
clf; close all;
figure('position', [100, 100, 1000, 700]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf, 'color', 'w'); % Hvit bakgrunn
fs = 10; % Samplingsfrekvens, f=1/(t(2)-t(1));
m = 200; % AR filter grad
NFFT = 4096; % Antall DFT punkter, [] = 254
IndT = 56; % 09:10-09:20
Directions = {'x' 'z' '\theta'}; % x, z og \theta
S = zeros(2049,3,4); f = zeros(2049,3,4); % Startmastrise
Nsensors = 4; % Antall akselerometre
for jj=1:size(Directions,2)
    for ii=1:Nsensors
        AD = [detrend(squeeze(Aox(ii, IndT, :))) detrend(squeeze(Aoz(ii, IndT, :)))
detrend(squeeze(Aot(ii, IndT, :)))];
        [S(:,jj,ii),f(:,jj,ii)] = pburg(AD(:,jj),m,NFFT,fs); % Power spektra ved
Burgs metode
        subplot(size(Directions,2),1,jj)
        plot(f(:,jj,ii),S(:,jj,ii));
        Direct = Directions{jj};
        hold on
    end
    if jj==1
        title('Akselerasjonsspektra 07.02.17 mellom 09:10-09:20, med
 $\overline{U}=17.7 \text{ m}\{\cdot\}s^{-1}$ '), 'Interpreter', 'latex')
    end
    if jj==1 || jj==2

```

```

        ylabel(sprintf(' $ S_{\ddot{r}}_{D,%s} \ (m^2{\cdot}s^{-3})$',Direct),
'Interpreter', 'latex');
    else
        ylabel(sprintf(' $ S_{\ddot{r}}_{D,%s} \ (rad^2{\cdot}s^{-3})$',Direct),
'Interpreter', 'latex');
    end
    grid on; grid minor;
    if jj==1
        legend(AccelName,'Location','best')
    end
end
xlabel('$f \ $(Hz)','Interpreter','latex')
export_fig PST_AccDxztheta_07.02(09.10-09.20) -png -r600

% Logaritmisk plot
figure('position', [100, 100, 1000, 700]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf,'color','w'); % Hvit bakgrunn
for jj=1:size(Directions,2)
    for ii=1:Nsensors
        subplot(size(Directions,2),1,jj)
        semilogy(f(:,jj,ii),S(:,jj,ii));
        hold on
    end
    Direct = Directions{jj};
    if jj==1
        title('Logaritmisk akselerasjonsspektra 07.02.17 mellom 09:10-09:20, med
\overline{U}=17.7 \ m{\cdot}s^{-1}$','Interpreter', 'latex')
    end
    if jj==1 || jj==2
        ylabel(sprintf(' $ S_{\ddot{r}}_{D,%s} \ (m^2{\cdot}s^{-3})$',Direct),
'Interpreter', 'latex');
        ylim([1e-7 1e1]) % Begrensning y-akse
        yticks([1e-7 1e-3 1e1])
    else
        ylabel(sprintf(' $ S_{\ddot{r}}_{D,%s} \ (rad^2{\cdot}s^{-3})$',Direct),
'Interpreter', 'latex');
    end
    grid on; grid minor;
    if jj==1
        legend(AccelName,'Location','best')
    end
end
xlabel('$f \ $(Hz)','Interpreter','latex')
export_fig PST_AccDxztheta_semilogy_07.02(09.10-09.20) -png -r600

% Akselerasjonsspektra for 10.03 for brodekke i lateral retning(x), vertikal
retning(z) og torsjonal om vertikal akse(theta)
% alle fire akselerometer
clearvars
load('StatsResult_2017_03_10.mat')
figure('position', [100, 100, 1000, 700]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf,'color','w'); % Hvit bakgrunn
fs = 10; % Samplingsfrekvens, f=1/(t(2)-t(1));
m = 200; % AR filter grad
NFFT = 4096; % Antall DFT punkter, [] = 254
IndT = 1; % 00:00-00:10
Directions = {'x' 'z' '\theta'}; % x, z og \theta
S = zeros(2049,3,4); f = zeros(2049,3,4); % Startmastrise
Nsensors = 4; % Antall akselerometre
for jj=1:size(Directions,2)
    for ii=1:Nsensors
        AD = [detrend(squeeze(Aox(ii,IndT,:))) detrend(squeeze(Aoz(ii,IndT,:)))]
detrend(squeeze(Aot(ii,IndT,:)))]];
        [S(:,jj,ii),f(:,jj,ii)] = pburg(AD(:,jj),m,NFFT,fs); % Power spektra ved
Burgs metode
        subplot(size(Directions,2),1,jj)
        plot(f(:,jj,ii),S(:,jj,ii));
        Direct = Directions{jj};

```

