



Universitetet
i Stavanger

DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

MASTEROPPGAVE

Studieprogram/spesialisering: Konstruksjoner og materialer med fordypning i byggkonstruksjoner	Vårsemesteret, 2020 Åpen
Forfatter: Sander Albin Felberg	
Fagansvarlig: Jasna Bogunovic Jakobsen	
Veileder(e): Jasna Bogunovic Jakobsen, Ibuki Kusano (Universitetet i Stavanger) Jungao Wang (Statens vegvesen)	
Tittel på masteroppgaven: Datamodell og måledataanalyse for Bybrua i Stavanger	
Engelsk tittel: Computational model and field measurement data analysis from Bybrua in Stavanger	
Studiepoeng: 30	
Emneord: Skråkabelbro FE-modell Måledata Egenfrekvens Egenmode Responsspektra Abaqus	Sidetall: 101 + vedlegg/annet: 277 Stavanger, 06.07.2020 dato/år

Forord

Denne masteroppgaven ble gjennomført våren 2020 og omhandler datamodellering og måledataanalyse av Bybrua i Stavanger med fokus på egenfrekvenser og egenmoder. Arbeidstegninger og opprinnelige beregninger for brua som er benyttet i oppgaven er gitt fra Statens vegvesen. Dette er en avsluttende del av min mastergrad innenfor konstruksjoner og materialer med fordypning i byggkonstruksjoner ved Universitetet i Stavanger.

Dette prosjektet har vært lærerikt å jobbe med, og har gitt meg en dypere forståelse for bruk av FE-programvare og måledata til egenfrekvensanalyse for konstruksjoner. Læringskurven har vært bratt, og interessante problemstillinger innenfor mange forskjellige fagområder har oppstått underveis.

Jeg ønsker å takke både Jasna Bogunovic Jakobsen og Ibuki Kusano for god veiledning til denne oppgaven i form av mange møter og eposter. I tillegg rettes den en spesiell takk til Jens Einar Aaland fra Statens vegvesen som har bidratt med opplæringsressurser til Abaqus samt gode tips til datamodellen.

UiS, Stavanger, 06.07.2020

Sander Albin Felberg

Sammendrag

Denne oppgaven omhandler datamodellering og måledataanalyse av Bybrua i Stavanger. Hovedmålet er å konstruere en datamodell som samsvarer med den virkelige broen, i tillegg til å kartlegge de ulike egenfrekvensene og tilknyttede modeformer som dukker opp i måledata.

Datamodellen er modellert med utgangspunkt i informasjon fra arbeidstegninger og opprinnelige beregninger for Bybrua gitt fra Statens vegvesen. De strukturelle egenskapene til alle komponenter i modellen er beregnet i Mathcad. Forspenningene til kablene for å motvirke forskyvninger i broen som følge av egenvekt, er beregnet gjennom en optimaliseringsberegning i Matlab. Effekten av spennarmering i brodekket av betong er inkludert i datamodellen gjennom etablering av estimerte ekvivalente krefter, plasserte langs brodekket.

Det er utført egenfrekvensanalyser av datamodellen for to ulike situasjoner i forhold til randbetingelsene til brodekket. I den første situasjonen er koblingene til søyler antatt å være fullstendig stive, og i koblingen til tårnrigel er det kun tillatt rotasjon i horisontalplanet. For den andre situasjonen er koblingene til både søyler og tårnrigel etablerte for fri rotasjoner i horisontalplanet og vertikalplanet.

Det er tatt utgangspunkt i data fra to akselerometre plasserte på forskjellige steder langs brodekket. Gjeldende data består av akselerasjonsmålinger for 3 akser i en tidsserie med 1 times varighet, målt 28. august 2019. Målingene er analyserte for spektraltettheter og frekvenser ved hjelp av Matlab. Det er utført korrelasjonsanalyser for samsvarende frekvenstopper mellom målesensorene. I tillegg er forskyvningsforholdet mellom sensorene også estimerte for frekvenstopperne gjennom spektraltettheter. Egenfrekvensene fra datamodellen er sammenlignet med måledata ved å se på estimerte forskyvningsforhold og korrelasjonskoeffisient i forhold til modeformene. Resultatet viser at datamodellen stemmer veldig godt overens med akselerasjonsdata for vertikalretning. Modellen samsvarer derimot mindre ovenfor de tversgående målingene. Det vises også at fri rotasjoner i vertikalplanet for koblingene fra brodekket til søyler og tårnrigel gir et betydeligere bedre resultat ovenfor de vertikale egenmodene.

Innhold

Forord.....	I
Sammendrag	II
Figurliste	VI
Tabelliste.....	VIII
1 Introduksjon	1
2 Digitale verktøy	2
2.1 Abaqus/CAE	2
2.2 Notepad++	2
2.3 PTC Mathcad Prime.....	3
2.4 MATLAB.....	3
2.5 Microsoft Office Excel	3
3 Skråkabelbroer	4
3.1 Bybrua.....	5
4 Abaqus-modell.....	7
4.1 Informasjonsgrunnlag, generelt	7
4.2 Datamodellering, generelt.....	8
4.3 Oversikt og aksesystem.....	10
4.4 Randbetingelser.....	11
4.4.1 Endelagre	11
4.4.2 Søyler og tårnben	13
4.4.3 Kobling tårn til brodekket.....	13
4.4.5 Kobling søyler til brodekket	14
4.5 Kotehøyder til brobanen	15
4.6 Brodekke av betong	17
4.6.1 Tverrsnitt.....	17

4.6.2 Spennkabler.....	19
4.6.3 Tverrbjelker.....	22
4.7 Brodekke av stål.....	26
4.7.1 Tverrsnitt.....	26
4.7.2 Tverrbjelker.....	31
4.8 Betongsøyler	33
4.9 Tårn.....	36
4.9.1 Tårnben	37
4.9.2 Rigelbjelke	38
4.9.3 Tårntopp.....	40
4.10 Kabler.....	41
4.10.1 Materialverdier.....	43
4.10.2 Forspenninger i kabler	43
4.11 Modellering av masse	47
4.11.1 Masse og treghetsmoment for Timoshenkobjelker i Abaqus	50
5 Resultat fra Abaqus.....	52
5.1 Generelt.....	52
5.2 Statisk egenvekt – effekt av spennarmering	53
5.3 Statisk egenvekt – effekt av kabelspenninger.....	54
5.4 Egenfrekvenser og egenmoder.....	57
5.5 Egenfrekvenser og egenmoder - randbetingelsesituasjon 2.....	57
5.6 Egenfrekvenser og egenmoder for kabler	58
5.6.1 Metode for å justere forspenninger i kabler etter målte vibrasjoner	60
6 Analyse av måledata	63
6.1 Måleinstrumenter	63
6.2 Akselerasjonsmålinger.....	64

6.3 Spektra	66
6.3.1 Fast Fourier Transformation (FFT).....	66
6.3.2 Pwelch.....	70
6.4 Validering av spektra	75
6.5 Analyse av spektra	77
7 Sammenligning av måledata og Abaqus-modell	81
7.1 Egenfrekvenser og egenmoder til brodekket	81
7.2 Egenfrekvenser kabler	86
8 Konklusjon.....	89
8 Referanser	91

Figurliste

Figur 3.1 Bybrua, Stavanger	5
Figur 4.1 Oversikt (oppriss) av Bybrua, utklipp av tegning fra Statens vegvesen	10
Figur 4.2 Statisk system av Bybrua, utklipp av beregning fra Statens vegvesen	12
Figur 4.3 Kobling mellom rigel og brodekket, utklipp av tegning fra Statens vegvesen	13
Figur 4.4 Tverrsnitt av betongdekket, utklipp av arbeidstegning fra Statens vegvesen	17
Figur 4.5 Plassering av spennkabler (snitt), utklipp av tegning fra Statens vegvesen.....	20
Figur 4.6 Tverrbjelker i akse 10a og 10b, utklipp av tegning fra Statens vegvesen.....	22
Figur 4.7 Oversikt for modellering av tverrbjelker.....	24
Figur 4.8 Generelt tverrsnitt for brodekket av stål, utklipp av tegning fra Statens vegvesen.....	26
Figur 4.9 Tverrsnitt for brodekket av stål med platenummerering.....	28
Figur 4.10 Tverrbjelke av stål som vist i tegningene, utklipp av tegning fra Statens vegvesen...	31
Figur 4.11 Tverrbjelkene av stål på innsiden og utsiden av brodekket	32
Figur 4.12 Skisse av søylene, utklipp av beregninger fra Statens vegvesen.....	34
Figur 4.13 Tverrsnitt til en enkeltsøyle, utklipp av beregninger fra Statens vegvesen.....	34
Figur 4.14 Skisse over tårn, utklipp av beregninger fra Statens vegvesen	36
Figur 4.15 Skisse av tverrsnitt til tårnben (k55), utklipp av beregninger fra Statens vegvesen ...	37
Figur 4.16 Rigelbjelke tidlig skisse, utklipp av beregninger fra Statens vegvesen	38
Figur 4.17 Oppdatert skisse av rigelbjelke, utklipp av beregninger fra Statens vegvesen	39
Figur 4.18 Skisse over toppen av tårnet, utklipp av beregninger fra Statens vegvesen.....	40
Figur 4.19 Oversikt for kabler, utklipp av tegning fra Statens vegvesen	41
Figur 5.1 Abaqus-modellen av Bybrua i Abaqus, skjermdump fra Abaqus/CAE.....	52
Figur 5.2 Effekt av spennarmering på brodekket av betong.....	53
Figur 5.3 Effekt av kabelforspenninger på brodekket	55
Figur 6.1 Oversikt over plasserte akselerometre.....	63
Figur 6.2 Tidsserie akselerasjon, x-akse.....	64
Figur 6.3 Tidsserie akselerasjon, y-akse.....	65
Figur 6.4 Tidsserie akselerasjon, z-akse	65
Figur 6.5 Akselerasjonsspektra (FFT), betongkasse x-akse	67
Figur 6.6 Akselerasjonsspektra (FFT), betongkasse y-akse	67
Figur 6.7 Akselerasjonsspektra (FFT), betongkasse z-akse.....	68

Figur 6.8 Akselerasjonsspektra (FFT), stålkasse x-akse.....	68
Figur 6.9 Akselerasjonsspektra (FFT), stålkasse y-akse.....	69
Figur 6.10 Akselerasjonsspektra (FFT), stålkasse z-akse.....	69
Figur 6.11 Akselerasjonsspektra (pwelch), betongkasse x-akse.....	70
Figur 6.12 Akselerasjonsspektra (pwelch), betongkasse y-akse.....	71
Figur 6.13 Akselerasjonsspektra (pwelch), betongkasse z-akse.....	71
Figur 6.14 Akselerasjonsspektra (pwelch), stålkasse x-akse	72
Figur 6.15 Akselerasjonsspektra (pwelch), stålkasse y-akse	72
Figur 6.16 Akselerasjonsspektra (pwelch), stålkasse z-akse	73
Figur 6.17 Logplot akselerasjonsspektra (pwelch), x-akse.....	74
Figur 6.18 Logplot akselerasjonsspektra (pwelch), y-akse.....	74
Figur 6.19 Logplot akselerasjonsspektra (pwelch), z-akse.....	75
Figur 6.20 Akselerasjonsspektra (pwelch), y-akse, med noterte frekvenser	78
Figur 6.21 Akselerasjonsspektra (pwelch), z-akse, med noterte frekvenser.....	78
Figur 6.22 Korrelasjon mellom akselerasjon i betongkasse og stålkasse, y-akse, f=[0.9016;1.0516]Hz	80
Figur 7.1 Akselerasjonsspektra y-akse med egenfrekvenser fra Abaqus (første randbetingelsesituasjon).....	81
Figur 7.2 Akselerasjonsspektra z-akse med egenfrekvenser fra Abaqus (første randbetingelsesituasjon).....	82
Figur 7.3 Akselerasjonsspektra y-akse med egenfrekvenser fra Abaqus (andre randbetingelsesituasjon).....	83
Figur 7.4 Akselerasjonsspektra y-akse med egenfrekvenser fra Abaqus (første randbetingelsesituasjon).....	84
Figur 7.5 Akselerasjonsspektra y-akse med egenfrekvenser til kabel 5	87
Figur 7.6 Akselerasjonsspektra z-akse med egenfrekvenser til kabel 5	87

Tabelliste

Tabell 4.1 Begrensede frihetsgrader for endelagre i Abaqus-modellen	12
Tabell 4.2 Funksjoner for beregning av z-koordinater langs brobanen	15
Tabell 4.3 Beregnede tverrsnittsverdier for brodekket av betong.....	19
Tabell 4.4 Minimum samlet spennkrefter etter låsing	20
Tabell 4.5 Sammenligning av vinkler til tverrbjelker.....	24
Tabell 4.6 Beregnede tverrsnittsverdier for tverrbjelker av betong.....	25
Tabell 4.7 Oversikt over platesegmenter i beregningen	29
Tabell 4.8 Oversikt over egenskaper til langsgående stivere.....	30
Tabell 4.9 Oversikt over stivhetsbidrag fra plater og langsgående stivere.....	30
Tabell 4.10 Mekaniske egenskaper til ståldekket	31
Tabell 4.11 Mekaniske egenskaper til tverrbjelkene av stål	33
Tabell 4.12 Mekaniske egenskaper til betongsøyler.....	35
Tabell 4.13 Mekaniske egenskaper til tårnben	38
Tabell 4.14 Mekaniske egenskaper til rigelbjelke	40
Tabell 4.15 Oversikt kabler.....	42
Tabell 4.16 Materialeegenskaper til kablene	43
Tabell 4.17 Beregnede forspenninger til kablene	46
Tabell 4.18 Oversikt over massetettheter i Abaqus-modellen	48
Tabell 4.19 Sammenligning av modellert masse med estimer fra opprinnelige beregningene .	49
Tabell 5.1 Sammenligning av teoretiske forskyvninger	56
Tabell 5.2 Oversikt egenfrekvenser til kabler.....	59
Tabell 6.1 Sammenligning av varianse til signalene med arealet under spektralkurvene fra pwelch.....	76
Tabell 7.1 Resultat fra sammenligningen	85

1 Introduksjon

Siden desember 2018 har det vært en pågående diskusjon mellom Statens vegvesen og Universitetet i Stavanger angående å plassere måleinstrument på Bybrua i Stavanger for å overvåke kabel- og strukturelle vibrasjoner. I juni 2019 ble en rekke instrumenter montert på broen, og per dags dato er analysene av oppsamlede data i tidlig fase [1].

Hovedfokuset for målingene er å samle akselerasjonsdata knyttet til vibrasjoner fra både kabler og brodekket. Dette er gjort for å få en bedre forståelse ovenfor de dynamiske egenskapene til hele konstruksjonen og eventuelt energiutveksling mellom brodekket og kabler. Det er rapportert om relativt store vibrasjoner av kablene i mange enkelte episoder over flere år. Og det er derfor ønsket å få en bedre oversikt over værforholdene som trolig forårsaker disse store kabelvibrasjonene.

Bybrua ble bygget for 42 år siden, og begynner da å nærme seg andre halvdel av sin dimensjonerte livstid. For eldre eksisterende konstruksjoner er dette nyttig informasjon å ha, blant annet for å kunne evaluere for svakheter som kan påvirke levetiden i tillegg til å kartlegge eventuelle tiltak som kan gjøres for å opprettholde sikkerheten til konstruksjonen.

I denne masteroppgaven er akselerasjonsdata fra måleinstrumenter på brodekket analysert opp mot en FE-modell som er konstruert basert på opprinnelige arbeidstegninger og beregninger for Bybrua. Analysen er gjennomført med søkelys på å kartlegge de ulike egenfrekvensene og egenmodene til broen som oppstår i måldataene. Relativt lite informasjon finnes angående det som faktisk er utbygget, og analysen vil derfor også fungere som en undersøkelse ovenfor de egentlig mekaniske egenskapene til Bybrua.

2 Digitale verktøy

2.1 Abaqus/CAE

Abaqus/CAE er et dataprogram utviklet av ABAQUS Inc. som egner seg til bruk for «finite element analyse» (FEA) av konstruksjoner. CAE står for “Complete Abaqus Environment”, og skiller seg fra den tradisjonelle versjonen, Abaqus/Standard, ved at modelleringen («pre-processing») kan også gjennomføres i dataprogrammet visuelt [2].

I denne oppgaven er Abaqus/CAE benyttet til å analysere datamodellen som er konstruert gjennom input-filer. Selv om modelleringen hovedsakelig ikke er gjort gjennom selve programmet, har CAE-delen vært veldig nyttig siden den kan gi raske visuelle tilbakemeldinger for monteringen av de ulike komponentene i datamodellen.

På grunn av begrenset tilgang til programvarer gjennom datalaboratoriet til UiS en periode som følge av regjeringens tiltak for å hindre spredning av Covid-19 [3], har studentversjonen av Abaqus/CAE også blitt benyttet. Studentversjonen fungerer likt som den vanlige versjonen, med unntak av at den kan kun brukes til analyse av datamodeller med under 1000 noder [4].

2.2 Notepad++

Notepad++ er et åpent og fritt tekstredigeringsverktøy utviklet av Don Ho [5]. I denne oppgaven er Notepad++ (versjon 7.8.6) benyttet til å konstruere datamodellen i form av input-filer som tolkes av Abaqus/CAE.

Her er det opprettet separate input-filer for alle komponenter i datamodellen, som blir importert en hoved input-fil gjennom analysen. Siden det er såpass mange forskjellige komponenter, vil dette gjøre oppsettet ryddig og oversiktlig. I tillegg vil prosessen av å endre på modellen bli enklere, i forhold til alternativet å gjøre disse endringene innad i Abaqus/CAE.

2.3 PTC Mathcad Prime

Mathcad er et dataprogram primært brukt til validering, verifisering og dokumentering av ingeniørfaglige beregninger. Dataprogrammet er eid av PTC Inc [6].

I denne oppgaven er Mathcad (PTC Mathcad Prime 6.0.0.0) brukt til å dokumentere alle håndberegninger knyttet til datamodellen på en oversiktlig måte. Programmet har vært særlig nyttig for å etablere lange oppsett på beregninger der verdiene kan oppdateres i sanntid. Dette tillater at man enkelt kan bruke samme regneark til flere lignende beregninger.

2.4 MATLAB

MATLAB er et omfattende matematikkprogram som er utviklet av MathWorks.

Dataprogrammet egner seg blant annet til matriseberegninger, plotting av funksjoner og behandling av data, og er et av de mest brukte matematiske programvarene blant ingeniører [7].

I denne oppgaven er MATLAB hovedsakelig benyttet til behandling av måledata og beregning av de initielle kabelspenningene til Abaqus-modellen.

I tillegg til 2016b-versjonen av MATLAB som primært er brukt, er det valgt å i tillegg bruke 2020a-versjonen for å benytte seg av en oppdatert utgave av «Optimization Toolbox» for å løse optimaliseringsproblemet rundt kabelspenningene.

2.5 Microsoft Office Excel

Microsoft Office Excel er et dataprogram produsert av Microsoft som er basert på regneark der beregninger kan utføres [8].

I dette oppgaven er Microsoft Office Excel brukt til blant annet å beregne kotehøydene til nodene knyttet til brobanen i datamodellen, i tillegg til bearbeiding av data fra modellen som er videre brukt til beregning av de initielle kabelspenningene. Samling av resultater fra måledataanalysene er også gjort gjennom Excel.

3 Skråkabelbroer

En skråkabelbro er type bro som består av rette kabler koblet direkte fra tårn til brodekket. Dette står til kontrast for en hengebro, hvor brodekket blir båret av vertikale kabler koblet til en parabolisk hovedkabel som igjen er festet mellom to tårn [9]. Designkonsepter for skråkabelbroer har eksistert så tidlig som 1595 [9], men den første skråkabelbroen ble ikke bygget før 1784 [10]. Designideen for denne brotypen ble diskreditert etter en rekke med ulykker som skjedde på 1800-tallet som følge av svakheter knyttet til konstruksjon og materialer [11]. Bruken av designet fikk derimot en oppblomstring etter andre verdenskrig. Teknologiske framskritt rundt korrosjon og spenningstoleranser for materialer kombinert med et stort behov for å erstatte gamle broer gjorde skråkabelbroen til et økonomisk gunstig designvalg [12]. De aller fleste broer av denne typen er av stålkonstruksjoner, men ulike variasjoner av betong, eller en kombinasjon av betong og stål er også anvendt [11].

Skråkabelbroer er regnet som en optimal brotype dersom det lengste spennet er mellom 150-915 meter. Her vil det lettere dekket og minimalistiske kabelsystemet utkonkurrere de andre brotypene i de fleste tilfeller med hensyn på kostnader, byggetid og materialbruk. For enda lengre spenn, vil hengebro alltid være et bedre valg [12].

I forhold til hengebroer, har skråkabelbroer en stor fordel ved at dekket har en høyere stivhet. Dette fører til betydelig mindre deformasjoner under påvirkning av trafikklast [9]. I tillegg vil ordningen av kabelsystemet til skråkabelbroer gjøre det mulig å benytte “fritt frambygg-prinsippet” under byggefasen, der seksjoner av brodekket blir monterte som utkragere og kablene blir spent opp i etapper [13]. For en symmetrisk skråkabelbro vil de horisontale kreftene på hver side av tårnet være i balanse på grunn av de skrå kablene, og store jordankre er derfor ikke nødvendige [9]. En ulempe med dette er at brodekket trenger da høyere kapasitet for trykk som følge av de horisontale kreftene [10].

Korrosjon og vibrasjoner i kabler er regnet som hovedproblemene til skråkabelbroer [12]. I mange tilfeller er det derfor nødvendig å plassere sensorer som måler kabelvibrasjoner og oppdager utviklingen av korrosjon. Høye amplituder for kabelvibrasjoner kan være kritiske for broens sikkerhet, og ekstra tiltak som å binde flere kabler sammen, tilføre passende

overflatebehandling og mekaniske dempere for å redusere vibrasjoner er derfor i enkelte tilfeller svært nødvendige [14].

3.1 Bybrua

Den første skråkabelbroen som ble bygget i Norge var Bybrua i Stavanger i 1978. Broen strekker seg fra Stavanger sentrum, over Grasholmen og ender på Sølyst. Sammen med de tidligere bygde broene, Engøybrua og Pyntesundbrua, fullførte Bybrua en veikobling mellom Stavanger sentrum til Buøy og Hundvåg [15]. I tillegg til å ha en rask økende befolkning, er Buøy der det mekaniske verkstedet til Rosenberg ligger. Rosenberg er et av de viktigste industrikonsernene knyttet til Stavanger, og ferge var den eneste reisemåten [11]. Det var derfor av stor interesse å erstatte den tidligere fergeløsningen.



Figur 3.1 Bybrua, Stavanger

Planene for Bybrua ble lagt for lenge siden, men ble oppdatert på 60-tallet. Med betraktning på den fine utsikten med sjø og fjell rundt Strømsteinsundet, ble det valgt å ta ekstra hensyn til det estetiske utseende av broen da det endelige designet ble bestemt. Selv om skråkabeldesignet ikke var det billigste alternativet, ble det valgt på grunn av designet virket mer åpent og lett, og ville skape en naturlig balanse i forhold til utsikten. En fritt fram-bro av betong som valg hadde ført til

større dimensjoner for brodekket og en støttepilar midt i sundet hadde vært nødvendig. Det sistnevnte hadde begrenset den åpne bredden til kanalen, og var en stor grunn til at fritt fram-alternativet ble valgt bort [11].

Bybrua ble prosjektert av det rådgivende ingeniørfirmaet Johs Holt i samarbeid med Prof. Dr. Techn. Arne Selberg. Oppdragsgiveren for prosjektet var Statens vegvesen Region vest, og Bybrua er en del av nasjonal verneplan [16].

Med en samlet lengde på 1067 meter er Bybrua Rogalands lengste bro per dags dato [15]. Broen består av 23 sidespenn på ca. 40 meter hver og ett hovedspenn på 185 meter [11]. Hovedspennet består av en lukket ortotrop stålkasse [16] som er støttet av tre skråkabel-grupper fra tårnet, festet på hver side av brobanen. Alle sidespennene er av spennarmert betong og er støttet av betongsøyler. Brotårnet er av armert betong og har et "A-formet" design der alle kablene er forankret fra brodekket til toppen av tårnet.

Brodekket av stål knyttet til hovedspennet ble bygget ved å montere 9 meter lange prefabrikkerte seksjoner gjennom fritt fram-prinsippet. For spesielle seksjoner ved tårnet og kabelforankringer, ble derimot kortere seksjoner brukt i monteringen [11].

Det var tatt ekstra hensyn til ugunstige spenninger i kabelforankringene forårsaket av kabelvibrasjoner. Ekstra gummidempere ("dead" rubber) ble derfor installerte på begge ender av alle kabler. I tillegg er enkelte kabler i et stag bundet sammen for å videre redusere kabelvibrasjoner [11].

4 Abaqus-modell

Med hensyn til datamodellering, er Bybrua en relativ komplisert konstruksjon å modellere, ettersom at broen består av mange forskjellige komponenter og koblinger. I tillegg er det generelt lite tilgjengelig informasjon om hvordan de ulike delene faktisk er bygget. Av denne grunn er en del antagelser og forenklinger nødvendige under datamodelleringen, og det vil derfor være en relativ høy grad med usikkerhet ovenfor hvordan en resulterende datamodell vil stemme overens med virkeligheten. I dette kapittelet er metodikken for datamodelleringen av Bybrua i Abaqus beskrevet. Dette inkluderer en vurdering av tilgjengelig konstruksjonsteknisk informasjon knyttet til de ulike komponentene i tillegg til alle nødvendige antagelser som er gjort underveis.

4.1 Informasjonsgrunnlag, generelt

De beste kildene med informasjon for Bybrua kommer fra arbeidstegninger samt opprinnelige beregninger fra prosjekteringen av broen. All informasjon er gitt av Statens vegvesen Region vest. Det er også gjennomført en befaring til innsiden av brodekket i februar 2020. Bilder tatt fra denne befaringen (i tillegg til bilder av yttersiden av broen) vil fungere som et supplement av informasjon for å bekrefte eller avkrefte ulike informasjonshull. I de fleste tilfellene gir arbeidstegningene et tydelig bilde på hvordan enkelte deler er konstruerte, derimot er mye av informasjonen knyttet til tegningene kun fungerende som råd til utbygger i form av minimums verdier og generelle dimensjoner. Arbeidstegningene er derfor ikke alltid nødvendigvis en refleksjon ovenfor hvordan broen faktisk er konstruert.

De opprinnelige beregningene består hovedsakelig av dimensjonering av de forskjellige elementene til broen, kombinert med utfyllende tekst. All informasjon her er håndskrevet, og kan derfor være krevende å tolke i enkelte situasjoner. Her er beregninger fra både tidlig fase av planleggingen samt utbyggingsfase inkludert, og enkelte beregninger er gjennomført flere ganger i ulike situasjoner. På grunn av dette, finnes det varierende (og noen ganger motstridende) informasjon rundt enkelte strukturelle komponenter.

4.2 Datamodellering, generelt

I mange tilfeller for modellering er det ønskelig å definere tverrsnittsgeometrien til bjelker innad i Abaqus, enten gjennom å velge standardiserte profiltyper eller ved å detaljkonstruere tverrsnitt innad i Abaqus for så å «meshe» konstruksjonen. Den førstnevnte metoden er nyttig dersom konstruksjonen som skal analyseres er veldig lik de tilgjengelige profiltypene. Den sistnevnte metoden vil teknisk sett gi det mest korrekte resultatet, men kan være veldig tidkrevende for større konstruksjoner og kan føre til unødvendig store problemstørrelser som programmet må løse. Denne metoden egner seg derfor best til detaljanalyser med fokus på lokale effekter.

Datamodellen for Bybrua er hovedsakelig satt sammen av B31 Timoshenkobjelker [17] for alle generelle strukturelle komponenter og stav-elementer (truss) for kablene. Alle koblingene mellom komponenter er etablerte gjennom Connector-elementer [17]. Her er det valgt å modellere bjelkeelementene med *BEAM GENERAL SECTION [17]. Dette gjør at Abaqus gjennomfører beregningen i analysen basert på forhåndsdefinerte verdier. Denne metoden kombinerer funksjonene for bjelketverrsnitt og materialeegenskaper, og tillater at de forhåndsdefinerte verdiene (areal, andre arealmoment, etc.) kan direkte legges på bjelkene [17]. Dette gir en frihet i modelleringen ovenfor at tverrsnittsverdiene til bjelkene ikke er låst til en definert geometri, slik som vil være tilfelle dersom standardiserte profiltyper er valgt.

Tverrsnittsverdier for alle komponentene til Bybrua er beregnet manuelt i Mathcad (se vedlegg C), og de beregnede resultatene er lagt til på de gjeldene bjelkeelementene i input-filene til datamodellen (se vedlegg F).

Bjelkene er generelt modellerte med noder som ligger langs arealsenteret til gjeldende komponent. Siden alle tverrsnitt i denne analysen kun består av ett materiale/massetetthet hver (enten stål eller betong), er massesenteret til alle bjelkeelementene antatt til å være lik arealsenteret i under denne modelleringen.

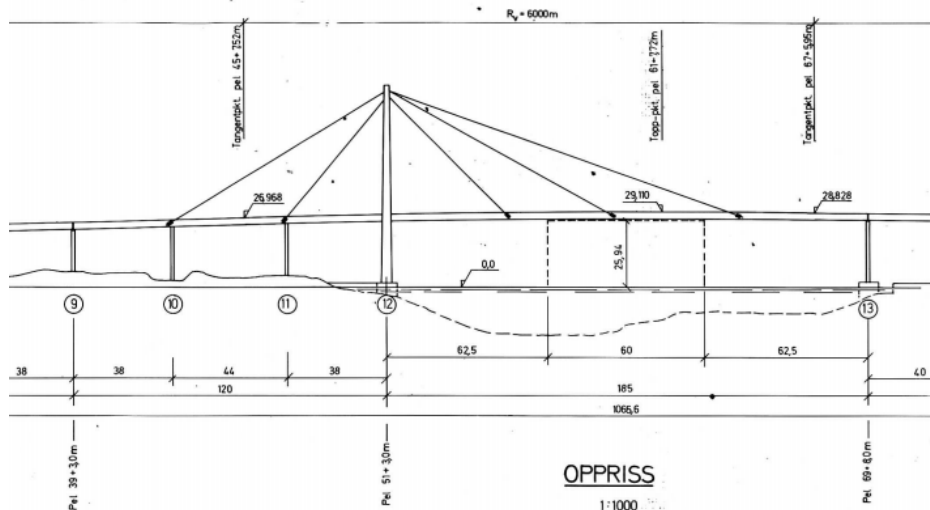
Skjærsenter er ikke spesifisert i denne modellanalysen, og skjærsenteret er derfor også antatt til å ligge i arealsenteret for alle de strukturelle komponentene. Dersom avstanden mellom arealsenteret og skjærsenteret til brobanen er relativt stor, kan dette ha en påvirkning for de resulterende egenmodene for torsjon. Hvor stor betydning dette har vil eventuelt komme frem under sammenligning med måledata.

Det finnes mange metoder for å modellere koblinger mellom mekaniske komponenter med begrensede frihetsgrader. I Abaqus kan dette kan blant annet gjøres ved å bruke funksjonen *MPC (Multi-point constraints) [17], danne en «Linear constraint equation» mellom nodene gjennom funksjonen *EQUATION [17], eller ved å etablere et Connector-element [17] mellom nodene. I Abaqus-modellen til Bybrua er Connector-elementer av type CONN3D2 [17] benyttet til å modellere alle frihetsgradkoblinger.

Connector-elementer er allsidige koblingselementer som kan benyttes for å danne spesielle koblinger mellom noder, der ulike frihetsgrader mellom nodene kan begrenses etter behov. Det er også mulig å definere et bevegelsesområde mellom komponenter, i tillegg til friksjon, låsemekanismer og vilkår for brudd [17]. I motsetning til MPC (Multi-point constraints), vil ikke Connector-elementer eliminere frihetsgrader, og problemstørrelsen/matrisen blir derfor ikke redusert. MPC kan derfor bli betraktet som en mer effektiv måte for å danne koblinger mellom komponenter [17]. På den andre siden er Connector-elementer betraktet som en enklere metode for å danne komplekse koblinger mellom komponenter [17]. Connector-elementer ble valgt i dette tilfellet hovedsakelig med tanke på at de er enkle å bruke og endre på, sistnevnte er vektlagt på grunn av usikkerheten rundt realiteten av koblingene i Bybrua, der det er ønskelig å kunne justere koblingen underveis i prosessen ettersom ny informasjon kommer frem.

4.3 Oversikt og aksesystem

Det er valgt å avgrense datamodellen av Bybrua til hovedspennet på 185 meter i tillegg til 3 sidespenn som har en tilknytning til kabelforankringene. I de byggetekniske tegningene for Bybrua vil denne avgrensningen tilsvare akse 9 til akse 13, se figur under.



Figur 4.1 Oversikt (oppriss) av Bybrua, utklipp av tegning fra Statens vegvesen

Datamodellen vil derfor bestå av:

- Brodekke av både betong (akse 9 til 12) og stål (akse 12 til 13)
- Søylar av betong som brodekket er koblet til i akse 10 og 11 (to søylar per akse)
- Tårn av betong (A-form) med en «rigelbjelke» som brodekket er koblet til
- Tverrbjelke koblet til brodekket for å forankre kablene
- Kabler som er forankret i toppen av tårnet og tverrbjelkene

På grunn av denne avgrensningen er det valgt å etablere et eget lokalt aksesystem for datamodellen, som da skiller seg fra aksesystemet som er definert i arbeidstegningene. Abaqus opererer med et globalt aksesystem (x,y,z) der det også kan spesifiseres lokale akser for elementer. Derimot, dersom man skal definere noe aksespesifikt, brukes et nummerert aksesystem (1,2,3). For det globale aksesystemet tilsvarer akse 1,2 og 3 henholdsvis x-akse, y-akse og z-akse, men for enkelte lokale aksedefinisjoner vil dette variere.

Origo, eller punkt (0,0,0) i aksesystemet er valgt som opplageret i akse 9, som også er arealsenteret til brodekket av betong i akse 9. I dette koordinatsystemet går x-retning langs brodekket (mot akse 13), y-retning går tvers på brodekket og z-retning går vertikalt på brodekket. Siden høydene (z-retning) til komponentene ikke tilsvarer de reelle kotehøydene til broen, er det derfor nødvendig å transformere kotehøydene til det lokale koordinatsystemet i Abaqus-modellen. Her vil alle noder da få en z-komponent relativt til tyngdepunktet til brodekket av betong i akse 9.

4.4 Randbetingelser

Randbetingelser for en konstruksjon er viktig å definere riktig, siden det gir grunnlaget for hvordan den kan deformere seg og hvordan krefter er fordelt. I tilfellet for modellen til Bybrua, er det definert randbetingelser i nodene som avslutter modellen, i tillegg til koblingene mellom komponenter.

Randbetingelsene er definert i Abaqus gjennom funksjonen *BOUNDARY CONDITIONS [17], der man kan bestemme bevegelsesrestriksjonene til en node for frihetsgradene basert på det globale aksesystemet i modellen. Disse frihetsgradene er henholdsvis U1, U2, U3, UR1, UR2 og UR3, der de første tre frihetsgradene tilsvarer bevegelse langs x,y og z-akse og de tre siste frihetsgradene er for rotasjon [17].

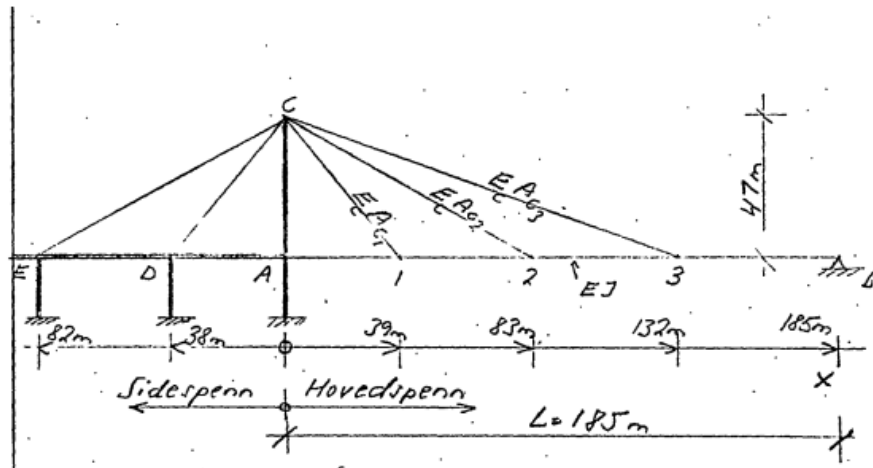
4.4.1 Endelagre

Siden datamodellen er avgrenset mellom akse 9 og 13 fra den ekte brua, er disse avgrensningene erstattet med opplagere som begrenser bevegelse. I akse 9 er det valgt å begrense brodekket for bevegelse langs y- og z-retning, men tillat å bevege seg i x-retning. I tillegg er frihetsgraden for rotasjon om x-aksen også begrenset. Opplageret i akse 9 fungerer derfor som et slags glidelager. I akse 13 er det valgt å begrense brodekket for bevegelse langs alle akseretninger, og tillate rotasjonsbevegelser rundt alle akser med unntak for rotasjon om x-akse. En oversikt for de begrensede frihetsgradene til endelagrene er gitt i tabellen under.

Tabell 4.1 Begrensede frihetsgrader for endelagre i Abaqus-modellen

Frihetsgrad	Akse 9 (node 1)	Akse 13 (node 70)
U1		X
U2	X	X
U3	X	X
UR1	X	X
UR2		
UR3		

Valget av randbetingelsene for endelagrene er basert på informasjon fra de opprinnelige beregningene til brua, i tillegg til kommunikasjon med Statens vegvesen. Ifølge de opprinnelige beregningene, kommer det frem i enkle beregninger at broen er antatt som fritt opplagt i akse 13, se figuren under.



Figur 4.2 Statisk system av Bybrua, utklipp av beregning fra Statens vegvesen

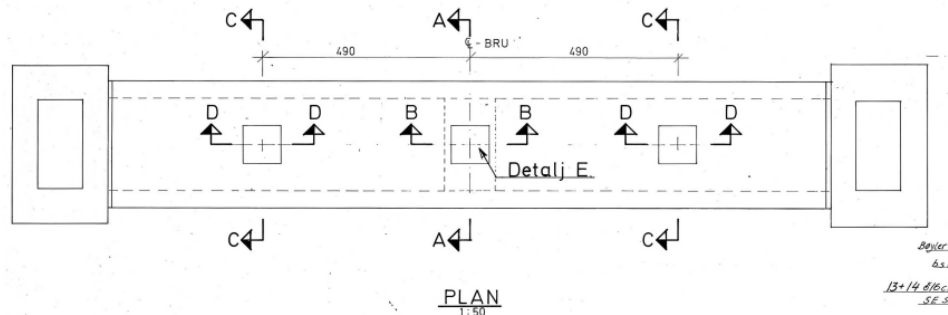
Det eksisterer trolig et ekspansjonslager i akse 9. Av den grunn er det rimelig å anta at broen ikke er fastholdt for bevegelser langs brobanen i akse 9. Rotasjon om x-aksen er valgt å begrense på grunn av at kontaktflatene mellom brodekket og lager i akse 9 og 13 sannsynligvis dekker hele bredden til bunnen av tverrsnittet. Basert på dette kan det derfor antas at brodekket vil være relativt begrenset ovenfor rotasjoner om langsgående akse.

4.4.2 Søyler og tårnben

Søylene som står i akse 10 og 11 og tårnbenene i akse 12 som holder brodekket av betong oppe, er i bunnen festet til et fundament. I datamodellen er disse fundamentene ignorerte, og erstattet med randbetingelser. Her er det valgt å definere søylene og tårnbenene med alle frihetsgrader begrensede i bunnen. Dette er basert på forenklete beregninger som viser at søylene blir betraktet som fast innspente, se figur 4.2.

4.4.3 Kobling tårn til brodekket

I akse 12 er brodekket koblet til en tverrbjelke som fester begge tårnbenene, i de opprinnelige beregningene og tegningene blir denne omtalt som en rigel. Denne forbindelsen mellom brodekket og rigel er vist i arbeidstegningene, se figur under og vedlegg A.



Figur 4.3 Kobling mellom rigel og brodekket, utklipp av tegning fra Statens vegvesen

Forbindelsen består av tre koblinger som går langs rigel-bjelken. De ytterste koblingene har en form som et betongstøpt trapes for delen på rigelbjelken, her kan det tenkes at de andre delene av koblingene fra brubanen vil utfylle trapeset slik at hele koblingen blir en kvadratisk plate.

Koblingen som ligger i midten av rigelbjelken er ulik de ytterste koblingene. I stedet for et trapes kommer det fram gjennom arbeidstegningene at denne koblingen har form som et hult kvadrat støpt av betong. Her kan det igjen tenkes at den andre delen av koblingen (fra brodekket) vil utfylle formen til en kvadratisk plate. Se vedlegg A for arbeidstegning.

Basert på dette kan det antas at de ytterste lagrene gir en minimal begrensning for bevegelser i horisontalplanet ettersom trapesformen tillater en viss glidning. Den eneste begrensningen for denne koblingen ligger i det midterste lageret. Det er derfor antatt at koblingen mellom brodekket og rigel tillater rotasjoner i horisontalplanet (om z-aksen eller UR3 i Abaqus). De resterende frihetsgradene er valgt å begrense, og koblingen kan da ellers bli betraktet som fast innspent. I realiteten vil denne koblingen ha en viss begrensning for rotasjon i horisontalplanet, men som forenkling for modellens skyld kan dette tenkes å være et passende estimat. Det er også valgt å gjennomføre en tilleggsanalyse der rotasjoner i vertikalplanet ikke er begrenset i denne koblingen, se kapittel 5.4.

For å modellere denne koblingen, er det benyttet et Connector-element mellom nodene av «HINGE» type [17]. Denne koblingen fungerer da som et hengsel, og består av de kinematiske delkoblingene JOIN og REVOLUTE, der JOIN begrenser bevegelsene mellom koblingsnodene langs alle akser (fastsetter posisjon) og REVOLUTE setter begrensning på alle rotasjoner unntatt rundt første lokalakse på Connector-elementet [17]. Her er derfor det lokale aksesystemet til koblingen definert slik at førsteaksen tilsvarer den globale z-aksen i modellen.

4.4.5 Kobling søyler til brodekket

I følge de opprinnelige statiske beregningene der søyler er inkludert, blir koblingen mellom søyle og brodekket i akse 10 og 11 beregnet som en stiv forbindelse, se figur 4.2. I Abaqus-modellen er det derfor valgt å modellere forbindelsene mellom søylene og brodekket som stive for alle frihetsgrader, det vil si at brokonstruksjonen av betong totalt sett vil virke som en slags rammekonstruksjon. Disse koblingene er også etablerte som frie for rotasjoner i både vertikalplanet og horisontalplanet i en tilleggsanalyse av datamodellen, se kapittel 5.4 for mer detaljer.

Likt som koblingen mellom tårn og brodekket, er det her også valgt å ta i bruk Connector-elementer for å modellere koblingen. For å modellere en fullstendig stiv forbindelse gjennom Connector-element, er det benyttet en «BEAM» type kobling, som består av de kinematiske koblingene JOIN og ALIGN, der JOIN fastsetter relativ posisjon mellom koblingsnodene og ALIGN begrenser all rotasjon mellom nodene [17].

4.5 Kotehøyder til brobanen

Gjennom arbeidstegningen med en detaljert akseoversikt ovenfor Bybrua (se vedlegg A), kommer det fram at høydene for toppen av brobanen følger et lineært fall i noen seksjoner av broen og vertikalkurveradius i andre deler. I den aktuelle delen av brua mellom akse 9 og 13, er det definert en lineær høydeøkning på 2.671% fra akse 9 (Pel 39+3.0m) til tangentpunktet Pel 45+7.52m. Fra Pel 45+7.52m til Pel 67+5.95m følger brobanen en vertikalkurveradius $R_v=6000\text{m}$, der Pel 61+7.72m tilsvarer toppunktet for kurven. I siste del fra Pel 67+5.95m til akse 13 (Pel 69+8.0m), følger brobanen et fall på 0.971%.

De kjente høydene for toppen av brobanen er 26.968m ved Pel 45+7.52m, 29.110m ved Pel 61+7.72m og 28.828m ved Pel 67+5.95m. Basert på denne informasjonen, er kurvefunksjonene for de ulike seksjonene beregnet slik at høydekoordinatene til nodene langs brodekket kan bli definert. Beregningene for kurvefunksjonene er gjennomført i vedlegg D, og resultatet er presentert i tabellen under. I lag med akseoppsettet definert i kapittel 4.3, er $x=0$ satt i akse 9, som gir $x=305\text{m}$ for akse 13. Z-koordinatet her tilsvarer da toppen av brobanen med høyder som samsvarer med arbeidstegningen, og z-koordinatet ikke er justert til det lokale aksesystemet i datamodellen.

Tabell 4.2 Funksjoner for beregning av z-koordinater langs brobanen

Høydefunksjon kotehøyde, z [m]	Område, x [m]	Startpunkt	Sluttpunkt
$z = 25.2447 + 0.02671 * x$	[0, 64.52]	Akse 9	Pel 45+7.52m
$z = -8.3384 * 10^{-5} * x^2 + 0.0375 * x + 24.8963$	[64.52, 282.95]	Pel 45+7.52m	Pel 67+5.95m
$z = 28.828 - 0.00971 * (282.95 - x)$	[282.95, 305]	Pel 67+5.95m	Akse 13

Som forklart i kapittel 4.3, er origo i det lokale aksesystemet for Abaqus-modellen valgt som arealsenteret til brodekket av betong i akse 9. For modelleringen av brodekket, er da z-koordinatene til nodene justert slik at $z=0$ i akse 9 og resten av z-koordinatene i modellen er definert relativt til dette, se vedlegg C.

Ettersom at brodekket av betong og brodekket av stål har ulikt arealsenter/tyngdepunkt, er det valgt å justere nodene langs brodekket i datamodellen for denne høydedifferensen, se vedlegg C. I akse 12 der brodekket går fra betong til stål, vil det derfor eksistere to noder. Det kan antas at koblingen mellom de to brodekkene er fullstendig stiv. Derfor er det etablert et «BEAM» Connector-element [17] mellom nodene, slik at begge nodene er låst for alle frihetsgrader.