```

        hold on
    end
    if jj==1
        title('Akselerasjonsspektra 10.03.17 mellom 00:00-00:10, med
\overline{U}=1.5 \ m{\cdot}s^{-1}$','Interpreter', 'latex')
    end
    if jj==1 || jj==2
        ylabel(sprintf(' $ S_{\ddot{r}}_{D,%s} \ (m^2{\cdot}s^{-3})$','Direct),
'Interpreter', 'latex');
    else
        ylabel(sprintf(' $ S_{\ddot{r}}_{D,%s} \ (rad^2{\cdot}s^{-3})$','Direct),
'Interpreter', 'latex');
    end
    grid on; grid minor;
    if jj==1
        legend(AccelName, 'Location', 'best')
    end
end
xlabel('$f \ $(Hz)','Interpreter','latex')
export_fig PST_AccDxztheta_10.03(00.00-00.10) -png -r600

% Logaritmisk plot
figure('position', [100, 100, 1000, 700]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf, 'color', 'w'); % Hvit bakgrunn
for jj=1:size(Directions,2)
    for ii=1:Nsensors
        subplot(size(Directions,2),1,jj)
        semilogy(f(:,jj,ii),S(:,jj,ii));
        hold on
    end
    Direct = Directions{jj};
    if jj==1
        title('Logaritmisk akselerasjonsspektra 10.03.17 mellom 00:00-00:10, med
\overline{U}=1.5 \ m{\cdot}s^{-1}$','Interpreter', 'latex')
    end
    if jj==1 || jj==2
        ylabel(sprintf(' $ S_{\ddot{r}}_{D,%s} \ (m^2{\cdot}s^{-3})$','Direct),
'Interpreter', 'latex');
    else
        ylabel(sprintf(' $ S_{\ddot{r}}_{D,%s} \ (rad^2{\cdot}s^{-3})$','Direct),
'Interpreter', 'latex');
    end
    grid on; grid minor;
    if jj==1
        legend(AccelName, 'Location', 'best')
    end
end
xlabel('$f \ $(Hz)','Interpreter','latex')
export_fig PST_AccDxztheta_semilogy_10.03(00.00-00.10) -png -r600

% Akselerasjonsspektra for 07.02 for brodekke i alle retninger for
% H09 akselerometer. For 0-2Hz
load('StatsResult_2017_02_07.mat')
load('TEST_U17.mat') % Innlasting av Abaqus-data
clf; close all;
figure('position', [100, 100, 1000, 700]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf, 'color', 'w'); % Hvit bakgrunn
fs = 10; % Samplingsfrekvens, f=1/(t(2)-t(1));
fs_Ab = 20; % Samplingsfrekvens (Abaqus)
m = 200; % AR filter grad
NFFT = 4096; % Antall DFT punkter, [] = 254
IndT = 56; % 09:10-09:30
Directions = {'x' 'z' '\theta'}; % x, z og \theta
S = zeros(2049,3,4); S_Ab = zeros(2049,3); % Startmatrise
f = zeros(2049,3,4); f_Ab = zeros(2049,3); % Startmatrise
IndS = 1; % H09
dt=0.05; % tidssteg (Abaqus)
posi = 11; % H09

```



```

Aox_Ab = diff(U_y,2)./(dt^2); Aoz_Ab = diff(U_z,2)./(dt^2); Aot_Ab =
diff(U_rx,2)./(dt^2); % Deriverer forskyvningen 2 ganger
AD_Ab = [detrend(Aox_Ab(:,posi)) detrend(Aoz_Ab(:,posi)) detrend(Aot_Ab(:,posi))];
AD = [detrend(squeeze(Aox(IndS,IndT,:))) detrend(squeeze(Aoz(IndS,IndT,:)))
detrend(squeeze(Aot(IndS,IndT,:)))];
for jj=1:size(Directions,2)
    [S(:,jj,IndS),f(:,jj,IndS)] = pburg(AD(:,jj),m,NFFT,fs); % Power spektra ved
Burgs metode
    [S_Ab(:,jj),f_Ab(:,jj)] = pburg(AD_Ab(:,jj),m,NFFT,fs_Ab); % Power spektra ved
Burgs metode
    hold on
end
for jj=1:size(Directions,2)
    subplot(size(Directions,2),1,jj)
    semilogy(f(:,jj,IndS),S(:,jj,IndS));
    hold on
    semilogy(f_Ab(:,jj),S_Ab(:,jj));
    Direct = Directions{jj};
    if jj==1
        title('Logaritmisk akselerasjonsspektra 07.02.17 mellom 09:10-09:20, med
 $\overline{U}=17.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  for H09','Interpreter','latex')
    end
    if jj==1 || jj==2
        ylabel(sprintf('  $S_{\ddot{r}_D}$  \ (m2·s-3)$',Direct),
'Interpreter','latex');
        ylim([1e-7 1e1]) % Begrensning y-akse
        yticks([1e-7 1e-3 1e1])
    else
        ylabel(sprintf('  $S_{\ddot{r}_D}$  \ (rad2·s-3)$',Direct),
'Interpreter','latex');
        ylim([1e-9 1e-1]) % Begrensning y-akse
        yticks([1e-9 1e-5 1e-1])
    end
    grid on; grid minor;
    if jj==1
        legend('Målt','Beregnet','Location','best')
    end
    xlim([0 fs/5]) % Begrensning x-akse
end
xlabel('$f \ $ (Hz)','Interpreter','latex')
export_fig PST_AccDxztheta_semilogy_07.02(09.10-09.20)_H09_0-2Hz -png -r600