Brodekket av betong har et arealsenter/tyngdepunkt som ligger 1.404 m fra bunnen av tverrsnittet, mens brodekket av stål har et tyngdepunkt som ligger 1.374 m fra bunnen av tverrsnittet, se resultater fra beregninger i vedlegg C. Differansen mellom tyngdepunktene vil derfor bli -0.004 m, det vil si at nodene til brodekket av stål er satt 0.004 m lavere relativt til brodekket av betong.

Her er tyngdepunktene sammenlignet med antagelsen at toppflaten til begge tverrsnittene ligger i samme høyde. Et usikkerhetsmoment her er at det er uklart om de gitte kotehøydene i oversiktstegningen inkluderer tillegg som asfalt og eventuelle belegg på toppen av selve tverrsnittene. Dersom det er tilfelle, er det da en mulighet for at brodekkene har ulik tykkelse med f.eks. friksjonsbelegg, og det kan da være en mulighet for at tverrsnittene er plassert høyere eller lavere i forhold til hverandre.

Koordinatene til nodene langs brodekket med alle justeringer er beregnet i Excel, se vedlegg E. Dette regnearket beregner z-koordinatet til en brodekknode ut ifra det gitte x-koordinatet. Her er det valgt å inndele nodene langs brodekket i ca. 5 meter lange elementer som grunnlag. Nodene knyttet til brodekket av betong er derimot basert på plasseringen av de beregnede ekvivalente kreftene fra spennkablene (se kapittel 4.6), og elementlengdene vil derfor være relativt ujevne.

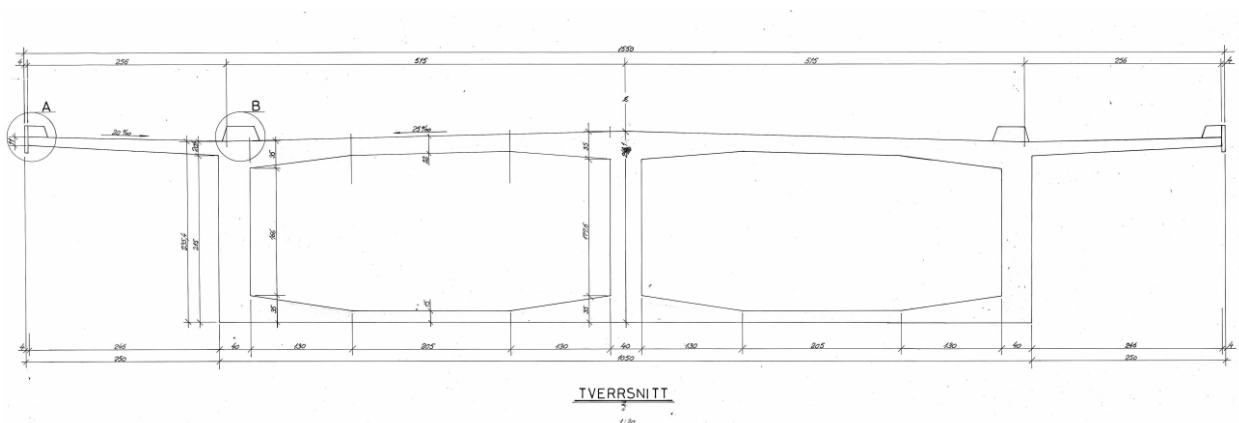
4.6 Brodekke av betong

Brodekket av betong strekker seg fra akse 9 til akse 12 i den avgrensede datamodellen. Dekket er slakkarmert i tillegg til å bestå av spennkabler. Tverrbjelker er støpt på i akse 10 og 11 for å forankre brodekket til kablene.

Av alle komponentene til Bybrua, er brodekket av betong samtidig det mest kompliserte og den mest ukjente delen av konstruksjonen. Blant annet er masse og mekaniske egenskaper ikke estimert i de opprinnelige beregningene, det vil si at det ikke er noe å sammenligne de beregnede verdiene med. De inkluderte spennkablene er relativt komplekse, og en rekke antagelser er derfor nødvendige for å anvende effekten av dem til en datamodell. For egenfrekvensanalyser kan konstruksjoner av betong også relativt vanskelige å «treffe» riktig ettersom at egenskapene til materialet vil variere. Alt dette kombinert gjør brodekket av betong til et stort usikkerhetsmoment under modelleringen av Bybrua.

4.6.1 Tverrsnitt

Tverrsnittet for brodekket av betong av er gitt gjennom en generell formtegning, der alle dimensjoner er målsatte, se vedlegg A. Denne tegningen er gjeldende for felt 10-11 og 11-12. For enkelthetens skyld er dette tverrsnittet også antatt å være gyldig for feltet mellom akse 9 og 10. Figuren under viser gjeldende tverrsnitt.



Figur 4.4 Tverrsnitt av betongdekket, utklipp av arbeidstegning fra Statens vegvesen

De nødvendige forårsdefinerte tverrsnittsverdiene til brodekket av betong for datamodelleringen, er beregnet i vedlegg C. Dette inkluderer blant annet det andre arealmomentet om både horisontalakse og vertikalakse, arealsenter og torsjonskonstant. Lite informasjon ovenfor brodekket av betong eksisterer i de opprinnelige beregningene, og det er derfor lite å sammenligne med.

De andre arealmomentene er beregnet med Steiners teorem ved å dele tverrsnittet opp i rektangulære- og trekantsegmenter, for så å summere arealmomentbidraget fra hvert segment med hensyn på avstandene til arealsenteret av tverrsnittet.

Torsjonskonstanten til tverrsnittet er utregnet ved å forenkle tverrsnittet til et rektangulært tverrsnitt med to celler og tynne vegger [18], se beregning i vedlegg C. Dette vil da overestimere torsjonsstivheten en del ettersom at veggene ikke er særlig tynne, men vil gi et passende estimat uten å ty til beregning av tverrsnittsverdier gjennom FEM. De utstikkende flensene vil ha neglisjerbar effekt på torsjonsstivheten siden de ikke bidrar til lukking av tverrsnittet, og det er derfor gyldig å utelukke disse i en forenklet beregning [18]. Det er verdt å merke seg at veggene i midten av tverrsnittet ha en betydelig innvirkning på torsjonskonstanten, og den beregnede torsjonskonstanten hadde vært lavere dersom tverrsnittet ble antatt som én lukket celle.

Ifølge arbeidstegningen for tverrsnittet, er den brukt betong av type C35/B35 for brodekket, se vedlegg A. Elastisitetmodulen til brodekket av betong er beregnet ut fra prosedyren i NS-EN1992-1-1 kapittel 3 [19], ved å anta en betongalder på 42 år og at betongen er urisset, se vedlegg C for detaljer. Poisson's tall ν er da antatt å være 0.2 (urisset), den lineære temperaturkoeffisienten α er antatt å være $10 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ og skjærmodulen G er antatt å være 21 GPa. Massetettheten ρ er antatt å være 2500 kg/m^3 , med ekstra inkludert asfaltvekt blir dette 2719.3 kg/m^3 , se kapittel 4.11.

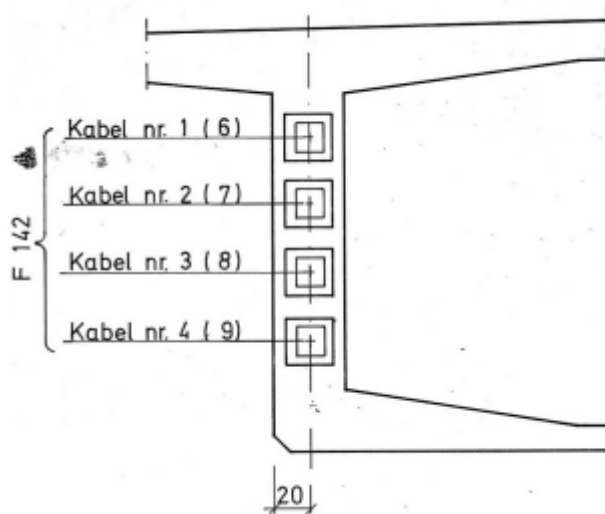
De resulterende tverrsnittsverdiene for brodekket av betong er gitt i tabellen under, disse verdiene er videre brukt til Abaqus-modellen.

Tabell 4.3 Beregnede tverrsnittsverdier for brodekket av betong

A [m ²]	8.208
I _y [m ⁴]	7.478
I _z [m ⁴]	126.21
J [m ⁴]	360.654
E [GPa]	37.92
G [GPa]	21
α [K ⁻¹]	10*10 ⁻⁶
ν	0.2
ρ [kg/m ³]	2719.3

4.6.2 Spennkabler

Ifølge arbeidstegningene for Bybrua, kommer det fram at brodekket av betong inneholder spennkabler kabler (sannsynligvis etteroppspente) for å motvirke vertikale forskyvninger i sidespennene, se vedlegg A. Det er plassert både hovedkabler av parabolisk form, og tilleggskabler med rett form. De paraboliske kablene strekker seg fra akse 9 helt til akse 12 og er inndelt i tre kabler (en for hver støppeatappe) som følger samme kurve. Disse tre kablene har varierende angitte spennkrefter. De rette spennkablene er plasserte i både opplegg over søyle og midt i feltene. I feltet mellom akse 10 og 11 er det derimot ikke inkludert rette kabler på undersiden av tverrsnittet, se vedlegg A. Spennkablene er plasserte i veggene i tverrsnittet, se figur under.



Figur 4.5 Plassering av spennkabler (snitt), utklipp av tegning fra Statens vegvesen

For å inkludere effekten av spennkablene i Abaqus-modellen, er de ekvivalente kreftene som virker på brodekket fra kablene beregnet og lagt til som statiske krefter og moment på nodene og elementene langs brodekket. Dette er da en forenklet metode for å inkludere effekten av kablene, det finnes definitivt andre metoder for å inkludere denne effekten mer nøyaktig. Den tilgjengelige informasjonen fra arbeidstegningene viser at alle kablene har varierende komplekse kurvatur og høydeplasseringer, i tillegg er de gitte oppspenningskreftene anbefalte minimumsverdier. På grunn av dette vil effekten av kablene uansett være et usikkerhetsmoment i modelleringen.

Spennkreftene til kablene etter tap er antatt å tilsvare de gitte min. oppspenningskreftene i arbeidstegningen, se vedlegg A. Oppspenningskreftene er også vist i tabellen under.

Tabell 4.4 Minimum samlet spennkrefter etter låsing

Støpe-etappe	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3
9	1425 Mp	640 Mp	385 Mp
10	1530 Mp	370 Mp	-
11	1425 Mp	-	160 Mp

Her er gruppe 1 hovedkablene med parabolisk form. Gruppe 2 tilsvarer de rette kablene som er plasserte over søylene i akse 10 og 11 og gruppe 3 tilsvarer de rette kablene som er plasserte midt i feltene 9-10 og 11-12. Enheten «Mp», eller megapond, er en enhet for kraft som tidligere var en standard enhet. 1 Mp tilsvarer 9.81kN, dersom en antar at tyngdeakselerasjonen er 9.81m/s^2 [20].

De ekvivalente kreftene fra hovedkablene med paraboliske segmenter er beregnet ved å bruke en forenklet beregningsprosedyre for realistisk kabel profil til statisk ubestemte bjelkedeler [21]. Her er kabelprofilene delt inn i paraboliske segmenter etter infleksjons-, topp- og bunnpunkter. De resulterende ekvivalente kreftene er beregnet per segment, se vedlegg C for beregning.

De ekvivalente kreftene fra de rette tilleggskablene er inkluderte gjennom momenter og fra den konstante eksentrisiteten til spennkreftene ($M=P*e$), i tillegg til aksialkrefter som tilsvarer oppspenningskreftene, se vedlegg C.

Som nevnt i kapittel 4.5, er nodene langs brodekket av betong delt opp etter hvordan de resulterende ekvivalente kreftene er plasserte. Her er nodene plasserte slik at bjelkeelementene vil tilsvare de oppdelte paraboliske kabelsegmentene. I tillegg er ekstra noder lagt til slik at kreftene fra de rette kablene kan plasseres i endepunktene til kablene. I Abaqus er de ekvivalente kreftene modellerte gjennom funksjonene *CLOAD [17] for punktlastene plasserte på gjeldende noder og *DLOAD [17] for de fordelte lastene på gjeldende elementer.

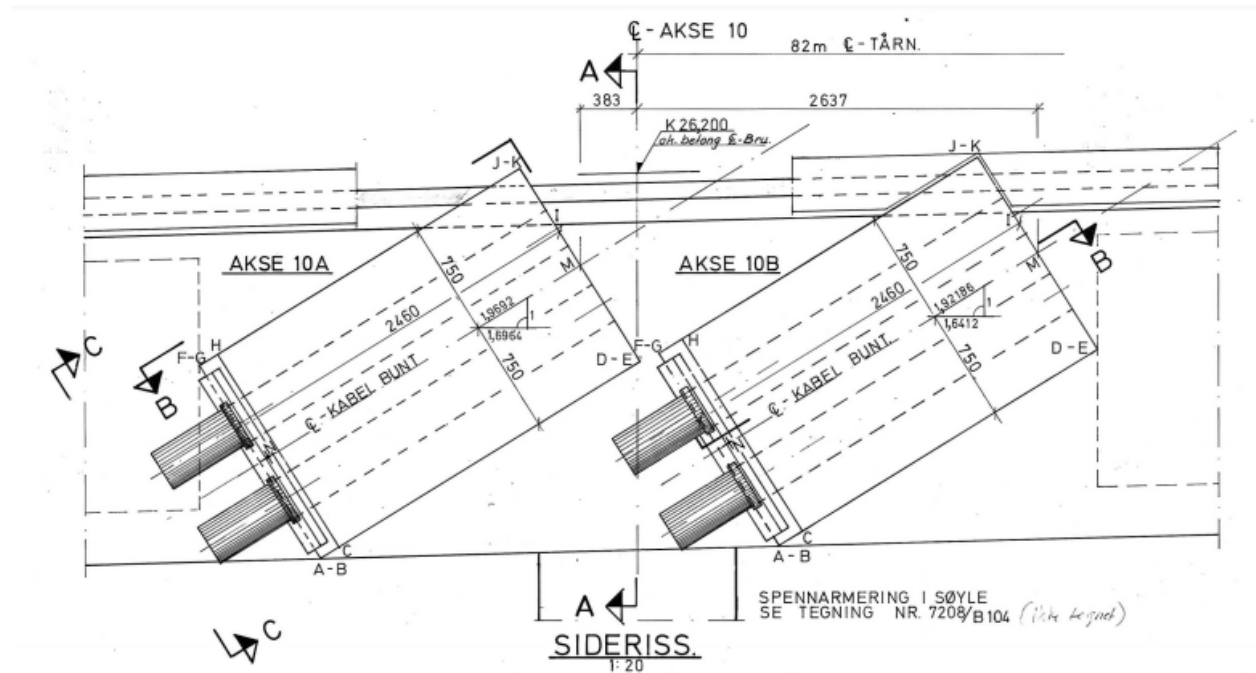
Kablene er sannsynligvis etteroppspente for hver støpetappe. I tillegg ble brodekket av betong støpt før stålseksjonene ble monterte [11]. Det vil si at all form for oppspenning skjedde før brodekket av stål ble koblet på. Resulterende deformasjoner og spenninger fra spennkablene vil derfor i realiteten ha neglisjerbar innflytelse på brodekket av stål.

Gjennom denne metoden med ekvivalente krefter, vil enkelte krefter ha en viss påvirkning på brobanen av stål, siden hele brobanen er konstruert i datamodellen før lastene er påført. For eksempel vil de aksiale spennkreftene ha en komprimerende effekt på brodekket av betong, som vil resultere i strekk i brodekket av stål siden de er koblet sammen. Dette gjelder for så vidt også

for de andre ekvivalente kreftene. Det viktigste med denne metoden er hovedsakelig for den statiske delen av modellanalysen, men det vil også ha en betydning for hvordan egenfrekvensene og egenmodene vil framkomme. Effekten av de ekvivalente kreftene fra spennkablene i forhold til vertikale forskyvninger er vist i kapittel 5.2.

4.6.3 Tverrbjelker

For å forankre kablene til brodekket av betong er det montert tverrbjelker henholdsvis i akse 10a, 10b og 11. Akse 10a og 10b ligger på hver side av akse 10. Figuren under viser dimensjonene til tverrbjelkene.



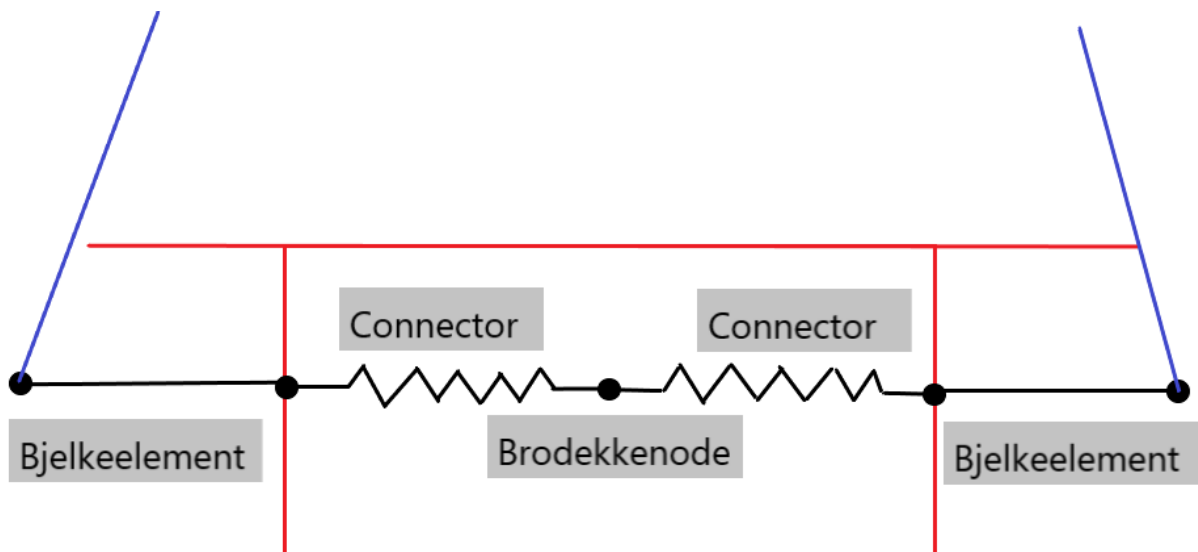
Figur 4.6 Tverrbjelker i akse 10a og 10b, utklipp av tegning fra Statens vegvesen

En metode for å modellere tverrbjelker kan være å anta tverrbjelkene som «uendelig» stive bjelkeelementer med null masse, og tilføre massen fra tverrbjelkene som tilleggsmasse på brodekket, enten i form av ekstra massetetthet på brodekkeelementene eller som punktmasse i noden som tverrbjelkene er koblet til. For en frekvensanalyse vil massebidraget være den viktigste delen å inkludere fra tverrbjelkene, ettersom at stivheten i tverrbjelkene vil oftest ha neglisjerbar effekt på egenfrekvensene for broen i sin helhet.

For Bybrua er massefordelingen til brodekket av betong derimot ukjent. Av denne grunn er det derfor ønskelig å finne ut et omtrentlig tverrsnitt på tverrbjolkene, siden dette kan gi grunnlag for hvor mye ekstra masse som brodekket er påført som resultat. Etersom at tverrsnittet allerede er estimert for å finne massebidraget, er det da også praktisk å modellere tverrbjolkene som bjelkeelementer med stivhetsverdier.

Gjennom dette vil man få en indikasjon på kapasiteten og stivheten til tverrbjolkene i forhold til kreftene de skal overføre mellom kabler og brodekke. Og vil fungere som en 'ekstra' kontroll ovenfor de beregnede initiale kabelspenningene som kreves for å motvirke nedbøyning av statisk egenvekt. Dersom resulterende deformasjoner i tverrbjolkene er større enn hva som forventes som normalt, kan det være en indikasjon på at kabelspenningene eller andre komponenter på modellen er feil.

Det er valgt å inkludere disse tverrbjolkene i datamodellen som utkragerer (B31 Timoshenkobjelker) ut fra siden av brodekket med et definert tverrsnitt. Delene av tverrbjolkene som er innkapslet av tverrsnittet til dekket, er erstattet av fullstendig stive «BEAM» Connector-elementer [17] og massen er påført som punktmasse gjennom funksjonen *MASS [17] på tilknyttede brodekke node. Figuren under viser generelt hvordan tverrbjolkene er modellerte.



Figur 4.7 Oversikt for modellering av tverrbjelker

Gjennom arbeidstegningene for Bybrua, finnes det tilstrekkelig informasjon til å tolke et tverrsnitt for tverrbjelkene av betong. Tverrbjelkene er her antatt som rektangulære bjelker av betong med dimensjoner $b \times h = 2,46\text{m} \times 1,5\text{m}$, se figur 4.6. De er også roterte i henhold til vinkelen til de forankrede kablene. Vinklene på tverrbjelkene er hentet fra arbeidstegningen som detaljerer tverrbjelkene i 10a og 10b, se vedlegg A.

Disse to gitte vinklene er også kontrollerte ved å estimere kabelvinklene gjennom nodene i datamodellen. se tabellen under for sammenligning. Her er vinklene definerte i forhold til horisontalaksen.

Tabell 4.5 Sammenligning av vinkler til tverrbjelker

	Tverrbjelke 10a	Tverrbjelke 10b
θ (arbeidstegning)	0.533 rad	0.547 rad
θ (Abaqus-modell)	0.535 rad	0.551 rad

Resultatet viser at forankringspunktene for kablene i Abaqus-modellen passer bra i forhold til den virkelige utbyggingen. Vinklene til resten av tverrbjelkene er ikke gitte (spesielt tverrbjelkene av stål). I de tilfellene er kabelvinklene ut fra Abaqus-modellen i stedet benyttet.

De mekaniske egenskapene til tverrbjelkene er beregnet ved å anta et rektangulært bjelketverrsnitt transformert med en vinkel, se beregning C for detaljer.

Torsjonskonstanten er beregnet ved å bruke formel for rektangulært tverrsnitt [22]. Materialet til tverrbjelkene er av betong C45/B45 og er antatt som urisset, se vedlegg C. Resultatet for tverrsnittsverdiene til tverrbjelkene er vist i tabellen under. Disse verdiene er videre brukt i Abaqus-modellen.