% Akselerasjonsspektra for 10.03 for brodekke i alle retninger for
% H09 akselerometer.
clearvars
load('StatsResult_2017_02_10.mat')
load('TEST_U5.mat') % Innlasting av Abaqus-data
figure('position',[100,100,1000,700]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf,'color','w'); % Hvit bakgrunn
fs = 10; % Samplingsfrekvens, f=1/(t(2)-t(1));
fs_Ab = 20; % Samplingsfrekvens (Abaqus)
m = 200; % AR filter grad
NFFT = 4096; % Antall DFT punkter, [] = 254
IndT = 1; % 00:00-00:10
Directions = {'x' 'z' '\theta'}; % x, z og \theta
S = zeros(2049,3,4); S_Ab = zeros(2049,3); % Startmatrise
f = zeros(2049,3,4); f_Ab = zeros(2049,3); % Startmatrise
IndS = 1; % H09
dt=0.05; % tidssteg (Abaqus)
posi = 11; % H09
Aox_Ab = diff(U_y,2)./(dt^2); Aoz_Ab = diff(U_z,2)./(dt^2); Aot_Ab =
diff(U_rx,2)./(dt^2); % Derivere forskyvningen 2 ganger
AD_Ab = [detrend(Aox_Ab(:,posi)) detrend(Aoz_Ab(:,posi)) detrend(Aot_Ab(:,posi))];
AD = [detrend(squeeze(Aox(IndS,IndT,:))) detrend(squeeze(Aoz(IndS,IndT,:)))
detrend(squeeze(Aot(IndS,IndT,:)))];
for jj=1:size(Directions,2)
    [S(:,jj,IndS),f(:,jj,IndS)] = pburg(AD(:,jj),m,NFFT,fs); % Power spektra ved
Burgs metode

```

```

[S_Ab(:,jj),f_Ab(:,jj)] = pburg(AD_Ab(:,jj),m,NFFT,fs_Ab); % Power spektra ved
Burgs metode
hold on
end
for jj=1:size(Directions,2)
subplot(size(Directions,2),1,jj)
semilogy(f(:,jj,IndS),S(:,jj,IndS));
hold on
semilogy(f_Ab(:,jj),S_Ab(:,jj));
Direct = Directions{jj};
if jj==1
title('Logaritmisk akselerasjonsspektra 10.03.17 mellom 00:00-00:10, med
 $\overline{U}=1.5 \ m\{\cdot\}s^{-1}$  for H09','Interpreter','latex')
end
if jj==1 || jj==2
ylabel(sprintf('  $S_{\ddot{r}}_{D,s}$  \ (m2\cdot s-3)$','Direct),
'Interpreter','latex');
ylim([1e-9 1e-1]) % Begrensning y-akse
yticks([1e-9 1e-5 1e-1])
else
ylabel(sprintf('  $S_{\ddot{r}}_{D,s}$  \ (rad2\cdot s-3)$','Direct),
'Interpreter','latex');
ylim([1e-12 1e-3]) % Begrensning y-akse
yticks([1e-12 1e-7 1e-3])
end
grid on; grid minor;
if jj==1
legend('Målt','Beregnet','Location','best')
end
xlim([0 fs/5]) % Begrensning x-akse
end
xlabel('$f \ $(Hz)','Interpreter','latex')
export_fig PST_AccDxztheta_semilogy_10.03(00.00-00.10)_H09_0-2Hz -png -r600

% H18 akselerometer.
load('StatsResult_2017_02_07.mat')
load('TEST_U17.mat') % Innlasting av Abaqus-data
clf; close all;
figure('position',[100, 100, 1000, 700]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf,'color','w'); % Hvit bakgrunn
fs = 10; % Samplingsfrekvens, f=1/(t(2)-t(1));
fs_Ab = 20; % Samplingsfrekvens (Abaqus)
m = 200; % AR filter grad
NFFT = 4096; % Antall DFT punkter, [] = 254
IndT = 56; % 09:10-09:30
Directions = {'x' 'z' '\theta'}; % x, z og \theta
S = zeros(2049,3,4); S_Ab = zeros(2049,3); % Startmatrise
f = zeros(2049,3,4); f_Ab = zeros(2049,3); % Startmatrise
IndS = 2; % H18
dt=0.05; % tidssteg (Abaqus)
posi = 20; % H18
Aox_Ab = diff(U_y,2)./(dt^2); Aoz_Ab = diff(U_z,2)./(dt^2); Aot_Ab =
diff(U_rx,2)./(dt^2); % Derivere forskyvning 2 ganger
AD_Ab = [detrend(Aox_Ab(:,posi)) detrend(Aoz_Ab(:,posi)) detrend(Aot_Ab(:,posi))];
AD = [detrend(squeeze(Aox(IndS,IndT,:))) detrend(squeeze(Aoz(IndS,IndT,:)))
detrend(squeeze(Aot(IndS,IndT,:)))];
for jj=1:size(Directions,2)
[S(:,jj,IndS),f(:,jj,IndS)] = pburg(AD(:,jj),m,NFFT,fs); % Power spektra ved
Burgs metode
[S_Ab(:,jj),f_Ab(:,jj)] = pburg(AD_Ab(:,jj),m,NFFT,fs_Ab); % Power spektra ved
Burgs metode
hold on
end
for jj=1:size(Directions,2)
subplot(size(Directions,2),1,jj)
semilogy(f(:,jj,IndS),S(:,jj,IndS));
hold on
semilogy(f_Ab(:,jj),S_Ab(:,jj));

```