Tabell 4.6 Beregnede tverrsnittsverdier for tverrbjelker av betong

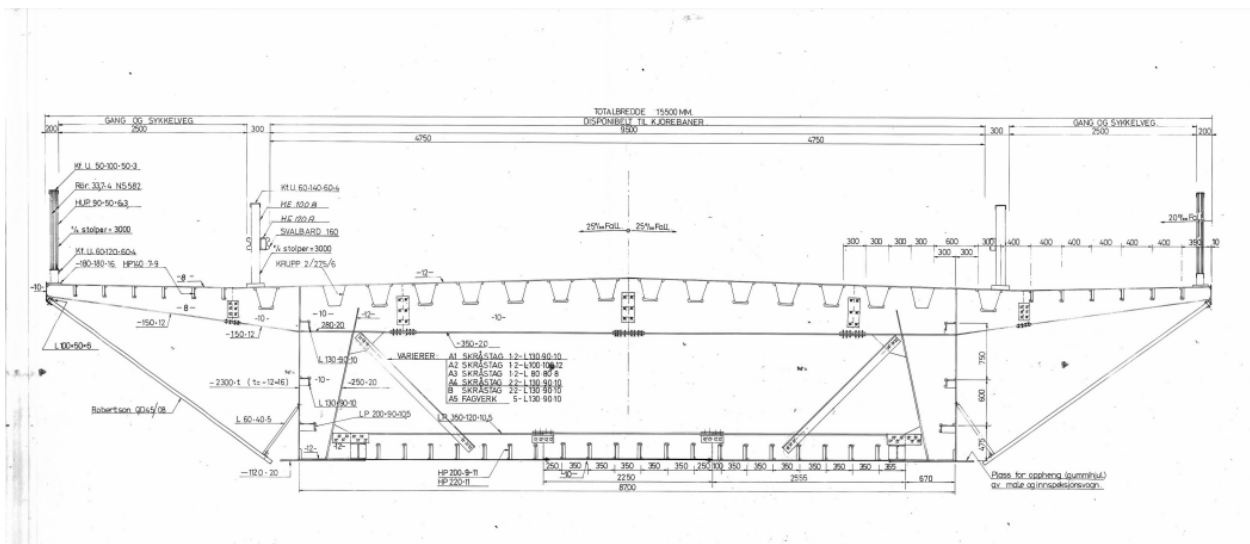
	Tverrbjelke 10a	Tverrbjelke 10b	Tverrbjelke 11
A [m ²]	3.69	3.69	3.69
I _y [m ⁴]	0.993	1.008	1.414
I _z [m ⁴]	1.559	1.544	1.139
J [m ⁴]	1.717	1.717	1.717
E [GPa]	40.151	40.151	40.151
G [GPa]	21	21	21
α [K ⁻¹]	10*10 ⁻⁶	10*10 ⁻⁶	10*10 ⁻⁶
ν	0.2	0.2	0.2
ρ [kg/m ³]	2500	2500	2500
θ [rad]	0.533	0.547	0.904

4.7 Brodekke av stål

Fra akse 12 til akse 13, er brodekket konstruert av en lukket ortotrop stålkasse [16]. Dette er hovedspennet til broen, og har en lengde på 185 meter. Ståldekket ble montert i seksjoner med ulike platetykkelser og er forankret til kabel 5, 6 og 7 gjennom tverrbjelker.

4.7.1 Tverrsnitt

Tverrsnittet til brodekket av stål er gitt i en arbeidstegning for generelt tverrsnitt, se vedlegg A og figuren under. Denne arbeidstegningen er utgangspunktet for modelleringen i Abaqus. Det er også opplyst at brobanen av stål er montert i seksjoner, der tykkelsen på enkelte stålplater har en større tykkelse i seksjonene rundt kabelforankringene. Informasjon ovenfor alle de monterte seksjonene er også definert i de opprinnelige beregningene og består blant annet av andre arealmomenter om horisontalaksen, masser og ulike platetykkelser, se vedlegg B.



Figur 4.8 Generelt tverrsnitt for brodekket av stål, utklipp av tegning fra Statens vegvesen

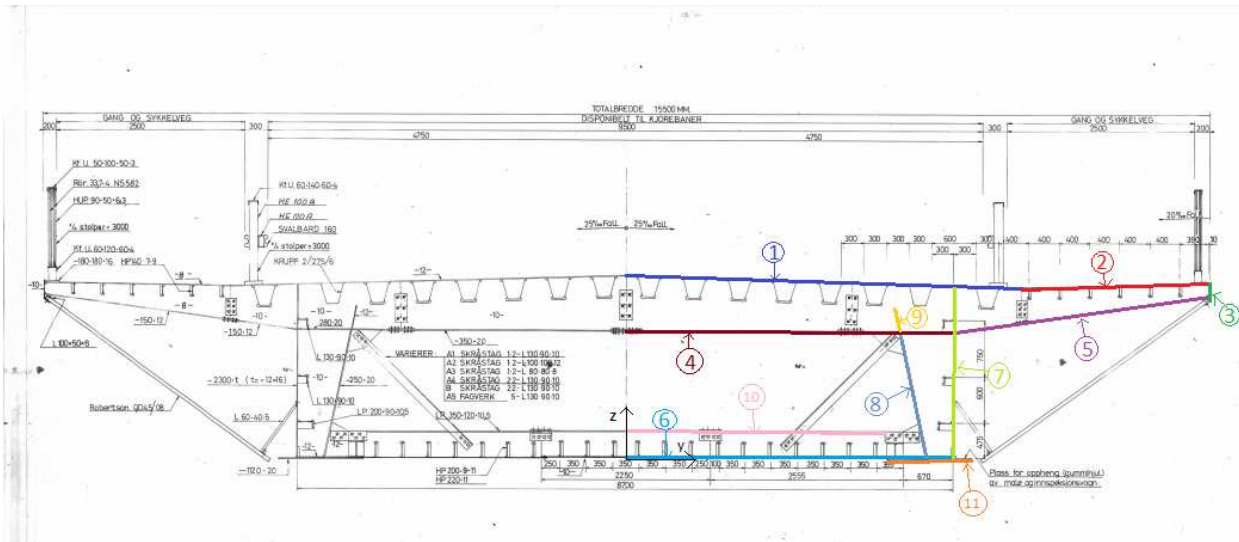
Den mest 'presise' metoden å modellere brobanen av stål i Abaqus på, vil derfor være å dele brobanen inn i bjelkeelementer som tilsvarer de monterte seksjonene, der tverrsnittsverdiene er beregnet for hver seksjon. Siden dette hadde vært en veldig tidkrevende modelleringsmetode, er det derfor bestemt å estimere et gjennomsnittstverrsnitt som er anvendt til hele brodekket av stål.

Oppsummeringsdokumentet for monterte stålseksjoner viser blant annet til hvordan platetykkelser og tykkelser for stivere varierer per seksjon. Arbeidstegningen viser kun et generelt tverrsnitt, og det er derfor nødvendig å justere verdier med høyde for hvordan brodekket faktisk ble bygget. Siden det er valgt å beregne for et gjennomsnittlig tverrsnitt, er gjennomsnittstykkelser for plater og stivere beregnet ved å behandle de monterte dataene i Excel, se vedlegg E. Her er de håndskrevne dataene per stålseksjon kopiert over til regnearket, og gjennomsnittsverdiene vektet på lengdene av seksjonene er beregnet. Dette er grunnlaget for beregningene av de mekaniske egenskapene i vedlegg C.

De mekaniske egenskapene til brodekket av stål er beregnet med utgangspunkt i beregningsprosedyren vist av Ibuki Kusano [23]. Noen justeringer er derimot gjort for å tilpasse prosedyren til ståldekket til Bybrua. Se vedlegg C for den aktuelle beregningen.

I denne beregningen er rekkverk ignorerte, ettersom at de antageligvis har lite bidrag i forhold til stivheten til dekket. De monterte dekkplatene av type Robertson QD45/08 vil ha neglisjerbart bidrag for stivhet siden de er opphengt og ikke sveist på, og er derfor også ignorerte i beregningen.

I beregningen for ståldekket er platene i tverrsnittet først definerte som linjesegmenter med en lengde, tykkelse og helningsvinkel i forhold til horisontalaksen. Ikke alle lengder er målsatte i arbeidstegningen, derfor er enkelte komponenter som ikke er målsatt målt ved hjelp av målestokk, dette inkluderer også høyden til hele dekket midt i veibanen, som er målt og antatt å være 2.450m. I dette tverrsnittet vil det være 11 platesegmenter med i beregningen. Se figuren under for hvordan segmentene nummererte. Siden tverrsnittet er symmetrisk om z-aksen er beregningen kun gjennomført for en halvdel av tverrsnittet.



Figur 4.9 Tverrsnitt for brodekket av stål med platenummerering

Bidraget til de andre arealmomentene om z- og y-akse fra hvert platesegment i forhold til arealsenteret er beregnet å rotere og transformere platesegment i i forhold til arealsenteret til tverrsnittet [23]:

$$I_{z_i} = 2(I'y_i \sin^2(\alpha_i) + I'z_i \cos^2(\alpha_i) + A_i(y_i - y_{plates})^2)$$

$$I_{y_i} = 2(I'y_i \cos^2(\alpha_i) + I'z_i \sin^2(\alpha_i) + A_i(z_i - z_{plates})^2)$$

Der A_i er arealet, α_i er vinkelen til platen om horisontalaksen, y_i og z_i er koordinatene til arealsenteret av platen i forhold til origo. y_{plates} og z_{plates} tilsvarer koordinatene til det overordnede arealsenteret til hele tverrsnittet i forhold til origo basert på platene.

$I'z_i$ og $I'y_i$ er de lokale andre arealmomentene til platesegmentet i om sitt eget arealsenter beregnet som horisontal plate:

$$I'z_i = \left(\frac{1}{12}\right) L_i d_i^3$$

$$I'y_i = \left(\frac{1}{12}\right) d_i L_i^3$$

der L_i og d_i er lengden og tykkelsen til platesegment i .

Noen av platesegmentene i tverrsnittet strekker seg ikke langs hele brobanen, i stedet har de en lengde og er plasserte periodisk hver 3. meter langs brodekket. I beregningen er det derfor tatt i bruk effektive faktorer som tar høyde for at noen plater ikke strekker seg langs hele brodekket. Tabellen under viser en oversikt for alle platene i beregningen, inkludert de effektive faktorene. Her vil en effektiv faktor på 1 bety at platesegmentet strekker seg langs hele brobanen, og vil ha et resulterende bidrag på 100% til både det totale arealet og andre arealmomentene til tverrsnittet. Tykkelsene til enkelte plater er beregnet etter midlende verdier fra de monterte seksjonene, se vedlegg E.

Tabell 4.7 Oversikt over platesegmenter i beregningen

Platesegment	Platelengde [mm]	Helningsvinkel (α) [rad]	Platetykkelse (d) [mm]	Langsgående lengde av plate [mm]	Effektiv bidragsfaktor
1	5251.6	0.0250	12.9	-	1
2	2500.5	0.0200	9.1	-	1
3	200	1.5708	10	-	1
4	4350	0	20	340	0.1133
5	3439.3	0.1514	12	150	0.05
6	4350	0	8.2	-	1
7	2341.3	1.5708	13.6	-	1
8	1686.7	1.3618	20	250	0.0833
9	300	1.3618	12	150	0.05
10	3500	0	10.5	350	0.1167
11	1120	0	20	-	1

I tillegg til plater, består tverrsnittet av stivere av typer «krupp», HP200, HP140, L130, LP200, samt to H-bjelker. Alle disse komponentene er inkluderte i beregningene. En oversikt over bidraget i forhold til areal- og andre arealmoment per stiver (relativt til sitt eget arealsenter) er presentert i tabellen under.

Tabell 4.8 Oversikt over egenskaper til langsgående stivere

	Krupp	HP200	HP140	H-Bjelke	L130	LP200
A [mm ²]	4.2553*10 ³	2.4230*10 ³	1.5081*10 ³	5.6000*10 ³	2.1000*10 ³	2.9348*10 ³
Iy [mm ⁴]	3.3732*10 ⁷	9.7657*10 ⁶	3.0563*10 ⁶	3.9187*10 ⁷	1.4404*10 ⁶	1.6685*10 ⁶
Iz [mm ⁴]	4.1815*10 ⁷	2.8061*10 ⁵	2.2350*10 ⁵	1.1447*10 ⁷	3.6204*10 ⁶	1.2370*10 ⁷

Resulterende verdier for areal, arealsenter og andre arealmomenter er presenterte i tabellen under. Her er bidrag fra både plater og langsgående stivere inkludert, arealsenter er relativt til origo i tverrsnittet, og andre arealmomenter er relativt til gjeldende arealsenter.

Tabell 4.9 Oversikt over stivhetsbidrag fra plater og langsgående stivere

	A [m ²]	Arealsenter y [m]	Arealsenter z [m]	Iy [m ⁴]	Iz [m ⁴]
Plater	0.4032	0	1.3902	0.4484	6.2235
Stivere	0.1601	0	1.3321	0.1623	1.8818
Totalt	0.5633	0	1.3737	0.6111	8.1053

Torsjonskonstanten til er beregnet ved å forenkle tverrsnittet til å kun inkludere de platene som lukker tverrsnittet fullstendig, og å bruke formel for tynnvegget lukket tverrsnitt. Stivere og segmenter som ikke bidrar til lukkingen av tverrsnittet gir et lite bidrag til torsjons-egenskapene for tverrsnittet, og kan derfor neglisjeres i en forenklet beregning [18].

Massetettheten til brodekket av stål er beregnet ved å anta den angitte samlede vekten på 1068 tonn for alle stålseksjoner i tillegg til å ta hensyn til ekstra asfaltvekt på 1.8 tonn/m, se vedlegg C. I tillegg til massen fra stålet i tverrsnittet, tar denne samlede vekten også hensyn til massebidraget fra skruer og diverse andre ekstra komponenter. Derfor vil en massetetthet basert på den ovennevnte samlede vekten være et mer virkelighetsnært estimat av vekten til brodekket av stål, enn om det var valgt å bruke et vanlig estimat på rundt 8000kg/m³ for det beregnede arealet av tverrsnittet. Den resulterende massetettheten til brodekket av stål er beregnet i vedlegg C.

De endelige resultatene fra tverrsnittsberegningen er gitt i tabellen under. Verdiene her er videre brukt til egenskapene av brodekket av stål i Abaqus-modellen.

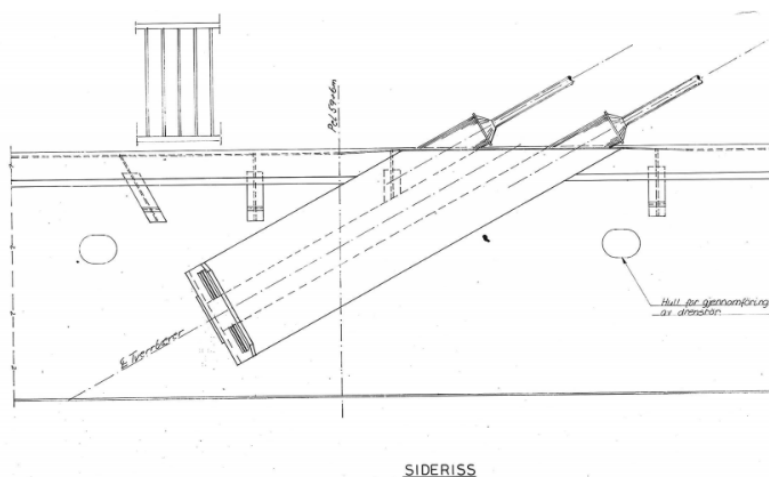
Tabell 4.10 Mekaniske egenskaper til ståldekket

A [m ²]	0.5633
I _y [m ⁴]	0.6111
I _z [m ⁴]	8.1053
J [m ⁴]	0.8255
E [GPa]	210
G [GPa]	80.7
α [K ⁻¹]	10*10 ⁻⁶
ν	0.3
ρ [kg/m ³]	13443

Her er elastisitetsmodulen E antatt til å være 210 GPa, skjærmodulen G antatt som 80.7 GPa, temperaturkoeffisienten α antatt som 10*10⁻⁶ og Poisson's tall antatt som 0.3.

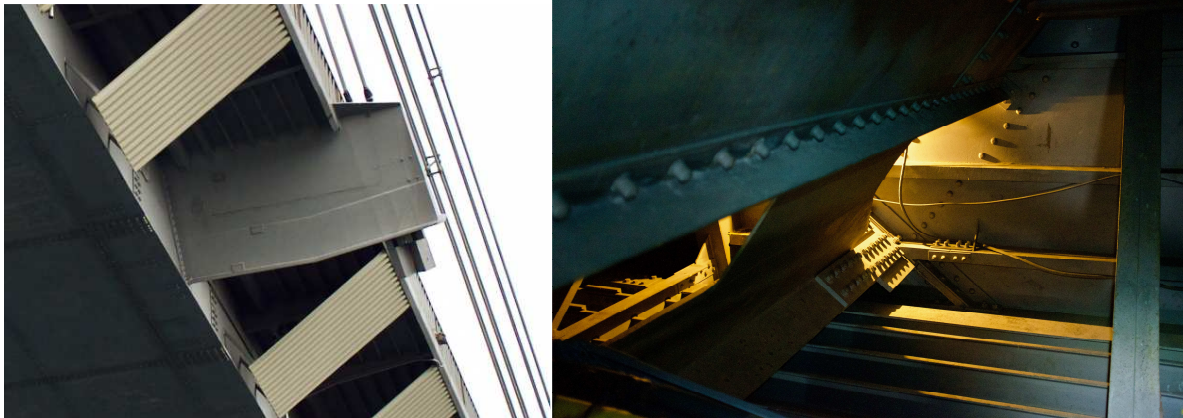
4.7.2 Tverrbjelker

For å forankre kabel 5, 6 og 7 til brodekket er det konstruert tverrbjelker/bærere av stål. Disse tverrbjelkene er beskrevet i arbeidstegningene til Bybrua, se vedlegg A.



Figur 4.10 Tverrbjelke av stål som vist i tegningene, utklipp av tegning fra Statens vegvesen

Derimot er informasjon om geometrien til disse tverrbjerkene relativt vanskelig å tolke. I tillegg er det lite tilgjengelig informasjon i de opprinnelige beregningene. Heldigvis er tverrbjerkene av stål godt synlige på både innsiden og utsiden av brodekket, som gjør det lettere å forstå hvordan de er konstruert.



Figur 4.11 Tverrbjerkene av stål på innsiden og utsiden av brodekket

Et tverrsnitt for tverrbjerkene av stål er tolket ut fra både arbeidstegninger og bilder som er tatt av dem. Her er tverrbjerkene av stål tolket som en stålplate som strekker seg til toppflaten med en vinkel som tilsvarer vinkelen til gjeldene forankrede kabel. Denne platen er sveiset til en bunnflens som står vinkelrett på platen, i tillegg til en horisontal toppflens. Se vedlegg C for beregning.

Andre arealmoment for tverrbjerkene er beregnet ved å anta komponentene som rektangulære plater. Torsjonskonstanten og hvelvingsmotstanden C_w er beregnet ved å anta tverrsnittet som en I-bjelke med forskjellige flenslengder [22], se vedlegg C for beregning. De resulterende mekaniske egenskapene som er videre brukt i Abaqus-modellen er vist i tabellen under.

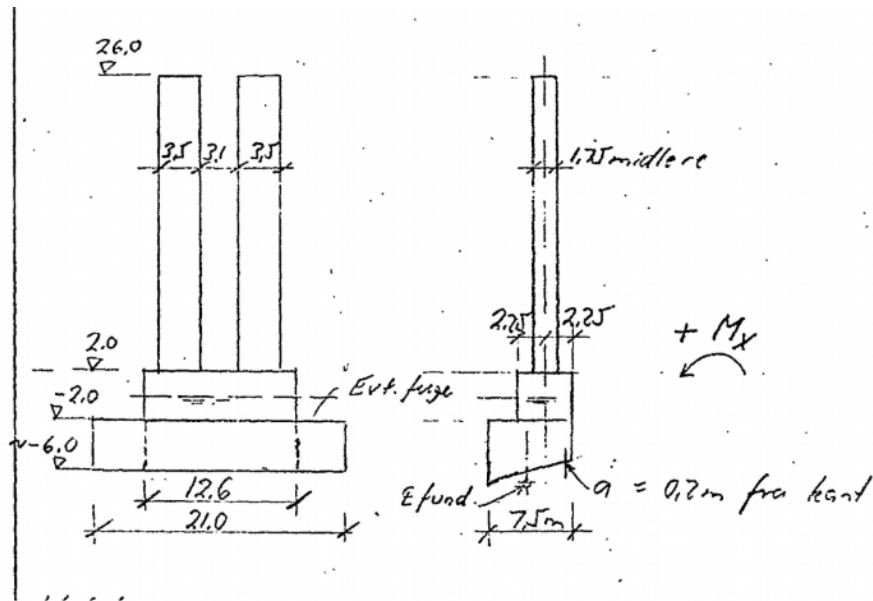
Tabell 4.11 Mekaniske egenskaper til tverrbjeltene av stål

	Forankring, kabel 5	Forankring, kabel 6	Forankring, kabel 7
A [m ²]	0.154	0.154	0.154
I _y [m ⁴]	0.303	0.127	0.062
I _z [m ⁴]	0.276	0.452	0.517
J [m ⁴]	3.653*10 ⁻⁵	3.653*10 ⁻⁵	3.653*10 ⁻⁵
C _w [m ⁶]	0.027	0.027	0.027
E [GPa]	210	210	210
G [GPa]	80.7	80.7	80.7
α [K ⁻¹]	10*10 ⁻⁶	10*10 ⁻⁶	10*10 ⁻⁶
ν	0.3	0.3	0.3
ρ [kg/m ³]	7850	7850	7850
θ [rad]	0.879	0.513	0.340

Her er materialegenskapene antatt like som for brodekket av stål, med en antatt massetetthet på 7850 kg/m³. Vinklene θ er beregnet ut fra vinklene til kablene i Abaqus-modellen. Tverrbjeltene av stål er modellerte som utkragere av B31 Timoshenkobjelker, likt som tverrbjeltene av betong, se figur 4.7.

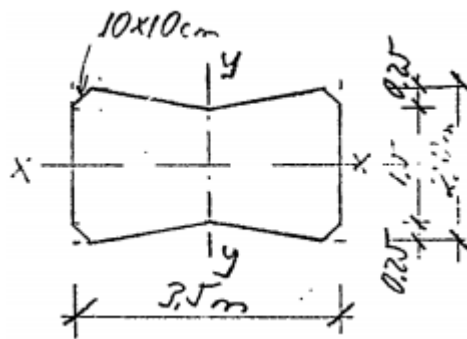
4.8 Betongsøyler

I akse 10 og 11 er det plassert søyler av betong under brodekket. Disse søylene er igjen plassert på fundament, og står fra en kotehøyde på 2 meter opp til dekke. Generelt for Bybrua, står det en søyle i bredden under brobanen av betong, derimot for akse 10 og 11 er det lagt opp slik at det står to søyler per akse. Grunnen til dette er antageligvis at det var ønsket ekstra kapasitet der kablene er forankret. Dette kommer fram i de opprinnelige beregningene, se figur under.



Figur 4.12 Skisse av søylene, utklipp av beregninger fra Statens vegvesen

Søylene har et tverrsnitt som er beskrevet i de opprinnelige beregningene, der det også kommer frem at de burde støpes med B35. Tverrsnittet for en enkeltsøyle er presentert i figuren under.



Figur 4.13 Tverrsnitt til en enkeltsøyle, utklipp av beregninger fra Statens vegvesen

I Abaqus-modellen er disse søylene modellerte som B31 Timoshenkobjelker, der fundamentet er ignorert. Søyleelementene er plasserte slik at de strekker seg helt opp med en høyde som tilsvarer gjeldende brodekknode, og er koblet til brodekknoten gjennom Connector-elementer, se kapittel 4.4.5 for detaljer om disse koblingene.

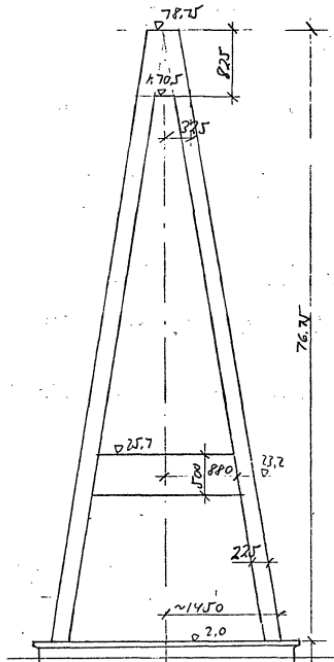
Breddeavstanden mellom to søyler per akse er gitt i de opprinnelige beregningene som 3.1 meter på innsiden av søylene, se figur 4.12. Med en søylebredde på 3.5 meter tilsvarer dette en bredde på 6.6 meter mellom senterlinjene til søylene. De nødvendige mekaniske egenskapene til søylene for Abaqus-modellen, er beregnet i vedlegg C. Resultatet av beregningene er presentert i tabellen under.

Tabell 4.12 Mekaniske egenskaper til betongsøyler

A [m ²]	6.155
I _y [m ⁴]	6.713
I _z [m ⁴]	1.619
J [m ⁴]	4.612
E [GPa]	37.92
G [GPa]	21
α [K ⁻¹]	10*10 ⁻⁶
ν	0.2
ρ [kg/m ³]	2500

4.9 Tårn

I akse 12 er tårnet til Bybrua plassert. Tårnet består av to søyler, eller tårnben, som lener skrått mot hverandre, med en horisontal bjelke på tvers av søylene slik at tårnet danner en slags A-form, se figur under.



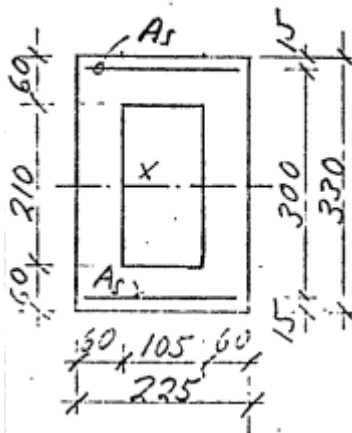
Figur 4.14 Skisse over tårn, utklipp av beregninger fra Statens vegvesen

Ifølge de opprinnelige beregningene har tårnet en total høyde på 78.75 meter inkludert fundament, der søylene i seg selv har en høyde på 76.75 meter. Den horisontale bjelken er omtalt som en «rigel» i de opprinnelige beregningene og arbeidstegningene, denne bjelken er koblet til brodekket og er plassert med en kotehøyde på 23.2 meter for senterlinjen av rigelen, se kapittel 4.4.3 for detaljer om denne koblingen.

For Abaqus-modellen er alle strukturelle verdier for komponentene av tårnet basert på tall fra de opprinnelige beregningene siden det finnes lite informasjon om utbyggingen av tårnet gjennom arbeidstegninger. På grunn av dette, er det derfor et usikkerhetsmoment på modelleringen i forhold til hvordan tårnet faktisk er bygget.

4.9.1 Tårnben

Basert på informasjon fra de opprinnelige beregningene, er benene til tårnet av armert betong av type B45/C45 med et hult rektangulært tverrsnitt. Høydekomponenten i tverrsnittet blir gradvis smalere som følge av tårnhøyden. De ytre dimensjonene går derfor fra 4.0 x 2.25 meter i til 3.11 x 2.25 meter gjennom en lineær reduksjon. Tverrsnittet er vist i figuren under.



Figur 4.15 Skisse av tverrsnitt til tårnben (k55), utklipp av beregninger fra Statens vegvesen

De nederste 3.5 meterne av benene er derimot ikke hule, og er i stedet fullstendig støpt med dimensjoner 4.0 x 2.25 m. Dette er omtalt i de opprinnelige beregningene under en enkel masseestimering for hele tårnet, se vedlegg B.

Etttersom at tverrsnittet varierer for benene til tårnet, er det derfor valgt å dele de opp i 6 ulike seksjoner med ulike beregnede mekaniske egenskaper basert på tilnærmet høyde. Tårnbenene er modellerte med B31 Timoshenkoelementer, og strekker seg helt opp til kotehøyde 78.75, se figur 4.14. Beregningene for seksjonene er gjennomført i vedlegg C, og resultatet er presentert i tabellen under.

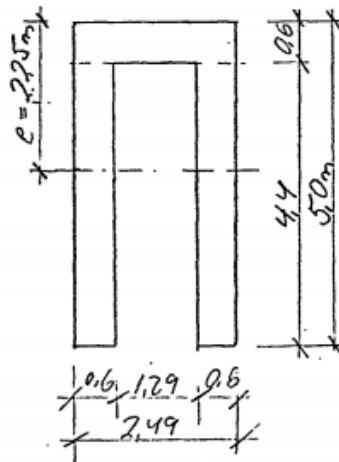
Tabell 4.13 Mekaniske egenskaper til tårnben

	Nedre 3.5m	Seksjon 1 (k10)	Seksjon 2 (k18.8)	Seksjon 3 (k30)	Seksjon 4 (k44)	Seksjon 5 (k57.9)	Seksjon 6 (k70)
A [m ²]	9.0	5.934	5.796	5.620	5.400	5.182	4.992
I _y [m ⁴]	12	9.369	8.625	7.734	6.704	5.772	5.03
I _z [m ⁴]	3.797	3.437	3.339	3.214	3.058	2.903	2.768
J [m ⁴]	9.85	7.174	6.84	6.419	5.898	5.387	4.948

Her er alle seksjonene antatt til å ha en elastisitetsmodul på 40.151 GPa, en skjærmodul på 21 GPa, en temperaturkoeffisient på $10 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$, Poisson's tall på 0.2 og massetetthet på 2500 kg/m³. Disse verdiene er videre brukt til Abaqus-modellen.

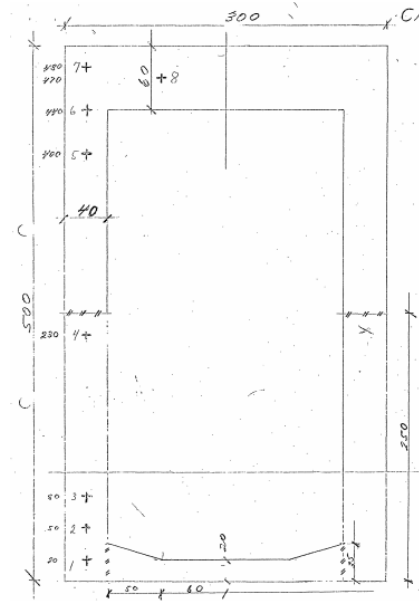
4.9.2 Rigelbjelke

Tårnet som står i akse 12 har en tversgående bjelke mellom søylene. Denne bjelken er koblet til brodekket og er omtalt som en «rigelbjelke» i de opprinnelige tegningene og beregningene til Bybrua. Se kapittel 4.4.3 for hvordan rigelbjelken er koblet til brodekket. I de opprinnelige beregningene, er tverrbjelken til tårnet dimensjonert med et åpent tverrsnitt. Se figur under.



Figur 4.16 Rigelbjelke tidlig skisse, utklipp av beregninger fra Statens vegvesen

Dette designet er gjenspeilet i alle beregningene med unntak av en egen tilleggsberegning som bekrefter at designet for rigelen ble endret til å være et lukket tverrsnitt. Denne endringen ble trolig gjort i sen fase av planleggingen. Figuren under viser det endelige tverrsnittet til rigelbjelken.



Figur 4.17 Oppdatert skisse av rigelbjelke, utklipp av beregninger fra Statens vegvesen

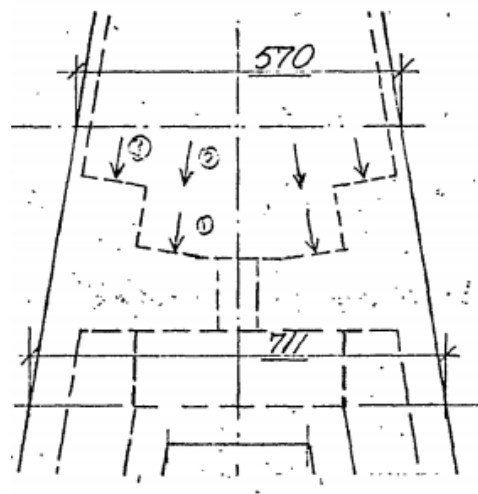
Rigelbjelken er modellert som en B31 Timoshenkobjelke, og strekker seg mellom senterlinjene til tårnbenene i kotehøyde 23.2, se figur 4.14. De mekaniske egenskapene til rigelbjelken er beregnet i vedlegg C, og resultatet er vist i tabellen under.

Tabell 4.14 Mekaniske egenskaper til rigelbjelke

A [m ²]	7.548
I _y [m ⁴]	20.039
I _z [m ⁴]	5.753
J [m ⁴]	13.193
E [GPa]	40.151
G [GPa]	21
α [K ⁻¹]	10*10 ⁻⁶
ν	0.2
ρ [kg/m ³]	2500

4.9.3 Tårntopp

Alle kablene er her forankret til toppen av tårnet, av denne grunn blir toppen av tårnet et viktig punkt med hensyn på horisontal forskyvning langs brobanen. Kablene er forankret til 6 ulike punkter i toppen av tårnet, se figur under. Som en forenkling i datamodellen, er det valgt å kun bruke ett forankringspunkt til alle kabler. Her er forankringspunktet til kablene i toppen av tårnet estimert som en kotehøyde på 74.625, basert på skissen i figur 4.14.

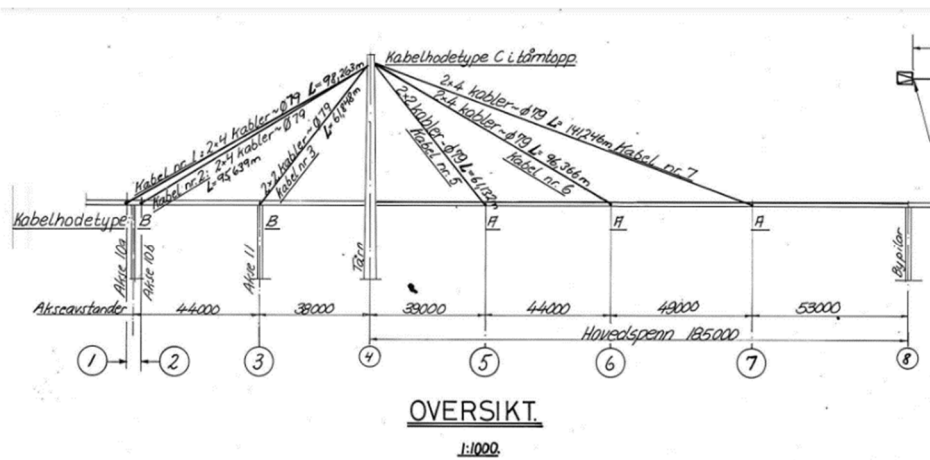


Figur 4.18 Skisse over toppen av tårnet, utklipp av beregninger fra Statens vegvesen

Lite er derimot kjent om selve toppen av tårnet. I de opprinnelige beregningene er toppen av tårnet ikke inkludert under masseestimeringen av hele tårnet, og er omtalt som forskalet, men ikke støpt. Det viktigste for modelleringen av Bybrua er da massen knyttet til toppen av tårnet, siden det vil ha en betydning for stabiliteten og egenfrekvensene til tårnet, det kan tenkes at toppen er relativt stiv i forhold til tårnbenene. Massen til tårnlagrene er heller ikke kjente. På grunn av dette, er det valgt å modellere toppen av tårnet gjennom fullstendig stive «BEAM» Connector-elementer [17], koblet på tvers av tårnbenene. Dette vil danne en masseløs kobling mellom tårnbenene og forankringspunktet til kablene i modellen. Dersom massen til kabelfestene var kjente, kunne man da inkludert dette som en punktmasse i forankringsnoden til kablene i toppen av tårnet.

4.10 Kabler

Kabler er forankret fra hver side av brodekket til tårntoppen. Det er det totalt 6 kabelgrupper per side av brobanen som består av ulikt antall enkeltkabler. Informasjon ovenfor kablene er gitt i både tegningene og de opprinnelige beregningene, se vedlegg A og B . Figuren under viser hvordan kablene er nummererte.



Figur 4.19 Oversikt for kabler, utklipp av tegning fra Statens vegvesen

Her kommer det også frem at enkeltkablene har et tverrsnitt på 4272 mm^2 $\sim \phi 79 \text{ mm}$, se vedlegg A. Det er definert to forskjellige typer kabelgrupper; type A og type B. Disse typene skiller seg ved hvor mange kabler som er i hver kabelgruppe. Kabeltype A består av 4 enkeltkabler per side av brobanen og kabeltype B består av 2 enkeltkabler. Tabellen under viser en oversikt kabeltypene og resulterende areal knyttet til kablene, se vedlegg C for beregning.

Tabell 4.15 Oversikt kabler

Kabel nr.	Forankrings punkt	x-koordinat i Abaqus-modellen [m]	Type	Antall kabler	Areal
1	Akse 10a	36.6	A	2x4	$2 \times 1.709 \times 10^{-2}$
2	Akse 10b	39.6	A	2x4	$2 \times 1.709 \times 10^{-2}$
3	Akse 11	82	B	2x2	$2 \times 8.544 \times 10^{-3}$
5	-	159	B	2x2	$2 \times 8.544 \times 10^{-3}$
6	-	203	A	2x4	$2 \times 1.709 \times 10^{-2}$
7	-	252	A	2x4	$2 \times 1.709 \times 10^{-2}$

I Abaqus-modellen er det valgt å modellere kablene som Truss-elementer av type t3d2. T3d2 er et tredimensjonalt stavelement som kun kan overføre aksialkrefter [17]. I motsetning til bjelkeelementer kan stavelementer ikke overføre momenter. T3d2-elementet er et rett element bestående av to noder, der lineær interpolering er brukt for å beregne både forskyvninger og spenninger. Spenningen er konstant over hele elementet [17].

Ved å bruke stav-elementer vil derimot egenfrekvensene til kablene relatert til vibrasjoner ikke plukkes opp i resultatet som følge at de ikke kan bøyes. For å undersøke egenfrekvensen til kablene er det derfor gjennomført en separat modellanalyse der kablene er modellerte som bjelkeelementer. Se kapittel 5.6 for detaljer.

4.10.1 Materialverdier

Materialet til kablene er spesifisert som elastisk, med en elastisitetsmodul på 165 GPa i de opprinnelige beregningene, se vedlegg B. Det finnes derimot ingen gitt verdi for massetettheten til kablene (utenom veldig grovt anslag) i de opprinnelige beregningene for Bybrua, derfor er en massetetthet på 7850 kg/m^3 antatt for kablene. Resulterende materialverdier for kablene som er brukt i Abaqus-modellen er gitt i tabellen under:

Tabell 4.16 Materialelegenskaper til kablene

E [GPa]	165
ν	0.3
ρ [kg/m^3]	7850

4.10.2 Forspenninger i kabler

Ved påføring av statisk egenvekt i Abaqus-modellen, vil resultatet blant annet være at brodekket vil få en nedbøyning som resultat. For å motvirke denne nedbøyningen etter påført statisk egenvekt, er de nødvendige forspenningene til kablene beregnet. Det er tatt utgangspunkt i beregningsprosedyren vist av Aitor Baldomir, der kabelforspenningene er beregnet ut fra formelen [24]:

$$\sum_{i=1}^n T_i w_j^i + w_j^q = w_j$$

der w_j^i er forskyvningen i node j på grunn av enhetlig forspenning av kabel i ,

w_j^q er forskyvningen i node j på grunn av statisk egenvekt,

w_j er ønsket forskyvning i node j ,

og T_i er forspenningsfaktor for kabel i .

Metoden for denne beregningen er slik at kabel i blir påført en enhetlig forspenning i Abaqus uten egenvekt, som resulterer i forskyvninger i noder j . Dette gir verdier på hvor mye bidrag forspenningene i kablene har på forskyvningene. I tillegg blir modellen i Abaqus analysert for kun statisk egenvekt (uten kabelforspenninger), som også resulterer i forskyvningene til noder j .

Dette resulterer i i -likninger med i ukjente forspenningsfaktorer. Dersom alle ønskede forskyvninger er lik null, kan forspenningsmultiplikatorene dermed bli beregnet ved å løse det lineære likningssystemet:

$$Ax = -B$$

der A er forskyvningsmatrisen på grunn av enhetlig forspenning i kablene,
 x er vektoren for forspenningsfaktorer,
og B er vektoren for forskyvninger på grunn av statisk egenvekt.

I utgangspunktet er denne beregningsmetoden siktet til skråkabelbroer der hele brodekket kun henger i kabler, og de relevante forskyvningsnodene er valgt som forankringspunktene til kablene i brodekket. For Bybrua er situasjonen slik at brodekket av stål er kun forankret i kabler, mens brodekket av betong er i tillegg koblet til søyler. Dette gjør at brodekket av betong vil fungere som en type «ballastkasse» som bidrar med stabilitet til tårnet. Denne beregningsprosedyren kan derfor ikke anvendes for det statiske systemet til Bybrua, og må derfor endres. Ellers vil resultatet blant annet være negative verdier på forspenninger (trykk) som også overskrider flytegrensene til kablene.

For å riktig kunne beregne forspenningene til kablene i Bybrua, er det produsert en optimaliseringsalgoritme i Matlab som løser det lineære likningssystemet for definert optimale verdier med gitte randbetingelser, se vedlegg D. For å unngå at systemet blir løst for negative verdier for forspenninger, er det etablert en randbetingelse i optimaliseringsproblemet der laveste mulige verdi for de beregnede forspenningene er lik 0.

Siden forankringspunktene til brodekket av betong må utelukkes i denne beregningen, vil den da eneste hensikten til kabel 1,2 og 3 være at de bringer stabilitet til tårnet. På grunn av dette, er det derfor etablert en randbetingelse for å bestemme forholdet mellom størrelsen på forspenningene til kabel 1,2 og 3. Her er det antatt at de tre kablene har likt bidrag til horisontalkraft til tårntoppen, se vedlegg C for mer detaljer.

Optimaliseringsproblemet er definert med hensikten å løse forspenningene for minst mulig total absoluttverdi for forskyvninger. Dette er gjort ved å sette de ønskede forskyvningene som variabler i stedet for lik 0 i den opprinnelige beregningsprosedyren. Forskyvningene kan dermed bli beregnet baklengs som resultat av verdiene for forspenningene, og verdiene for forspenningene kan bli optimalisert for lavest totale forskyvningsverdi.

Dette åpner opp for at kabelforspenninger kan løses med realistiske verdier i situasjoner der null resulterende forskyvninger er umulige og minimale totale forskyvninger heller er mer ønskelig. Som følge av dette er det blant annet mulig å velge forskyvningsnoder i modellen utenom forankringspunktene til kablene. I situasjoner der enkelte forankringspunkter ikke kan benyttes i beregningen av forspenninger, er det da mulig å substituere de med vilkårlige noder på brodekket slik at antall likninger i likningssystemet tilsvarer antall ukjente, og de resulterende forspenningene likevel kan beregnes.

For Bybrua er forankringspunktene i brodekket av betong ugyldige å bruke i beregningen på grunn av søylene under, derfor er det valgt å erstatte disse forankringspunktene med noder på brodekket av stål. Her er det nødvendig med to ekstra noder for å løse likningssystemet, siden tre noder tilsvarer forankringspunktene til kablene i brobanen av stål, og en node er forankringspunktet til kablene i toppen av tårnet.

Her er det valgt å inkludere to noder på brodekket som er plasserte midt i de to forskyvningskritiske spennene, som i dette tilfellet ligger mellom kabelforankring 6 og 7, og mellom kabelforankring 7 og akse 13. Disse to nodene ligger da ikke i egne kabelforankringspunkter, som betyr at alle nodene ikke kan ha null resulterende forskyvning

samtidig, og summen av alle forskyvningene vil aldri bli 0. I stedet blir kabelforspenningene optimalisert til minste mulige totale forskyvning.

De resulterende beregnede kabelforspenningene er vist i tabellen under. Disse verdiene er videre brukt i Abaqus-modellen gjennom funksjonen «Initial conditions», av type «Stress» som er inkluderte i kabelelementene [17].

Tabell 4.17 Beregnede forspenninger til kablene

Kabel nr.	Beregnet forspenning [MPa]
1	310.2158
2	313.2259
3	862.9947
5	271.6491
6	200.4405
7	441.8283

Her består de resulterende forspenningene kun av positive verdier og størrelser som kan forventes for kabelspenninger. Den største spenningsverdien er for kabel 3, dette er på grunn av halvert tverrsnittsareal i tillegg til at den har likt horisontalkraftbidrag som kabel 1 og 2. Resultatet av kabelforspenningene er omtalt i kapittel 5.3.

4.11 Modellering av masse

Fordelingen av masse er et viktig moment for analyse av konstruksjoner. Det har stor betydning for blant annet egenvekten i en statisk analyse i tillegg til resulterende egenfrekvens og egenmoder. I FEM-analyser av allerede eksisterende konstruksjoner, er det derfor av stor viktighet at massen blir modellert så nøyaktig som mulig i forhold til hvordan konstruksjonen faktisk er bygget.

I situasjonen for Bybrua, er det slik at det eksisterer mest detaljert informasjon for utbyggingen av brodekket av stål. Her er blant annet lengdene og platetykkelsene definerte for alle monterte stålseksjoner, som gir et godt grunnlag for hvordan massen er fordelt. Dette gir mening å inkludere, siden brodekket av stål er hovedspennet, og er derfor den mest sentrale konstruksjonskomponenten.

I de andre komponentene som brodekket av betong, søyler og tårn er informasjon om utbyggingen manglende, den beste informasjonen er dermed fra omtrentlige estimater fra tidlige beregninger og generelle plantegninger. I de fleste tilfeller er informasjonen som finnes kun antydende verdier for hvordan entreprenør kan utbygge. Til sammenligning med brodekket av stål, gir dette ikke et like godt grunnlag for utbygget masse, og de gitte omtrentlige estimatene burde derfor kun bli tolket som en indikasjon.

Massen i datamodellen er hovedsakelig ivaretatt gjennom massetettheten til materialet i elementene. Unntaket er de delene av tverrbjelkene som er innenfor brodekketverrsnittet, der massene er inkluderte som punktmasser på tilknyttede brodekknode, se kapittel 4.6.3.

Generelt i Abaqus-modellen er massetettheten til betong antatt som 2500kg/m^3 og 7850kg/m^3 for stål. Derimot for brodekket av stål er massetettheten beregnet ut fra massen fra de monterte seksjonene, se vedlegg C. Dette inkluderer ekstra vekt som blant annet skruer, bolter og diverse komponenter, som ikke hadde kommet frem via kun tverrsnittet i seg selv. Ekstra vekt fra asfalt og diverse på brobanen er inkludert i massetetthetene til brodekket av betong og stål, størrelsen på denne ekstra vekten er 1800 kg/m , en omtrentlig verdi som er hentet fra de opprinnelige

beregningene på Bybrua, se vedlegg B. En oversikt over de benyttede massetetthetene til komponentene i Abaqus-modellen er vist i tabellen under.

Tabell 4.18 Oversikt over massetettheter i Abaqus-modellen

Komponent	Massetetthet ρ [kg/m ³]
Kabler	7850
Brokasse betong	2719.3 (2500 uten asfalt+div)
Brokasse stål	13443 (10247 uten asfalt+div)
Tverrbjelker betong	2500
Tverrbjelker stål	7850
Tårn (betong)	2500

Massen til de ulike komponentene i Abaqus-modellen er vist i tabellen under. Her er det også inkludert masseestimatene fra de opprinnelige beregningene for Bybrua som sammenligning og verifisering av de modellerte massene. I denne sammenligningen er asfaltvekt for brodekket sett bort fra. Som forklart innledningsvis i dette delkapittelet, er de angitte massene kun tidlige estimater fra designerne med unntak av for brodekket av stål der de monterte massene er beskrevet.