```

Direct = Directions{jj};
if jj==1
    title('Logaritmsk akselerasjonsspektra 07.02.17 mellom 09:10-09:20, med
\overline{U}=17.7 \ m{\cdot}s^{-1}$ for H18','Interpreter', 'latex')
end
if jj==1 || jj==2
    ylabel(sprintf(' $ S_{\ddot{r}}_{D,%s} \ \ (m^2{\cdot}s^{-3})$',Direct),
'Interpreter', 'latex');
    ylim([1e-7 1e1]) % Begrensning y-akse
    yticks([1e-7 1e-3 1e1])
else
    ylabel(sprintf(' $ S_{\ddot{r}}_{D,%s} \ \ (rad^2{\cdot}s^{-3})$',Direct),
'Interpreter', 'latex');
    ylim([1e-9 1e-1]) % Begrensning y-akse
    yticks([1e-9 1e-5 1e-1])
end
grid on; grid minor;
if jj==1
    legend('Målt','Beregnet','Location','best')
end
xlim([0 fs/5]) % Begrensning x-akse
end
xlabel('$f \ $(Hz)','Interpreter','latex')
export_fig PST_AccDxztheta_semiology_07.02(09.10-09.20)_H18_0-2Hz -png -r600

% Akselerasjonsspektra for 10.03 for brodekke i alle retninger for
% H18 akselerometer.
clearvars
load('StatsResult_2017_03_10.mat')
load('TEST_U5.mat') % Innlasting av Abaqus-data
figure('position', [100, 100, 1000, 700]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf,'color','w'); % Hvit bakgrunn
fs = 10; % Samplingsfrekvens, f=1/(t(2)-t(1));
fs_Ab = 20; % Samplingsfrekvens (Abaqus)
m = 200; % AR filter grad
NFFT = 4096; % Antall DFT punkter, [] = 254
IndT = 1; % 00:00-00:10
Directions = {'x' 'z' '\theta'}; % x, z og \theta
S = zeros(2049,3,4); S_Ab = zeros(2049,3); % Startmatrise
f = zeros(2049,3,4); f_Ab = zeros(2049,3); % Startmatrise
IndS = 2; % H18
dt=0.05; % tidssteg (Abaqus)
posi = 20; % H18
Aox_Ab = diff(U_y,2)./(dt^2); Aoz_Ab = diff(U_z,2)./(dt^2); Aot_Ab =
diff(U_rx,2)./(dt^2); % Derivere forsyvning 2 ganger
AD_Ab = [detrend(Aox_Ab(:,posi)) detrend(Aoz_Ab(:,posi)) detrend(Aot_Ab(:,posi))];
AD = [detrend(squeeze(Aox(IndS,IndT,:))) detrend(squeeze(Aoz(IndS,IndT,:)))
detrend(squeeze(Aot(IndS,IndT,:)))];
for jj=1:size(Directions,2)
    [S(:,jj,IndS),f(:,jj,IndS)] = pburg(AD(:,jj),m,NFFT,fs); % Power spektra ved
Burgs metode
    [S_Ab(:,jj),f_Ab(:,jj)] = pburg(AD_Ab(:,jj),m,NFFT,fs_Ab); % Power spektra ved
Burgs metode
    hold on
end
for jj=1:size(Directions,2)
    subplot(size(Directions,2),1,jj)
    semilogy(f(:,jj,IndS),S(:,jj,IndS));
    hold on
    semilogy(f_Ab(:,jj),S_Ab(:,jj));
    Direct = Directions{jj};
    if jj==1
        title('Logaritmsk akselerasjonsspektra 10.03.17 mellom 00:00-00:10, med
\overline{U}=1.5 \ m{\cdot}s^{-1}$ for H18','Interpreter', 'latex')
    end
    if jj==1 || jj==2
        ylabel(sprintf(' $ S_{\ddot{r}}_{D,%s} \ \ (m^2{\cdot}s^{-3})$',Direct),
'Interpreter', 'latex');
    end
end

```