Tabell 4.19 Sammenligning av modellert masse med estimater fra opprinnelige beregningene

Elementtype	Modellert masse i Abaqus [tonn]	Masse angitt i opprinnelige beregninger [tonn]
Kabler	131.5	119
Brobane betong	2463	-
Brobane stål	1068	1068
Tverrbjelker betong (3)	498.2	-
Tverrbjelker stål (3)	$3 \cdot 20.2 = 60.6$	$12.5 + 20 + 25 = 57.5$
Tårnben	2176.5	1964
Tårnrigel	374.6	298
Søyler (2x2)	1462.6	1470

I estimatene fra de opprinnelige beregningene er masse fra fundament ignorert for å kunne sammenligne med verdien fra modellen, dette gjelder for masseestimatet for søyler og tårnben. Tårntoppen er ignorert for vekt i de opprinnelige beregningene.

Massen til rigelbjelken er den som desidert skiller seg mest i denne sammenligningen. Dette er fordi at estimatet fra de opprinnelige beregningene er basert på at tverrsnittet er åpent, og har derfor er mye lavere tverrsnittsareal. I tillegg strekker rigelen i Abaqus-modellen seg mellom senterlinjene til tårnbenene. Dette vil skape en del overlapp mellom komponentene, og en konsekvens av dette er at lengden til rigelen blir lengre som fører til større masse.

Alle tverrbjelkene av stål er modellerte som en tilnærmet type, mens i de opprinnelige beregningene har tverrbjelkene ulik masse basert på hvilken kabel de forankrer. Dersom man sammenligner samlet vekt for tverrbjelkene av stål, er det derimot lite forskjell. Dette gir en indikasjon på at tverrbjelkene er modellert riktig, selv ved lite informasjon å gå ut fra.

Det finnes ingen estimater på vekt for brodekket av betong samt tverrbjelker av betong, og den modellerte massen kan derfor ikke sammenlignes.

4.11.1 Masse og treghetsmoment for Timoshenkobjelker i Abaqus

De lineære Timoshenkobjelkene i Abaqus (B21, B31, etc.) bruker en «lumped-mass» formulering med mindre annet er spesifisert [17]. Det vil si at massen til hele bjelken er fordelt som punktmasser til de tilknyttede nodene. Masse og treghetsmoment for en Timoshenkobjelke er hovedsakelig ivaretatt gjennom bjelkens egen massetetthet, geometri i tillegg til ekstra masse og treghetsegenskaper lagt på elementet. I Abaqus kan masseegenskaper til en Timoshenkobjelke formuleres enten med en isotropisk tilnærming eller en eksakt formulering for treghetsmoment for massematrisen [17].

Med mindre annet er spesifisert, er den eksakte formuleringen for treghetsmoment brukt for Timoshenkobjelker. Med den eksakte formuleringen, vil distansen mellom bjelkens node og massesenteret danne en «coupling» mellom forskyvningsfrihetsgradene og rotasjonsfrihetsgradene til massematrisen. For den isotropiske formuleringen derimot, er denne avstanden sett bort fra [17].

I Abaqus-modellen for Bybrua, er alle brukte bjelkeelementer av type *BEAM GENERAL SECTION [17]. I tillegg er alle bjelkene modellerte slik at bjelkenodene er plasserte i arealsenteret til tverrsnittet. Siden alle tverrsnittene består kun av en uniform massetetthet hver (enten stål eller betong), vil arealsenteret derfor tilsvare massesenteret for alle bjelkeelementene. Dette gjør at det ikke vil dannes «coupling», og den eksakte formuleringen vil da i prinsippet fungere likt som den isotropiske formuleringen. Massen til Timoshenkobjelkene er da beregnet gjennom

$$m_B = \int_V \rho_B dV$$

der ρ_B er bjelkens massetetthet [17].

Ved bruk av *BEAM GENERAL SECTION [17], har Abaqus ikke informasjon om selve tverrsnittsgeometrien siden kun de endelige mekaniske egenskapene er påførte, og kan derfor ikke beregne treghetsmoment ut fra geometrien. Massetreghetsmomentene om bjelkens lokale akser er da beregnet ut fra de definerte verdiene for andre arealmoment og massetettheten:

$$I_{m,11} = \int_V \rho_B I_{11} dV$$

$$I_{m,22} = \int_V \rho_B I_{22} dV$$

$$I_{m,33} = I_{m,11} + I_{m,22}$$

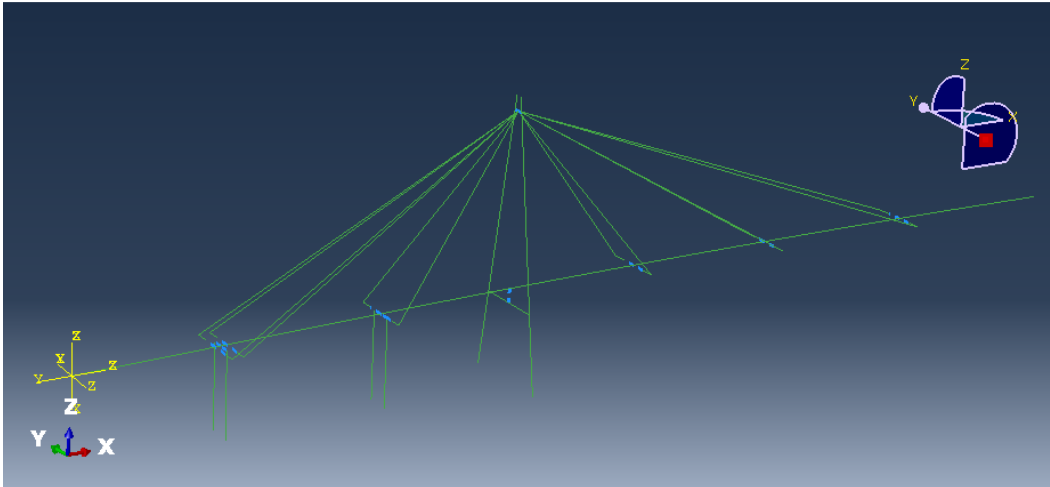
der I_{11} og I_{22} er de andre arealmomentene om tverrsnittets lokale akser, $I_{m,33}$ er da massetregghetsmomentet om bjelkens lengdeakse.

Likt som «lumped-mass» formuleringen, vil treghetsmomentegenskapene også fordeles til nodene knyttet til bjelkeelementet. Det vil si at hver node langs brobanen til Abaqus-modellen er tilført massetregghetsmomentegenskaper om alle akser, avhengig av elementlengdene, tverrsnittsareal, massetetthet og andre arealmomenter.

5 Resultat fra Abaqus

5.1 Generelt

Den endelige datamodellen av Bybrua i Abaqus er vist i figuren under. Se kapittel 4 for detaljer ovenfor hvordan modellen er konstruert.



Figur 5.1 Abaqus-modellen av Bybrua i Abaqus, skjermdump fra Abaqus/CAE

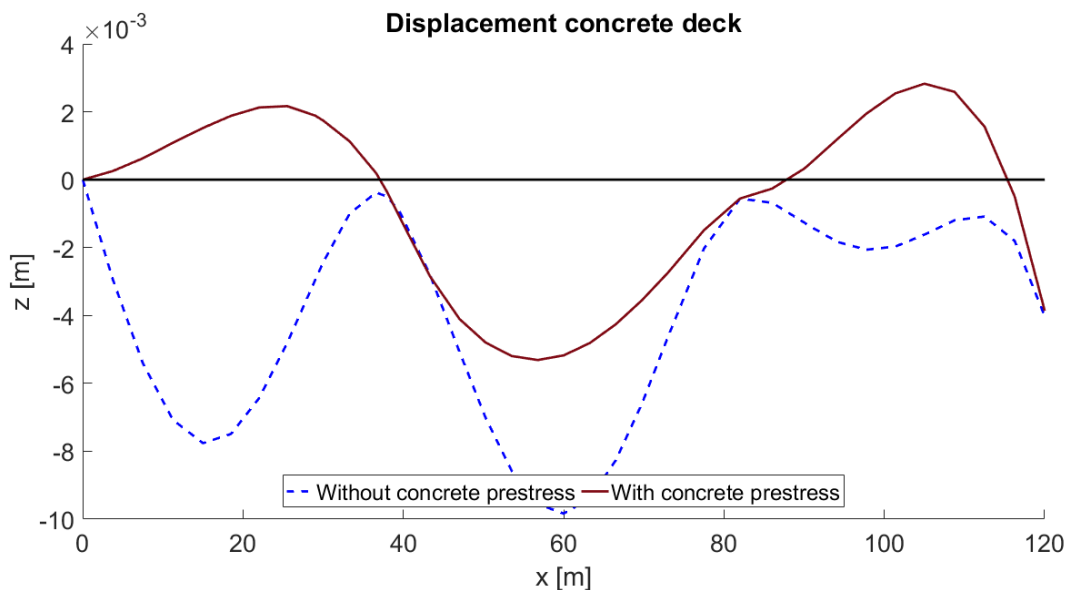
Datamodellen for Bybrua i Abaqus er analysert for en rekke situasjoner for statisk egenvekt i tillegg til egenfrekvens. Modellen er derimot ikke analysert for hverken vind eller trafikklast. Likt for alle situasjoner, er de statiske analysene definert som «Step-1» og egenfrekvensanalysene definert som «Step-2» i input-filene, se vedlegg F.

Analysene for statisk egenvekt er definert gjennom funksjonen *STATIC [17] med *DLOAD [17] av type «GRAV» satt til negativ z-retning for alle komponenter i modellen. Her er tyngdeakselerasjon knyttet til *DLOAD satt lik 9.81 m/s^2 . NLGEOM [17] er inkludert, det vil gjøre at Abaqus tar høyde for ikke-lineære effekter knyttet til store forskyvninger og deformasjoner. For analyser med små deformasjoner vil effekten av NLGEOM være neglisjerbar og kan dermed ignoreres [17]. I tilfellet for Bybrua-modellen forventes det relativt store deformasjoner og det er derfor valgt å inkludere NLGEOM i denne analysen.

Eigenfrekvensanalysene er gjennomført ved funksjonen *FREQUENCY [17] med beregningsprosedyre LANCZOS med SIM-arkitektur (lineær dynamisk prosedyre). For LANCZOS må den maksimale ønskede egenfrekvensen eller antall egenmoder spesifiseres [17]. Her er antall ønskede egenmoder satt til 50 generelt for datamodellen, og 250 for egenfrekvensanalysen knyttet til kablene, se kapittel 5.6 for mer detaljer. NLGEOM er satt på slik at ikke-lineære effekter for deformasjoner er også inkludert for beregning av egenfrekvenser. I tillegg er det valgt å normalisere de resulterende egenvektorene for den generaliserte massen knyttet til hver mode. Effekten fra «acoustic-structural coupling» er inkludert som standardvalg, og «block size» er valgt av Abaqus.

5.2 Statisk egenvekt – effekt av spennarmering

For å undersøke hvor stor effekt de beregnede ekvivalente kreftene fra spennkablene i brodekket av betong har på å motvirke nedbøyning, er det gjennomført en statisk analyse av modellen med- og uten ekvivalente krefter inkluderte. Se kapittel 4.6.2 for detaljer ovenfor spennkablene. Her er de resulterende vertikale forskyvningene langs brodekket av betong sammenlignet for begge situasjonene ved å plote forskyvningene i Matlab, se vedlegg D. Figuren under viser hvor stor påvirkning de beregnede ekvivalente kreftene har på brodekket av betong for vertikale forskyvninger.



Figur 5.2 Effekt av spennarmering på brodekket av betong

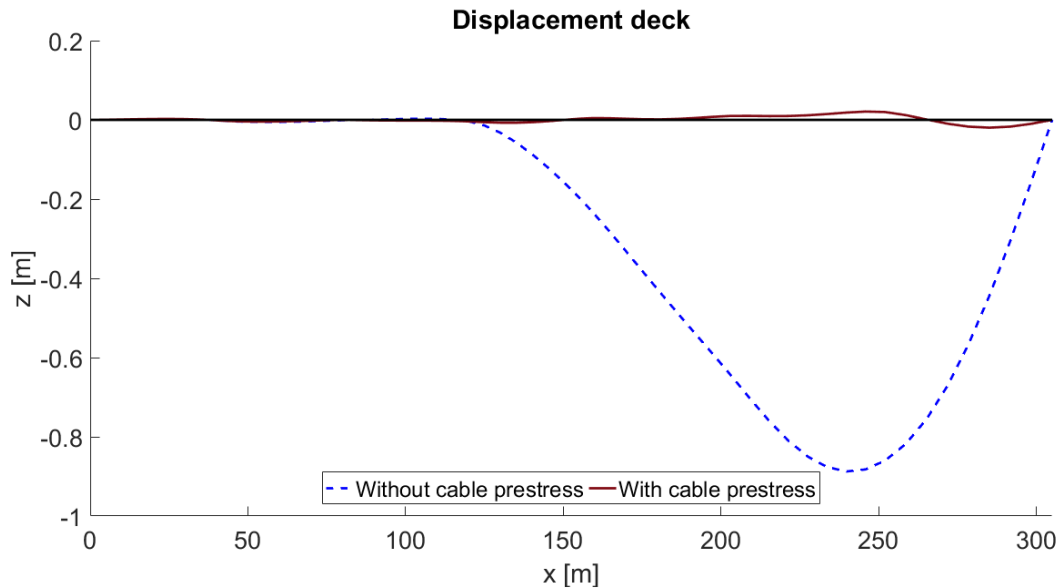
Det kan observeres at de ekvivalente kreftene har en god virkning mot nedbøyninger. Feltene mellom akse 9 og 10, og 11 og 12 får en resulterende oppbøyning som følge av de ekvivalente kreftene. Her går forskyvningen mellom akse 9 og 10 fra ca. -8mm til +2mm, og ca. -2mm til +3mm for feltet mellom akse 11 og 12. I feltet mellom akse 10 og 11 derimot, bøyer brodekket seg fremdeles nedover, men størrelsen på denne nedbøyningen er redusert med ca. 50% midt i feltet, fra ca. 10mm nedbøyning til 5mm.

Dette viser at spennkablene har en tydelig effekt på nedbøyningen, og bekrefter at de inkluderte ekvivalente kreftene fungerer etter sin hensikt. Årsaken til at nedbøyningen i det midterste feltet ikke er motvirket i like stor grad som for de ytterste feltene, kan være på grunn av at dette feltet ikke er forsterket med ekstra rette spennkabler slik som de ytterste feltene er.

De ekvivalente kreftene er beregnet med antagelsen om at de gitte spennkreftene inkluderer både låsetap i tillegg til langtidstap. Dette var gjort på grunn av manglende informasjon. På grunn av langtidstap for spennkrefter er det en stor mulighet for at reelle nedbøyninger er større i virkeligheten.

5.3 Statisk egenvekt – effekt av kabelspenninger

I kapittel 4.10.2 ble de nødvendige kabelforspenningene for å motvirke nedbøyninger i dekket beregnet. For å undersøke effekten kabelforspenningene har på brodekket, er det gjennomført en statistisk analyse av datamodellen med- og uten inkluderte forspenninger. Her er de resulterende vertikale forskyvningene langs brodekket sammenlignet for begge situasjonene ved å plote forskyvningene i Matlab, se vedlegg D. Figuren under viser hvor stor påvirkning de beregnede kabelforspenningene har på brodekket for vertikale forskyvninger.



Figur 5.3 Effekt av kabelforspenninger på brodekket

Her kan det observeres at de beregnede kabelforspenningene har en god motvirkende effekt for nedbøyninger knyttet til ståldekket. Uten forspenningene er resulterende maksimal nedbøyning i feltet ca. 0.9 meter. I tilfellet med inkluderte forspenninger er maksimal forskyvning derimot på rundt 0.02 meter (2cm). Det er også verdt å merke seg at rundt forankringen til kabel 7 ($x=252\text{m}$), blir brodekket dratt oppover, for å kompensere for nedbøyningen som skjer ved akse 13. Dette gir en indikasjon på at den 'optimale' løsningen for kabelforspenningene med hensyn på forskyvning ikke er å la all deformasjon skje som nedbøyning. Hovedsakelig er dette et resultat av de valgte nodene i beregningen, som inkluderer blant annet noder på hver side av forankringen til kabel 7.

De valgte nodene for beregningen av forspenningene er også undersøkt i den statiske analysen for å sammenligne hvordan de teoretiske forskyvningene stiller opp mot resulterende forskyvninger fra den statiske analysen. De teoretiske forskyvningene er beregnet i Matlab ved å løse likningssystemet med hensyn på forskyvninger ut fra de beregnede forspenningene, se kapittel 4.10.2 for detaljer. Sammenligningen mellom forskyvningene er gjennomført i vedlegg E, samt presentert i tabellen under.

Tabell 5.1 Sammenligning av teoretiske forskyvninger

Node nr.	Retning	Teoretiske forskyvninger [m]	Forskyvninger i modellen [m]
46	U3 (z)	$5.93 \cdot 10^{-11}$	0.004406
54	U3 (z)	$-8.89 \cdot 10^{-12}$	0.009917
58	U3 (z)	$2.34 \cdot 10^{-12}$	0.01151
62	U3 (z)	$1.04 \cdot 10^{-2}$	0.019818
66	U3 (z)	$-2.26 \cdot 10^{-2}$	-0.01713
232	U1 (x)	$-1.59 \cdot 10^{-12}$	-0.01173
Total forskyvning	-	0.033	0.074515

Det kan observeres at den resulterende totale forskyvningen til nodene i modellen er litt over dobbelt så stor som den teoretiske estimeringen. Dette er forventet ettersom at optimaliseringsberegningen blant annet ikke tar høyde for ikke-lineære effekter knyttet til forskyvninger. Som forklart i kapittel 4.10, er forskyvningene til de utvalgte nodene en uløselig beregning ettersom at alle nodene ikke kan ha 0 forskyvning samtidig. Til tross for dette, er det kun ca. 7.5 cm total samlet forskyvning for nodene. Dersom man tar høyde for de 'uløselige' forskyvningene på ca. 3.5cm, blir samlet totale forskyvningsavvik ca. 4 cm i modellen. Dette er da et godt resultat, og viser at de beregnede kabelforspenningene fungerer etter sin hensikt.

5.4 Egenfrekvenser og egenmoder

Abaqus-modellen for Bybrua som beskrevet i kapittel 4, er analysert for egenfrekvenser og egenmoder. Datamodellen er her analysert for de første 50 egenmodene. Ved hjelp av et Matlab-skript laget av Ibuki Kusano, se vedlegg D, er de resulterende egenfrekvensene og egenmodene plottet til figurer. Dette er gjort ved å hente forskyvningsdata til hver egenmode for alle nodene langs brodekket fra resultatfilen (.dat) fra Abaqus-analysen. De plottede egenmodene er sammenstilt i vedlegg G.

En oversikt over alle egenfrekvensene og egenmodene knyttet til denne analysen er presentert i vedlegg E. Her er informasjon for hver mode beskrevet basert på både de visuelle resultatene (3D) fra Abaqus og de plottede modene. De plottede egenmodene i seg selv gir kun et inntrykk av svingninger til brodekket, som i mange tilfeller skjer som en sekundær respons fra egenmoder fra andre komponenter eller en overlapp av forskjellige moder. Derfor er det også viktig å vurdere de resulterende egenfrekvensene basert på hva som skjer i datamodellen som helhet.

5.5 Egenfrekvenser og egenmoder - randbetingelsesituasjon 2

Abaqus-modellen er også analysert for egenfrekvenser med et ulikt sett med randbetingelser. Dette er da for å undersøke om hva slags randbetingelser som stemmer best overens med måledata. Et usikkerhetsmoment i undersøkelsen av Bybrua er til hvor stor grad brodekket er innspent til både søyler og tårnrigel, særlig for rotasjoner. I den første egenfrekvensanalysen ble koblingene mellom søyle og brobanen antatt som fullstendig stive, og i koblingen til tårnrigel var det kun tillatt rotasjoner i horisontalplanet, se kapittel 4.4. For å undersøke validiteten til de overnevnte antatte randbetingelsene, er alle disse koblingene endret til å tillate rotasjoner både i horisontalplanet (om z-aksen) og vertikalplanet (om y-aksen).

Denne endringen er gjennomført ved å justere de gjeldende Connector-elementene til type «U-JOINT» som består av komponentene JOIN som setter betingelsene for forskyvninger og UNIVERSAL som bestemmer de låste frihetsgradene for rotasjon. Med «U-JOINT» er de tilgjengelige lokale frihetsgrader UR1 og UR3. De lokale aksene til Connector-elementene er justerte slik at disse frihetsgradene tilsvarer UR2 (om y-aksen) og UR3 (om z-aksen) globalt.

Likt som for den første egenfrekvensanalysen (kapittel 5.4) er datamodellen analysert for de første 50 egenmodene. Egenmodene er også plottet i Matlab, og en oversikt over de resulterende egenmodene inkludert beskrivelser er presentert i vedlegg E.

5.6 Egenfrekvenser og egenmoder for kabler

Siden kablene er modellerte som stav-elementer i hovedanalysen, vil egenfrekvensene knyttet til kabelvibrasjoner ikke dukke opp i resultatet. På grunn av dette er det valgt å gjennomføre en separat analyse av Abaqus-modellen, der kablene er modellerte som bjelkeelementer slik at egenmodene og egenfrekvensene kan estimeres.

Denne informasjonen kan være nyttig under sammenligningene med spektra fra måledata, ettersom at det er en mulighet for at svingninger fra kabler vil gi utslag i måleutstyret. For akselerometret festet til brodekket av betong, er det lite sannsynlig for at vibrasjoner fra kabel 1,2 og 3 blir målt av dette akselerometret, på grunn av den store avstanden til nærmeste kabler kombinert med den høye stivheten til brodekket av betong. På den andre siden, ligger akselerometret festet til stålkassen veldig nært forankringen til kabel 5. Dersom noen kabelfrekvenser kommer frem i måledata, er det derfor høyest sannsynlighet for at det vil være for vibrasjoner fra kabel 5.

For denne analysen er hver kabel delt inn i 10 B31 Timoshenkoelementer. Siden det er benyttet bjelkeelementer, er det derfor nødvendig å gi bjelkene en viss bøyestivhet. I de fleste beregningstilfeller med unntak for enkelte lokale effekter, burde kabler derimot antas som fullstendige fleksible strenger [25]. For å ta høyde for dette, er kablene i dette tilfellet antatt til å ha en bøyestivhet på 5% av hva de hadde hatt dersom de var beregnet som bjelker, se vedlegg C for detaljer. Bøyestivheten er ikke satt lavere for å unngå problemer med konvergering for modellen ettersom at en såpass lav bøyestivhet kan føre til store deformasjoner utenfor toleransenivået til Abaqus.

For å justere verdiene for andre arealmoment for kabel-elementene uavhengig av tverrsnittet, er det valgt å bruke *GENERAL BEAM SECTION [17] for modelleringen. Siden de mekaniske egenskapene er da direkte lagt inn for bjelkene, har Abaqus ikke nok informasjon til å bestemme hvordan tverrsnittet er formet, og kan da ikke beregne hvordan spenningene fordeles i bjelkene. Kabelspenningene vil derfor ikke fungere slik de opprinnelig var lagt opp, og det er nødvendig å transformere de initiale aksialspenningene til aksialkrefter for denne analysen [17].

Her er datamodellen analysert for egenfrekvenser der de første 250 modene er hentet ut. Maksimalt antall ønskede moder er økt fra 50 til 250 siden hver kabel gir generelt 4 svingetyper (horisontal i begge retninger og vertikalt i begge retninger) med lite forskjell i frekvens for hver symmetrisk/asymmetrisk mode. Med 6 typer kabler i modellen vil dette resultere i svært mange moder. Av denne grunn er kabelmodene ikke plottet og alle de 250 modene er heller ikke beskrevet hver for seg. Resultatene for kabelmodene er sammenstilt i vedlegg E, her er minimum og maksimum for hver modeform for hver kabel beskrevet. Resten av egenmodene som ikke er direkte knyttet til kablene er ikke noterte. Egenfrekvensene til den første symmetriske og asymmetriske modene for hver kabel er presentert i tabellen under.

Tabell 5.2 Oversikt egenfrekvenser til kabler

Kabel nr.	S1 [Hz]	A1 [Hz]
1	0.9334	1.8328
2	0.9638	1.8918
3	2.5518	5.0464
5	1.5022	2.9691
6	0.8427	1.6475
7	0.8202	1.6559

I resultatet for egenfrekvensene til kablene (se vedlegg E), kan det observeres at frekvensene knyttet til de første egenmodene øker i takt med hva som kan forventes i forhold til teorien, med et likt frekvensgap mellom modene. Derimot ser det ut som at frekvensgapet mellom moder blir gradvis redusert, og for modene av høyest grad i resultatet, er dette gapet under halvparten av det for de første modene. Dette er mest sannsynlig en årsak av at kablene er delt inn i kun 10 elementer. For de første modene vil dette være et tilstrekkelig antall elementer, ettersom at oppdeling av elementer ikke fører til et stort avvik i svingeformen. Men for økende grad av modeform vil svingeformene mer begrenset av hvordan elementene er inndelt, og tilknyttede egenfrekvens blir derfor unøyaktig. Dersom man ønsker et mer nøyaktig resultat for egenmodene av høyere grad, er det derfor nødvendig å inkludere tilstrekkelig antall noder langs kabelelementet. Siden egenfrekvensene knyttet til modeformene av høyere grad er unøyaktige, er det valgt å også beregne de teoretiske frekvensene til de høyere modeformene, se vedlegg E.

5.6.1 Metode for å justere forspenninger i kabler etter målte vibrasjoner

I kapittel 4.10 ble forspenningene til kablene beregnet ved å ta hensyn til deformasjonsbidragene kablene har på de utvalgte nodene langs brodekket som følge av påført enhetlig forspenning. Dette vil gi et godt resultat i forhold til hvordan datamodellen er laget, men hvor bra dette resultatet stemmer overens med de virkelige spenninger kan være ukjent. I tilfeller der egenfrekvenser til kablene er kjente gjennom måleutstyr plasserte på kablene, kan forspenningene i datamodellen justeres ved å kombinere relevant teori med resultat fra datamodellen.

For en fritt opplagt kabel med tilført strekkraft i begge ender, kan egenfrekvensene beregnes ved formelen [25]:

$$\omega_i = i \frac{\pi}{l} \sqrt{\frac{g_a T}{g_{cb}}}$$

der i er nummer på svingemode hvor oddetall representerer symmetriske moder og partall tilsvarer asymmetriske moder,

l er lengden til kabelen

T er strekkraften som er påført kabelen,

g_a er gravitasjonsakselerasjonen og g_{cb} er kabelens vekt per lengdeenhet.

For en gitt egenmode med faste egenskaper til kabelen, vil strekkraften være den eneste varierende komponenten for egenfrekvensen, og formelen kan derfor justeres til

$$\omega_i = C_i \sqrt{T}$$

der

$$C_i = i \frac{\pi}{l} \sqrt{\frac{g_a}{g_{cb}}}$$

C_i er her en konstant for egenskapene til kabelen og T er den tilknyttede strekkraften.

Ved å ta utgangspunkt i formelen over, er det dermed mulig å estimere en justert forspenning til kablene i datamodellen basert på målt egenfrekvens uavhengig av egenskapene. Den nye nødvendige forspenning til kabelen kan estimeres gjennom

$$T_\beta = \left(\frac{\omega_\beta}{\omega_\alpha} \right)^2 T_\alpha$$

der ω_β er målt egenfrekvens til kabel,

T_α er den ujusterte forspenningen og ω_α er resulterende egenfrekvens i Abaqus som følge av T_α

Denne formelen kan inkluderes som en tilleggsbetingelse innad i optimaliseringsberegningen, se vedlegg D. Gjennom dette vil resulterende nødvendig forspenning ta høyde for spenningsfordelingene som skjer mellom kablene under det statiske analysetrinn.

Eksempelvis for kabel 1 i Bybrua, der det ble beregnet en forspenning på 310.2158 MPa, se kapittel 4.10.2. Egenfrekvensen til den første symmetriske moden var funnet som 0.9334 Hz fra Abaqus, se kapittel 5.5. Dersom det for var målt en egenfrekvens på 1.05 for kabel 1 i Bybrua, vil dette resultere i en nødvendig forspenning på

$$T_{\beta} = \left(\frac{1.05}{0.9334} \right)^2 * 310.2158 \text{ MPa} = 392.5608 \text{ MPa}$$

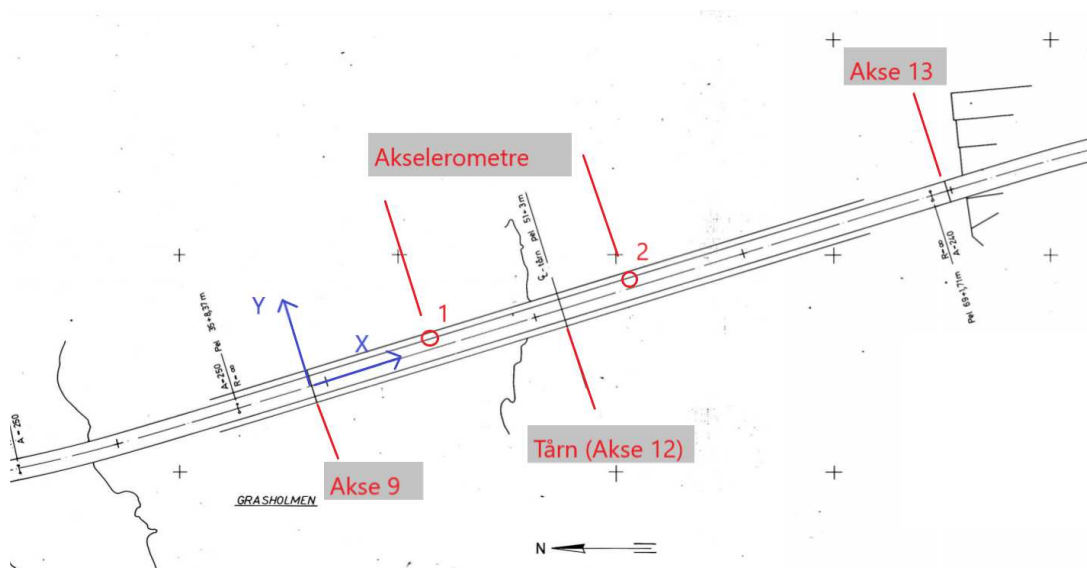
Det er viktig å merke seg at forspenningen ikke nødvendigvis vil være lik den faktiske spenningen til kabelen i modellen. Forspenningene er kun aktive i t=0 i modellanalysen, og kabelspenningene vil derfor justere seg for statisk egenvekt av hele modellen. Av den grunn kan det også forventes et avvik for målt egenfrekvens i kabelen i forhold til resultat fra modellen, selv etter justeringen. Dersom reelle kabelspenninger er ønskelige å beregne, burde det i stedet tas utgangspunkt i de aktuelle kabelspenningene på slutten av det statiske analysetrinnet.

6 Analyse av måledata

6.1 Måleinstrumenter

Juni 2019 ble diverse måleinstrumenter montert på Bybrua, dette ble gjort som et samarbeid mellom Universitetet i Stavanger og Statens vegvesen [1]. Hensikten med måleutstyret er å kunne måle kabel- og strukturelle vibrasjoner knyttet til broen. I denne oppgaven er måledata fra to akselerometre som er plasserte på innsiden av brodekket analysert.

To 3-aksial akselerometre er plasserte på innsiden av brodekket for å måle vibrasjoner. Begge akselerometrene er festet til brokasseveggen på hver side av det østlige tårnbenet, der den ene er plassert på betongsiden og den andre på stålsiden, og måler da akselerasjoner i tre retninger (x,y,z) for punktene. Plasseringene for akselerometrene er henholdsvis midt mellom akse 10 og 11, i tillegg til 35 meter inn langs brobanen av stål (avstand fra tårn), dette tilsvarer $x=60\text{m}$ og $x=155\text{m}$ i det lokale aksesystemet anvendt for datamodellen, se kapittel 4.3 for mer detaljer. Figuren under viser en planoversikt for hvor akselerometrene er plassert i broen.



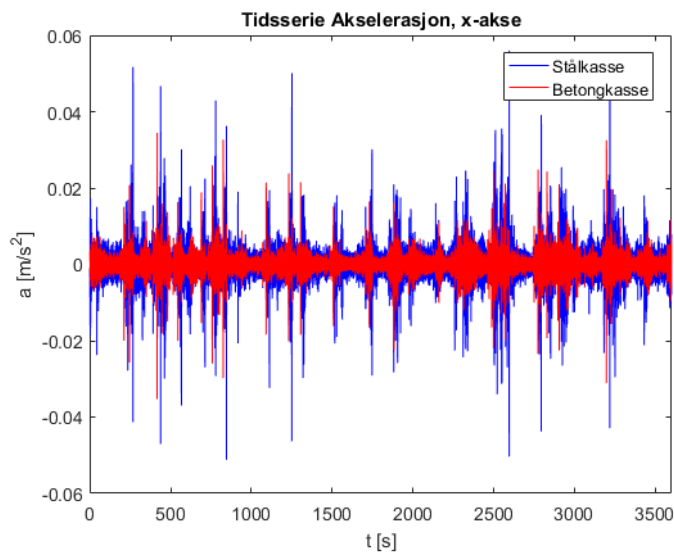
Figur 6.1 Oversikt over plasserte akselerometre

Siden akselerometrene måler for x-, y- og z-akse er det derfor viktig å vite hvordan aksesystemet til akselerometrene er orientert. Så vidt det er kjent, stemmer akseorienteringen til akselerometrene overens med aksesystemet til datamodellen, der x-akse tilsvarer retningen langs brobanen, y-akse tilsvarer retningen tvers på brobanen i horisontalplanet, og z-akse tilsvarer vertikalretning/høyde normalt på horisontalplanet. Dersom akseorienteringen ikke stemmer, vil dette derimot komme frem under inspeksjon av måledata i samsvar med egenmodene fra datamodellen.

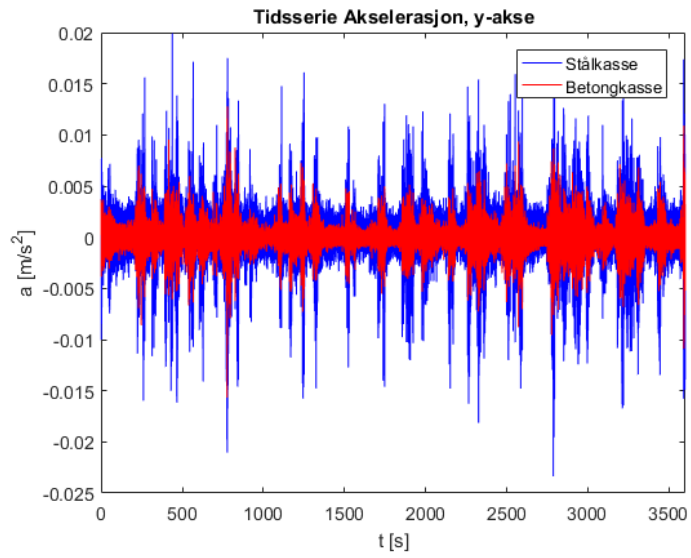
6.2 Akselerasjonsmålinger

Akselerasjonsdata som er analysert i denne oppgaven ble målt i en tidsperiode på 1 time fra 28. august 2019 klokken 07:00 med en sampling på 50Hz. Den gjennomsnittlige vindhastigheten under målingen er rapportert til å være 8m/s, og vindretningen var 66 grader fra nord.

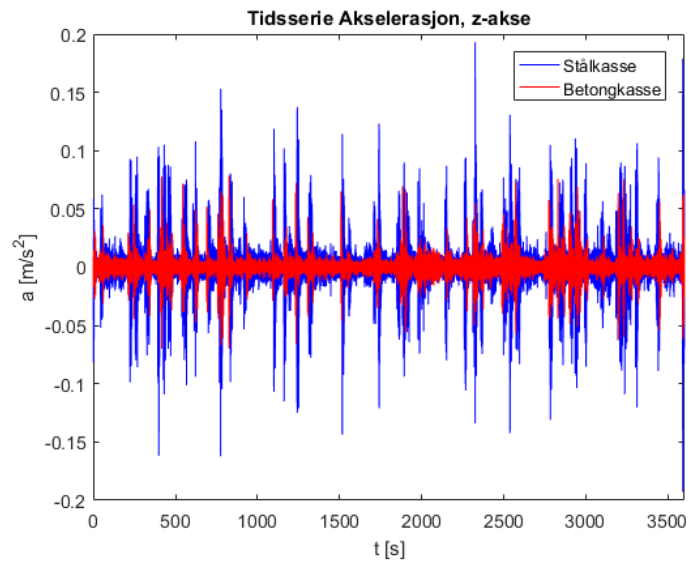
Akselerasjonsmålingene er plottet som tidsserier ved hjelp av Matlab, se vedlegg D. Her er måledata separert for plassering av akselerometer i (betongkasse eller stålkasse) og retning (x,y,z). Plottene av akselerasjonstidsseriene er vist i figurene under, i tillegg til vedlegg G.



Figur 6.2 Tidsserie akselerasjon, x-akse



Figur 6.3 Tidsserie akselerasjon, y-akse



Figur 6.4 Tidsserie akselerasjon, z-akse

6.3 Spektra

6.3.1 Fast Fourier Transformation (FFT)

Fast Fourier Transformation (FFT) er en effektiv algoritme som beregner DFT (Discrete Fourier Transformation) av en sekvens. Gjennom en Fourier-analyse konverteres et signal fra dets opprinnelige plan til frekvens-planet eller motsatt [26]. For akselerasjonsmålinger som da ligger i tidsplanet, vil resultatet av FFT være frekvensene og de tilknyttede styrkene som signalet er sammensatt av, betegnet som PSD (Power Spectral Density/spektraltetthet). Dette kan videre plottes slik at egenfrekvenser til systemet kan leses av.

I Matlab kan en FFT-analyse gjennomføres via funksjonen `fft` [27], denne funksjonen er basert på FFTW, et subrutine-bibliotek i programmeringsspråket C egnet til å beregne DFT for data [28]. Dersom signalet er en vektor, vil funksjonen returnere en vektor i frekvensplanet. DFT (Y) av et signal (X) med lengde n er beregnet i henhold til formelen [27]:

$$Y(k) = \sum_{j=1}^n X(j) W_n^{(j-1)(k-1)}$$

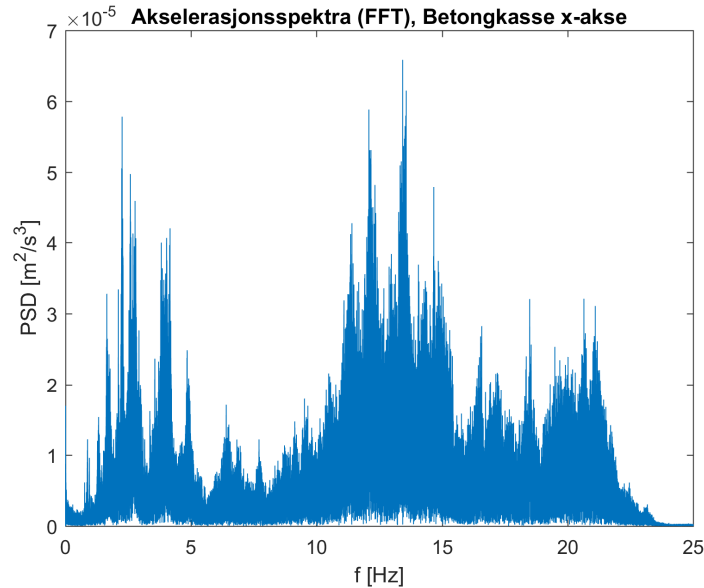
der

$$W_n = e^{\frac{-2\pi i}{n}}$$

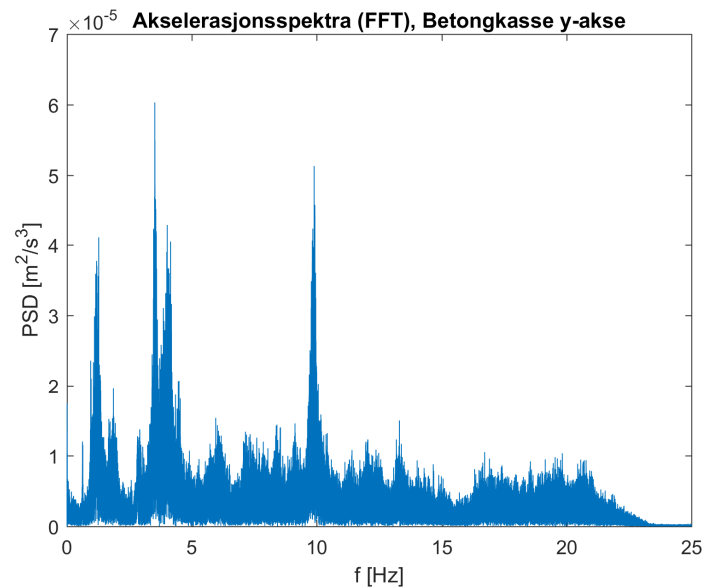
Motsatt til FFT, kan Inverse Fast Fourier Transformation (IDFT) beregnes ved funksjonen `ifft` i Matlab, dette vil da transformere DFT av et signal tilbake til signalets opprinnelige plan. IDFT (X) for en sekvens (Y) med lengde n er da beregnet ved formelen [27]:

$$X(j) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n Y(k) W_n^{-(j-1)(k-1)}$$

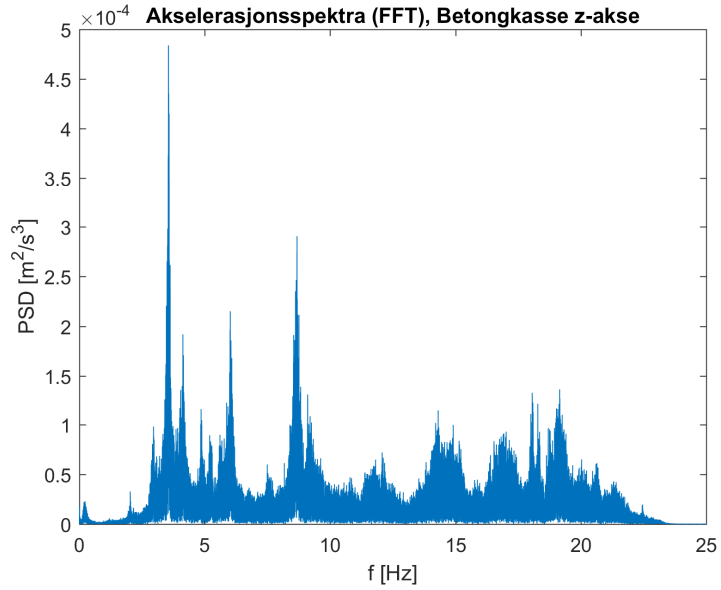
Akselerasjonsdata for alle retninger (x,y,z) fra de to akselerometrene plasserte på brodekket er behandlet med FFT i Matlab, se vedlegg D. Her er det ensidige spektrumet beregnet, dette vil da fjerne den speilende negative siden av frekvensplanet. Resultatet er presentert i plotter som viser de observerte frekvensene og spektraltetthetene knyttet til betongdekket og ståldekket henholdsvis for x,y og z-retning. Plottene er vist i figurene under.