```

        ylim([1e-12 1e-1]) % Begrensning y-akse
        yticks([1e-12 1e-6 1e-1])
    else
        ylabel(sprintf(' $ S_{\ddot{r}}_{D,%s} \ (rad^2{\dot{s}}^{-3})$',Direct),
'Interpreter', 'latex');
        ylim([1e-12 1e-3]) % Begrensning y-akse
        yticks([1e-12 1e-7 1e-3])
    end
    grid on; grid minor;
    if jj==1
        legend('Målt','Beregnet','Location','best')
    end
    xlim([0 fs/5]) % Begrensning x-akse
end
xlabel('$f \ $(Hz)','Interpreter','latex')
export_fig PST_AccDxztheta_semilogy_10.03(00.00-00.10)_H18_0-2Hz -png -r600

% Sammenlikning av spektra for brotårn (x-retning) og brodekke (z-retning) for
kraftig vind (07.02.17)
load('StatsResult_2017_02_07.mat');
clf; close all;
figure('position', [100, 100, 1000, 400]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf,'color','w'); % Hvit bakgrunn
fs = 10; % Samplingsfrekvens, f=1/(t(2)-t(1));
m = 200; % AR filter grad
NFFT = 4096; % Antall DFT punkter, [] = 254
IndT = 56; % 09:10-09:20
AT = detrend(Aox_Tower(IndT,:));
Nsensors = 2; % 2 akselerometre
S_D = zeros(2049,1,2); f_D = zeros(2049,1,2); % Startmatrise
for ii=1:Nsensors
    AD = detrend(squeeze(Aoz(ii,IndT,:)));
    [S_D(:,1,ii),f_D(:,1,ii)] = pburg(AD,m,NFFT,fs); % Power spektra ved Burgs
metode
    semilogy(f_D(:,1,ii),S_D(:,1,ii))
    hold on
end
hold on
[S_T,f_T] = pburg(AT,m,NFFT,fs); % Power spektra ved Burgs metode
semilogy(f_T,S_T)
title('Logaritmisk akselerasjonsspektra 07.02.17 mellom 09:10-09:20, med
 $\overline{U}=17.7 \ m{\dot{s}}^{-1}$ ','Interpreter', 'latex')
ylabel(' $ S_{\ddot{r}} \ (m^2{\dot{s}}^{-3})$', 'Interpreter', 'latex');
xlabel('$f \ $(Hz)','Interpreter','latex')
legend({'AccelName{1:Nsensors}','Brotårn'})
grid on
grid minor
export_fig PST_AccTxDz_sammenlikning_max_wind -png -r600

% Svak vind (10.03.17)
figure('position', [100, 100, 1000, 400]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf,'color','w'); % Hvit bakgrunn
fs = 10; % Samplingsfrekvens, f=1/(t(2)-t(1));
m = 200; % AR filter grad
NFFT = 4096; % Antall DFT punkter, [] = 254
IndT = 1; % 00:00-00:10
AT = detrend(Aox_Tower(IndT,:));
Nsensors = 2; % H09 og H18
S_D = zeros(2049,1,2); f_D = zeros(2049,1,2); % Startmatrise
for ii=1:Nsensors
    AD = detrend(squeeze(Aoz(ii,IndT,:)));
    [S_D(:,1,ii),f_D(:,1,ii)] = pburg(AD,m,NFFT,fs); % Power spektra ved Burgs
metode
    semilogy(f_D(:,1,ii),S_D(:,1,ii))
    hold on
end
hold on
[S_T,f_T] = pburg(AT,m,NFFT,fs); % Power spektra ved Burgs metode

```

```

semilogy(f_T,S_T)
title('Logaritmisk akselerasjonsspektra 10.03.17 mellom 00:00-00:10, med
 $\overline{U}=1.5 \text{ m}\{\cdot\}s^{-1}$ ','Interpreter','latex')
ylabel('  $S_{\ddot{r}} \ \ (m^2\{\cdot\}s^{-3})$ ','Interpreter','latex');
xlabel('$f \ $ (Hz)','Interpreter','latex')
legend({AccelName{1:Nsensors},'Brotårn'})
grid on ; grid minor;
export_fig PST_AccTxDz_sammenlikning_min_wind -png -r600

% Sammenlikning av spektra for brotårn (theta-retning) og brodekke (theta-retning)
for kraftig vind (07.02.17)
load('StatsResult_2017_02_07.mat');
clf; close all;
figure('position', [100, 100, 1000, 400]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf,'color','w'); % Hvit bakgrunn
fs = 10; % Samplingsfrekvens, f=1/(t(2)-t(1));
m = 200; % AR filter grad
NFFT = 4096; % Antall DFT punkter, [] = 254
IndT = 56; % 09:10-09:20
AT = detrend(Aot_Tower_x(IndT,:));
Nsensors = 2; % 2 akselerometre
S_D = zeros(2049,1,2); f_D = zeros(2049,1,2); % Startmatrise
for ii=1:Nsensors
    AD = detrend(squeeze(Aot(ii,IndT,:)));
    [S_D(:,1,ii),f_D(:,1,ii)] = pburg(AD,m,NFFT,fs); % Power spektra ved Burgs
metode
    semilogy(f_D(:,1,ii),S_D(:,1,ii))
    hold on
end
hold on
[S_T,f_T] = pburg(AT,m,NFFT,fs); % Power spektra ved Burgs metode
semilogy(f_T,S_T)
title('Logaritmisk akselerasjonsspektra 07.02.17 mellom 09:10-09:20, med
 $\overline{U}=17.7 \text{ m}\{\cdot\}s^{-1}$ ','Interpreter','latex')
ylabel('  $S_{\ddot{r}} \ \ (\text{rad}^2\{\cdot\}s^{-3})$ ','Interpreter','latex');
xlabel('$f \ $ (Hz)','Interpreter','latex')
legend({AccelName{1:Nsensors},'Brotårn'})
grid on
grid minor
export_fig PST_AccTthetaDtheta_sammenlikning_max_wind -png -r600

% Svak vind (10.03.17)
figure('position', [100, 100, 1000, 400]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf,'color','w'); % Hvit bakgrunn
fs = 10; % Samplingsfrekvens, f=1/(t(2)-t(1));
m = 200; % AR filter grad
NFFT = 4096; % Antall DFT punkter, [] = 254
IndT = 1; % 00:00-00:10
AT = detrend(Aot_Tower_x(IndT,:));
Nsensors = 2; % H09 og H18
S_D = zeros(2049,1,2); f_D = zeros(2049,1,2); % Startmatrise
for ii=1:Nsensors
    AD = detrend(squeeze(Aot(ii,IndT,:)));
    [S_D(:,1,ii),f_D(:,1,ii)] = pburg(AD,m,NFFT,fs); % Power spektra ved Burgs
metode
    semilogy(f_D(:,1,ii),S_D(:,1,ii))
    hold on
end
hold on
[S_T,f_T] = pburg(AT,m,NFFT,fs); % Power spektra ved Burgs metode
semilogy(f_T,S_T)
title('Logaritmisk akselerasjonsspektra 10.03.17 mellom 00:00-00:10, med
 $\overline{U}=1.5 \text{ m}\{\cdot\}s^{-1}$ ','Interpreter','latex')
ylabel('  $S_{\ddot{r}} \ \ (\text{rad}^2\{\cdot\}s^{-3})$ ','Interpreter','latex');
xlabel('$f \ $ (Hz)','Interpreter','latex')
legend({AccelName{1:Nsensors},'Brotårn'})
grid on ; grid minor;
export_fig PST_AccTthetaDtheta_sammenlikning_min_wind -png -r600

```

```

% Sammenlikning spektra for tårn (x) og brodekke (z) Kraftig vind (07.02.17)
% VS1
load('StatsResult_2017_02_07.mat');
clf; close all;
figure('position', [100, 100, 1000, 400]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf,'color','w'); % Hvit bakgrunn
fs = 10; % Samplingsfrekvens, f=1/(t(2)-t(1));
m = 200; % AR filter grad
NFFT = 4096; % Antall DFT punkter, [] = 254
IndT = 56; % 09:10-09:20
IndS = 2; % H18
x_T = detrend(Aox_Tower(IndT,:))';
x_D = detrend(squeeze(Aoz(IndS,IndT,:)));
Delta = t(2)-t(1);
fN = 1/(2*Delta);
fmin = 0.27; % Laveste frekvens
fmax = 0.33; % Høyeste frekvens
N = 200; % Filtreeringsgrad
[b_D,a_D] = fir1(N,[fmin fmax]/fN); % Designfilter for brodekke
[b_T,a_T] = fir1(N,[fmin fmax]/fN); % Designfilter for brotårn
af_D = filtfilt(b_D,a_D,x_D); % Filtrering av brodekkets respons
af_T = filtfilt(b_T,a_T,x_T); % Filtrering av brotårnets respons
[S_Dfilt,f_Dfilt] = pburg(af_D,m,NFFT,fs); % Power spektra ved Burgs metode
[S_Tfilt,f_Tfilt] = pburg(af_T,m,NFFT,fs); % Power spektra ved Burgs metode
semilogy(f_Tfilt,S_Tfilt/S_Dfilt,'b-')
title('Logaritmisk akselerasjonsspektra (0.3Hz) 07.02.17 mellom 09:10-09:20, med
 $\overline{U}=17.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ','Interpreter','latex')
grid on; grid minor;
legend({' $ S_{\ddot{r}}_{T,x} / S_{\ddot{r}}_{D,z} $'}, 'Interpreter',
'latex','fontsize',14);
xlim([0 2]) % Begrensning x-akse
xlabel('$f \text{ (Hz)}$','Interpreter','latex')
export_fig PST_AccTxDz_filtreert_Tx-Dz_0.3Hz -png -r600

% VS2
figure('position', [100, 100, 1000, 400]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf,'color','w'); % Hvit bakgrunn
fs = 10; % Samplingsfrekvens, f=1/(t(2)-t(1));
m = 200; % AR filter grad
NFFT = 4096; % Antall DFT punkter, [] = 254
IndT = 56; % 09:10-09:20
IndS = 2; % H18
x_T = detrend(Aox_Tower(IndT,:))';
x_D = detrend(squeeze(Aoz(IndS,IndT,:)));
Delta = t(2)-t(1);
fN = 1/(2*Delta);
fmin = 0.37; % Laveste frekvens
fmax = 0.43; % Høyeste frekvens
N = 200; % Filtreeringsgrad
[b_D,a_D] = fir1(N,[fmin fmax]/fN); % Designfilter for brodekke
[b_T,a_T] = fir1(N,[fmin fmax]/fN); % Designfilter for brotårn
af_D = filtfilt(b_D,a_D,x_D); % Filtrering av brodekkets respons
af_T = filtfilt(b_T,a_T,x_T); % Filtrering av brotårnets respons
[S_Dfilt,f_Dfilt] = pburg(af_D,m,NFFT,fs); % Power spektra ved Burgs metode
[S_Tfilt,f_Tfilt] = pburg(af_T,m,NFFT,fs); % Power spektra ved Burgs metode
semilogy(f_Tfilt,S_Tfilt/S_Dfilt,'b-')
title('Logaritmisk akselerasjonsspektra (0.4Hz) 07.02.17 mellom 09:10-09:20, med
 $\overline{U}=17.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ','Interpreter','latex')
grid on; grid minor;
legend({' $ S_{\ddot{r}}_{T,x} / S_{\ddot{r}}_{D,z} $'}, 'Interpreter',
'latex','fontsize',14);
xlim([0 2]) % Begrensning x-akse
xlabel('$f \text{ (Hz)}$','Interpreter','latex')
export_fig PST_AccTxDz_filtreert_Tx-Dz_0.4Hz -png -r600

% VS3
figure('position', [100, 100, 1000, 400]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf,'color','w'); % Hvit bakgrunn

```

```

fs = 10; % Samplingsfrekvens, f=1/(t(2)-t(1));
m = 200; % AR filter grad
NFFT = 4096; % Antall DFT punkter, [] = 254
IndT = 56; % 09:10-09:20
IndS = 2; % H18
x_T = detrend(Aox_Tower(IndT,:))';
x_D = detrend(squeeze(Aoz(IndS,IndT,:)));
Delta = t(2)-t(1);
fN = 1/(2*Delta);
fmin = 0.82; % Laveste frekvens
fmax = 0.88; % Høyeste frekvens
N = 200; % Filtreringsgrad
[b_D,a_D] = fir1(N,[fmin fmax]/fN); % Designfilter for brodekke
[b_T,a_T] = fir1(N,[fmin fmax]/fN); % Designfilter for brotårn
af_D = filtfilt(b_D,a_D,x_D); % Filtrering av brodekkets respons
af_T = filtfilt(b_T,a_T,x_T); % Filtrering av brotårnets respons
[S_Dfilt,f_Dfilt] = pburg(af_D,m,NFFT,fs); % Power spektra ved Burgs metode
[S_Tfilt,f_Tfilt] = pburg(af_T,m,NFFT,fs); % Power spektra ved Burgs metode
semilogy(f_Tfilt,S_Tfilt/S_Dfilt,'b-')
title('Logaritmisk akselerasjonsspektra (0.85Hz) 07.02.17 mellom 09:10-09:20, med
 $\overline{U}=17.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ','Interpreter','latex')
grid on; grid minor;
legend({' $ S_{\ddot{r}}_{T,x} / S_{\ddot{r}}_{D,z} $'}, 'Interpreter',
'latex','fontsize',14);
xlim([0 2]) % Begrensning x-akse
xlabel('$f \text{ (Hz)}$','Interpreter','latex')
export_fig PST_AccTxDz_filtreT_Tx-Dz_0.85Hz -png -r600

% Sammenlikning spektra for tårn (x) og brodekke (z) Svak vind (10.03.17)
% VS1
load('StatsResult_2017_03_10.mat');
clf; close all;
figure('position',[100, 100, 1000, 400]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf,'color','w'); % Hvit bakgrunn
fs = 10; % Samplingsfrekvens, f=1/(t(2)-t(1));
m = 200; % AR filter grad
NFFT = 4096; % Antall DFT punkter, [] = 254
IndT = 1; % 00:00-00:10
IndS = 2; % H18
x_T = detrend(Aox_Tower(IndT,:))';
x_D = detrend(squeeze(Aoz(IndS,IndT,:)));
Delta = t(2)-t(1);
fN = 1/(2*Delta);
fmin = 0.27; % Laveste frekvens
fmax = 0.33; % Høyeste frekvens
N = 200; % Filtreringsgrad
[b_D,a_D] = fir1(N,[fmin fmax]/fN); % Designfilter for brodekke
[b_T,a_T] = fir1(N,[fmin fmax]/fN); % Designfilter for brotårn
af_D = filtfilt(b_D,a_D,x_D); % Filtrering av brodekkets respons
af_T = filtfilt(b_T,a_T,x_T); % Filtrering av brotårnets respons
[S_Dfilt,f_Dfilt] = pburg(af_D,m,NFFT,fs); % Power spektra ved Burgs metode
[S_Tfilt,f_Tfilt] = pburg(af_T,m,NFFT,fs); % Power spektra ved Burgs metode
semilogy(f_Tfilt,S_Tfilt/S_Dfilt,'b-')
title('Logaritmisk akselerasjonsspektra (0.3Hz) 10.03.17 mellom 00:00-00:10, med
 $\overline{U}=1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ','Interpreter','latex')
grid on; grid minor;
legend({' $ S_{\ddot{r}}_{T,x} / S_{\ddot{r}}_{D,z} $'}, 'Interpreter',
'latex','fontsize',14);
xlim([0 2]) % Begrensning x-akse
xlabel('$f \text{ (Hz)}$','Interpreter','latex')
export_fig PST_AccTxDz_filtreT_Tx-Dz_0.3Hz_min_wind -png -r600

% VS2
figure('position',[100, 100, 1000, 400]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf,'color','w'); % Hvit bakgrunn
fs = 10; % Samplingsfrekvens, f=1/(t(2)-t(1));
m = 200; % AR filter grad
NFFT = 4096; % Antall DFT punkter, [] = 254

```

```

IndT = 1; % 00:00-00:10
IndS = 2; % H18
x_T = detrend(Aox_Tower(IndT,:))';
x_D = detrend(squeeze(Aoz(IndS,IndT,:)));
Delta = t(2)-t(1);
fN = 1/(2*Delta);
fmin = 0.37; % Laveste frekvens
fmax = 0.43; % Høyeste frekvens
N = 200; % Filtreringsgrad
[b_D,a_D] = fir1(N,[fmin fmax]/fN); % Designfilter for brodekke
[b_T,a_T] = fir1(N,[fmin fmax]/fN); % Designfilter for brotårn
af_D = filtfilt(b_D,a_D,x_D); % Filtrering av brodekkets respons
af_T = filtfilt(b_T,a_T,x_T); % Filtrering av brotårnets respons
[S_Dfilt,f_Dfilt] = pburg(af_D,m,NFFT,fs); % Power spektra ved Burgs metode
[S_Tfilt,f_Tfilt] = pburg(af_T,m,NFFT,fs); % Power spektra ved Burgs metode
semilogy(f_Tfilt,S_Tfilt/S_Dfilt,'b-')
title('Logaritmisk akselerasjonsspektra (0.4Hz) 10.03.17 mellom 00:00-00:10, med
 $\overline{U}=1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ','Interpreter','latex')
grid on; grid minor;
legend({' $S_{\ddot{r}}(T,x) / S_{\ddot{r}}(D,z)$ '}, 'Interpreter',
'latex','fontsize',14);
xlim([0 2]) % Begrensning x-akse
xlabel('$f \text{ (Hz)}','Interpreter','latex')
export_fig PST_AccTxDz_filtreT_Tx-Dz_0.4Hz_min_wind -png -r600

% VS3
figure('position',[100,100,1000,400]) % Ny figur med spesifikk størrelse
set(gcf,'color','w'); % Hvit bakgrunn
fs = 10; % Samplingsfrekvens, f=1/(t(2)-t(1));
m = 200; % AR filter grad
NFFT = 4096; % Antall DFT punkter, [] = 254
IndT = 56; % 00:00-00:10
IndS = 2; % H18
x_T = detrend(Aox_Tower(IndT,:))';
x_D = detrend(squeeze(Aoz(IndS,IndT,:)));
Delta = t(2)-t(1);
fN = 1/(2*Delta);
fmin = 0.82; % Laveste frekvens
fmax = 0.88; % Høyeste frekvens
N = 200; % Filtreringsgrad
[b_D,a_D] = fir1(N,[fmin fmax]/fN); % Designfilter for brodekke
[b_T,a_T] = fir1(N,[fmin fmax]/fN); % Designfilter for brotårn
af_D = filtfilt(b_D,a_D,x_D); % Filtrering av brodekkets respons
af_T = filtfilt(b_T,a_T,x_T); % Filtrering av brotårnets respons
[S_Dfilt,f_Dfilt] = pburg(af_D,m,NFFT,fs); % Power spektra ved Burgs metode
[S_Tfilt,f_Tfilt] = pburg(af_T,m,NFFT,fs); % Power spektra ved Burgs metode
semilogy(f_Tfilt,S_Tfilt/S_Dfilt,'b-')
title('Logaritmisk akselerasjonsspektra (0.85Hz) 10.03.17 mellom 00:00-00:10, med
 $\overline{U}=1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ','Interpreter','latex')
grid on; grid minor;
legend({' $S_{\ddot{r}}(T,x) / S_{\ddot{r}}(D,z)$ '}, 'Interpreter',
'latex','fontsize',14);
xlim([0 2]) % Begrensning x-akse
xlabel('$f \text{ (Hz)}','Interpreter','latex')
export_fig PST_AccTxDz_filtreT_Tx-Dz_0.85Hz_min_wind -png -r600

```