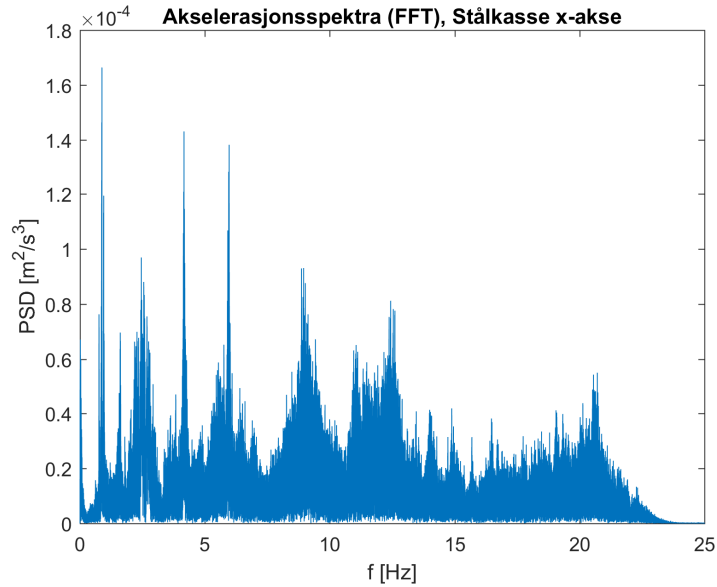
Figur 6.5 Akselerasjonsspektra (FFT), betongkasse x-akse



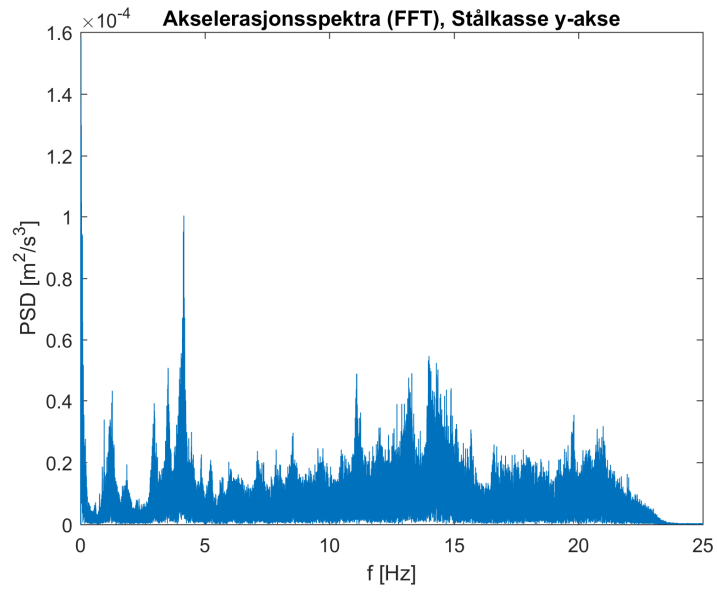
Figur 6.6 Akselerasjonsspektra (FFT), betongkasse y-akse



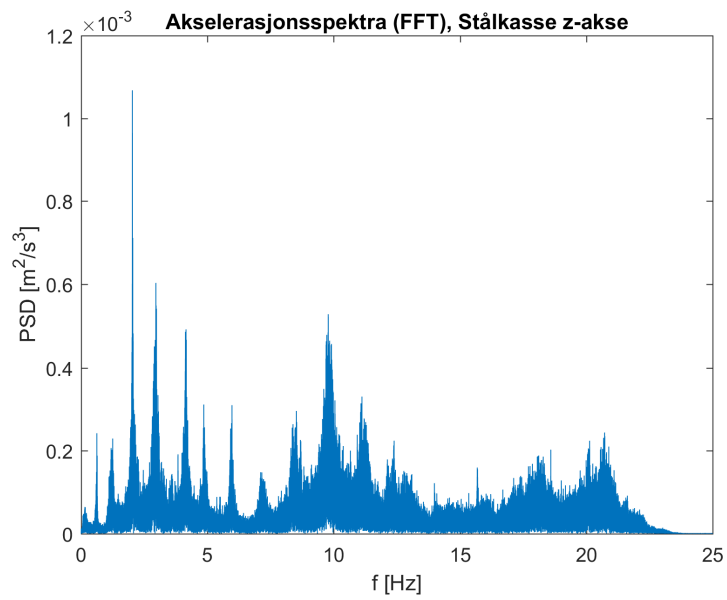
Figur 6.7 Akselerasjonsspektra (FFT), betongkasse z-akse



Figur 6.8 Akselerasjonsspektra (FFT), stålkasse x-akse



Figur 6.9 Akselerasjonsspektra (FFT), stålkasse y-akse



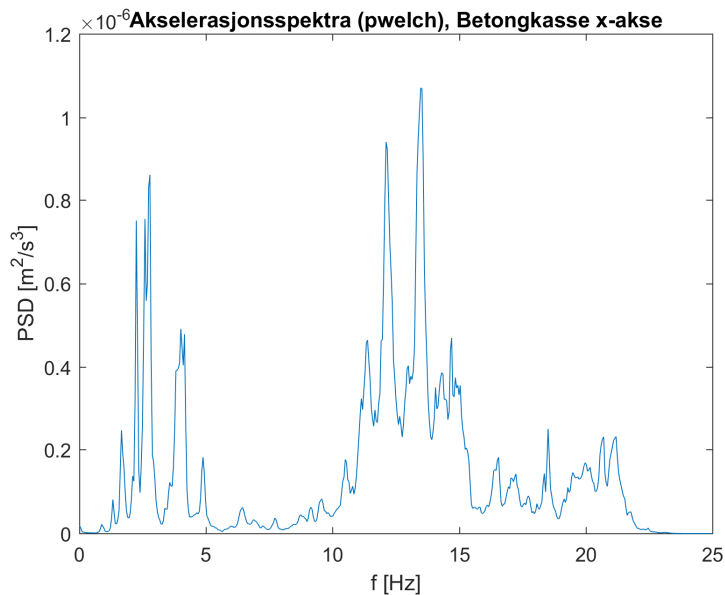
Figur 6.10 Akselerasjonsspektra (FFT), stålkasse z-akse

6.3.2 Pwelch

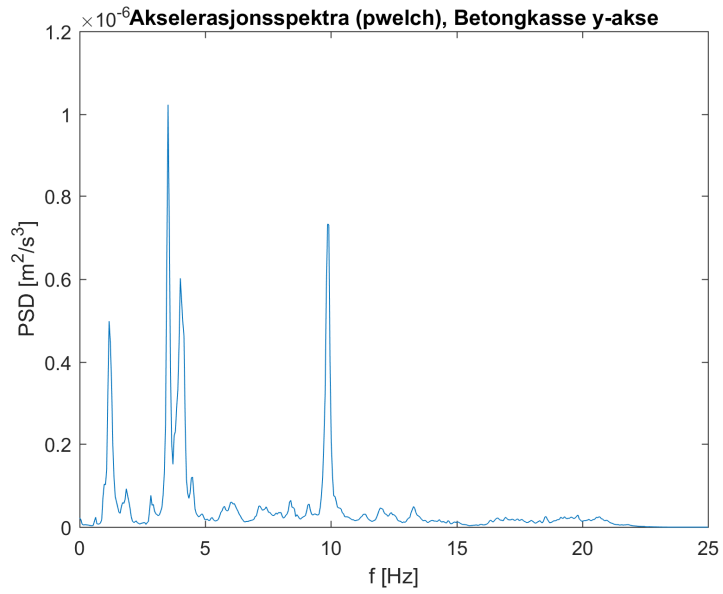
Pwelch (Welch's power spectral density estimate) er en funksjon i Matlab tilgjengelig i «Signal Processing Toolbox» som beregner et estimat for spektraltettheten til et signal [29]. Etter en Fast Fourier transformasjon er det vanlig at det er mye støy i resultatet som kan gjøre det vanskelig å lese egenfrekvenser fra graf. Ved å beregne et estimat av spektraltettheten gjennom pwelch-funksjonen, vil det plottede resultatet være tydelige med glattere kurver som enklere kan tolkes fra graf. Dette er gjort ved å splitte signalet til segmenter, som er multiplisert med Hamming-vinduer [29].

Akselerasjonssignalene fra brodekket er prosessert gjennom pwelch. Her er signalene splittet i segmenter med lengde på 1000 datapunkter, med en tillatt overlapp på 500 datapunkter.

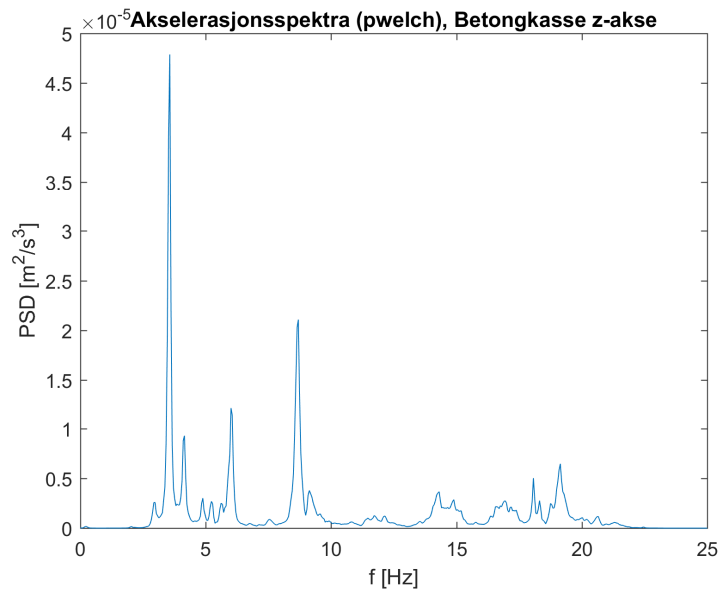
Resultatene er presentert i vedlegg G, i tillegg til figurene under.



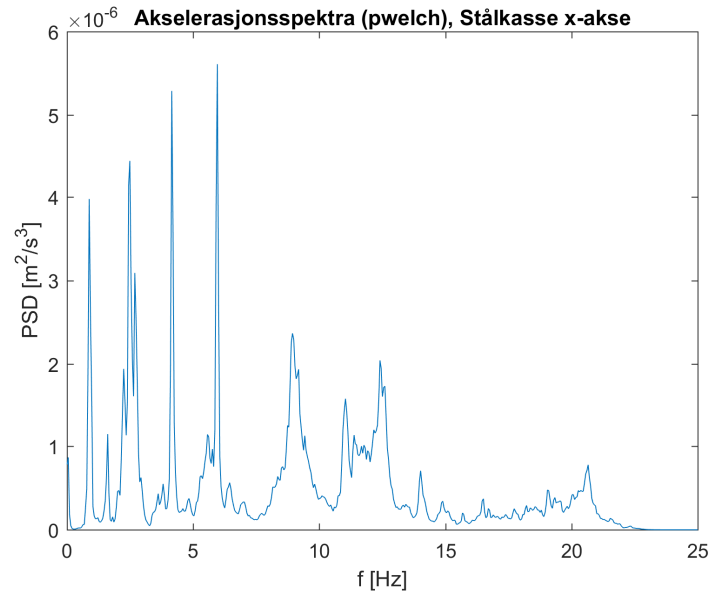
Figur 6.11 Akselerasjonsspektra (pwelch), betongkasse x-akse



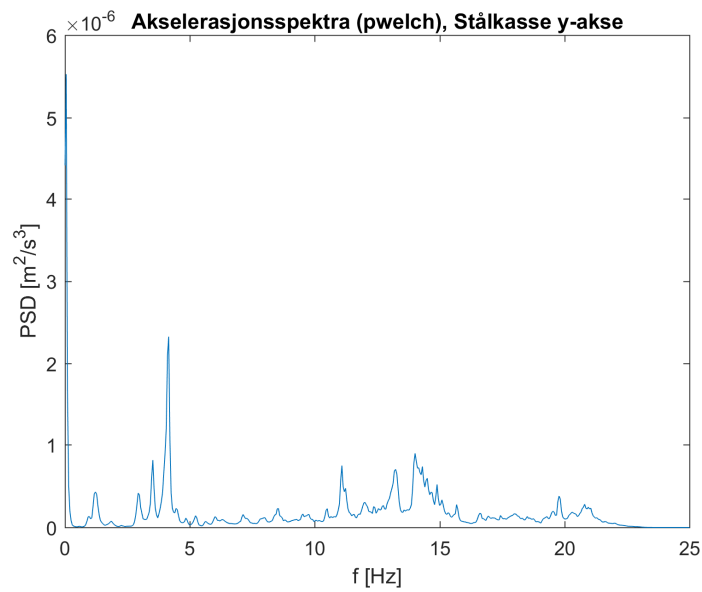
Figur 6.12 Akselerasjonsspektra (pwelch), betongkasse y-akse



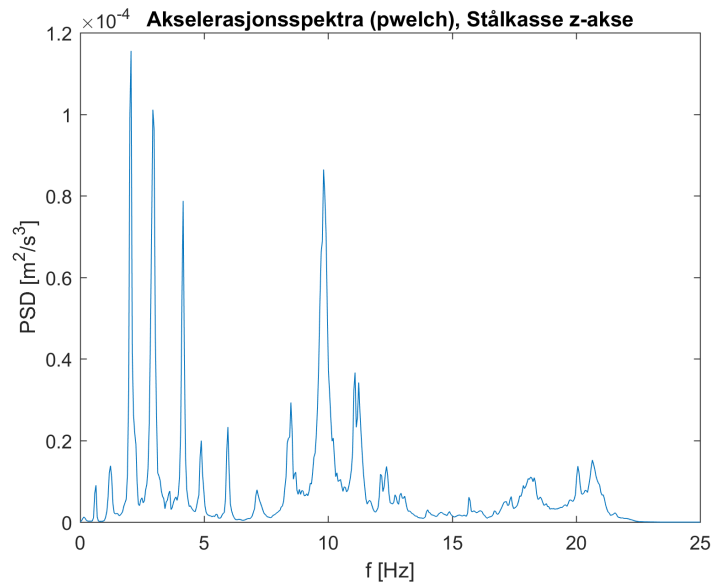
Figur 6.13 Akselerasjonsspektra (pwelch), betongkasse z-akse



Figur 6.14 Akselerasjonsspektra (pwelch), stålkasse x-akse



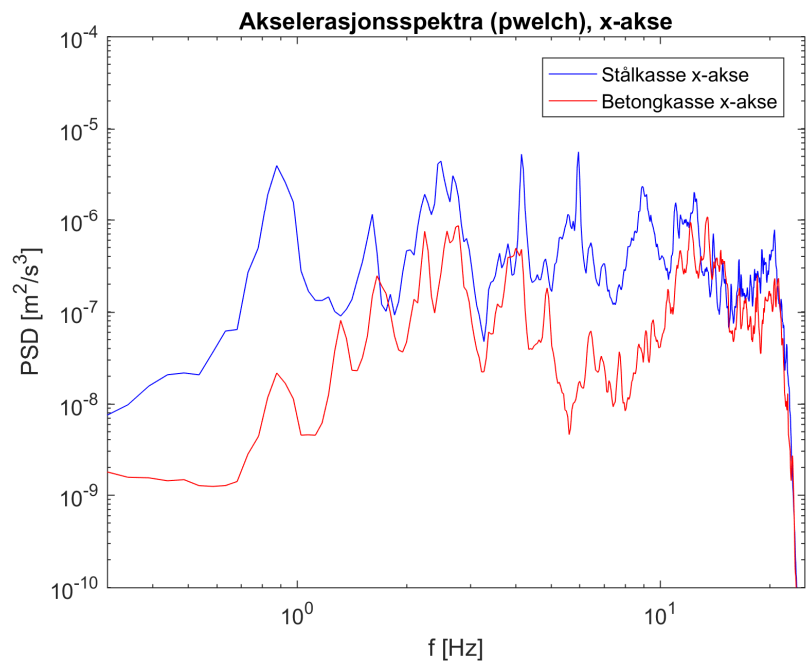
Figur 6.15 Akselerasjonsspektra (pwelch), stålkasse y-akse



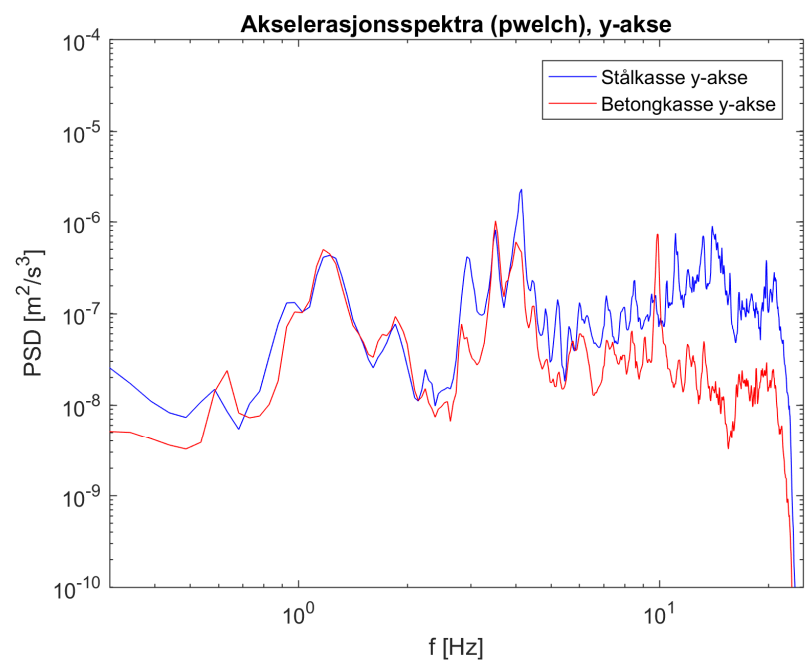
Figur 6.16 Akselerasjonsspektra (pwelch), stålkasse z-akse

Sammenlignet med plottene fra Fast Fourier-transformasjonen, kan det observeres at frekvensene i pwelch-plottene er ryddigere å lese av. I tillegg er verdiene for spektraltettheten (vertikalaksen) noe redusert i forhold til FFT-resultatet, dette er trolig på grunn av estimeringen der ekstremverdiene som er til stede i FFT-plottene blir filtrert ut gjennom kurveestimeringen i pwelch-algoritmen.

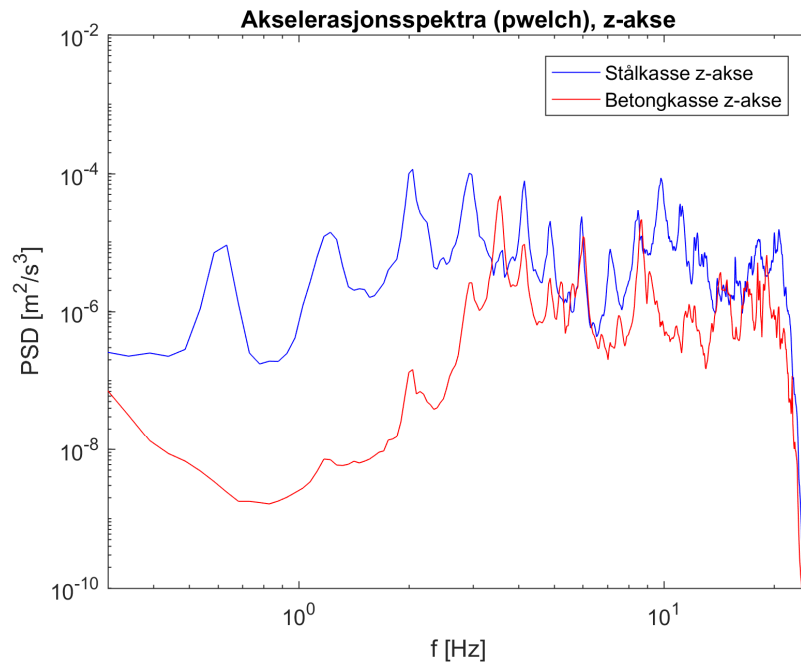
For å sammenligne frekvenser for de ulike retningene er resultatene fra pwelch også plottet på en logaritmisk skala. Dette vil gi et mer oversiktlig bilde av de lavere egenfrekvensene, som da er mer aktuelle. I tillegg blir to spektra i samme plot enklere å sammenligne. Sammenligninger av spektra for hver retning er presentert i figurene under, samt vedlegg G.



Figur 6.17 Logplot akselerasjonsspektra (pwelch), x-akse



Figur 6.18 Logplot akselerasjonsspektra (pwelch), y-akse



Figur 6.19 Logplot akselerasjonsspektra (pwelch), z-akse

6.4 Validering av spektra

Resulterende spektraltettheter fra pwelch (se kapittel 6.3.2), er kontrollert gjennom en visuell inspeksjon av tidsseriene for akselerasjon, se vedlegg C for detaljer. Denne kontrollen er gjennomført ved å teste frekvensene til signalet vist i tidsseriene. Her er det valgt å teste for 3 områder per tidsserie på noen sekunder hver. Frekvensene ble beregnet ved å ‘zooome-inn’ i de plottede tidsseriene, for så å beregne de tilknyttede frekvensene.

Stort sett alle estimerte frekvenser i denne kontrollen kan identifiseres i plottene for spektraltetthet. Dette verifiserer at pwelch-beregningen i Matlab fungerer etter sin hensikt.

I tillegg er spektra kontrollert ved å sammenligne variansen fra tidsseriene med arealet under spektralkurvene fra pwelch. Dette er gjort ved funksjonene «var» og «trapz» i Matlab, se vedlegg D. Resultatet er presentert i tabellen under.

Tabell 6.1 Sammenligning av varianse til signalene med arealet under spektralkurvene fra pwelch

	Varianse til signal	Areal under spektralkurve
Betongkasse x-akse	3.5343e-06	3.5128e-06
Stålkasse x-akse	1.2030e-05	1.2111e-05
Betongkasse y-akse	1.1547e-06	1.1416e-06
Stålkasse y-akse	4.5549e-06	4.4344e-06
Betongkasse z-akse	3.7678e-05	3.7334e-05
Stålkasse z-akse	1.9399e-04	1.9452e-04

Resultatet viser at variansen til akselerasjonsmålingene stemmer godt overens med arealet under spektralkurvene fra pwelch, dette gir da en ekstra bekreftelse ovenfor at spektraltetthetene stemmer overens med signalet. I teorien burde de være like ettersom at [30]:

$$\int_0^{fmax} S_a(f) df = \sigma_a^2$$

der $S_a(f)$ er spektraltettheten fra akselerasjonssignal og σ_a er standardavviket til akselerasjonssignalet. På grunn av tilnærmingene som gjøres av pwelch, er det derimot forventet et lite avvik under denne sammenligningen.

6.5 Analyse av spektra

For situasjonen ovenfor tilgjengelig måledata, er det ønskelig å bruke spektraltettheter til å estimere forskyvningsforholdene mellom sensorene for gitte egenfrekvenser. Dette kan blant annet gjøres ved transformere akselerasjonsmålingene til forskyvninger enten gjennom dobbelintegrasjon eller i frekvensplanet. I denne oppgaven er det valgt å bruke akselerasjonsdata direkte for denne analysen. Dette kan forsvares, ettersom at for et smalt frekvensområde rundt en bestemt frekvens i vil [30]:

$$A_i = \omega_i^2 X_i$$

der A_i er akselerasjonsamplituden, X_i er forskyvningsamplituden og ω_i er gjeldende frekvens.

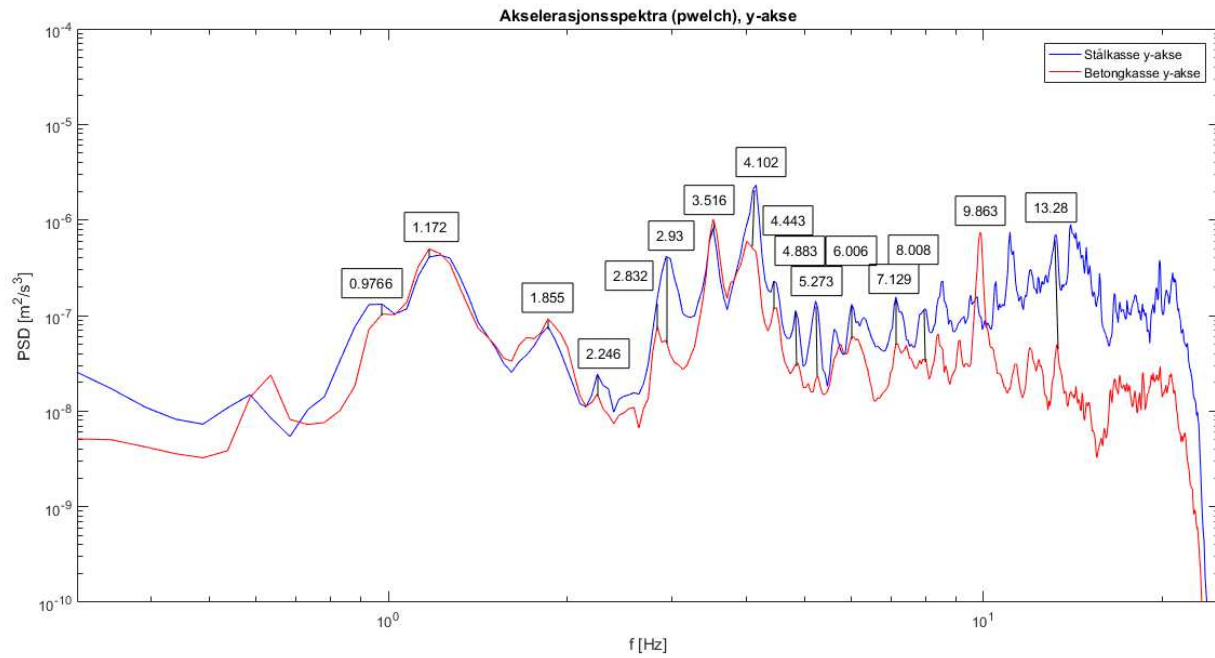
Det vil si at for en gitt ω_i , vil forholdet mellom A_i for de to plasserte sensorene være mer eller mindre lik forholdet mellom forskyvningsamplitudene X_i [30]. For å undersøke modeformen knyttet til egenfrekvens f_i , kan signalet dermed filtreres rundt gjeldende frekvens. Deretter kan forskyvningsforholdene mellom sensorene estimeres ved å se på ekstremalverdiene for spektraltetthet, eller gjennom variansen av det filtrerte signalet.

Forskyvningsforholdet mellom de to sensorene for f_i kan derfor estimeres gjennom [30]:

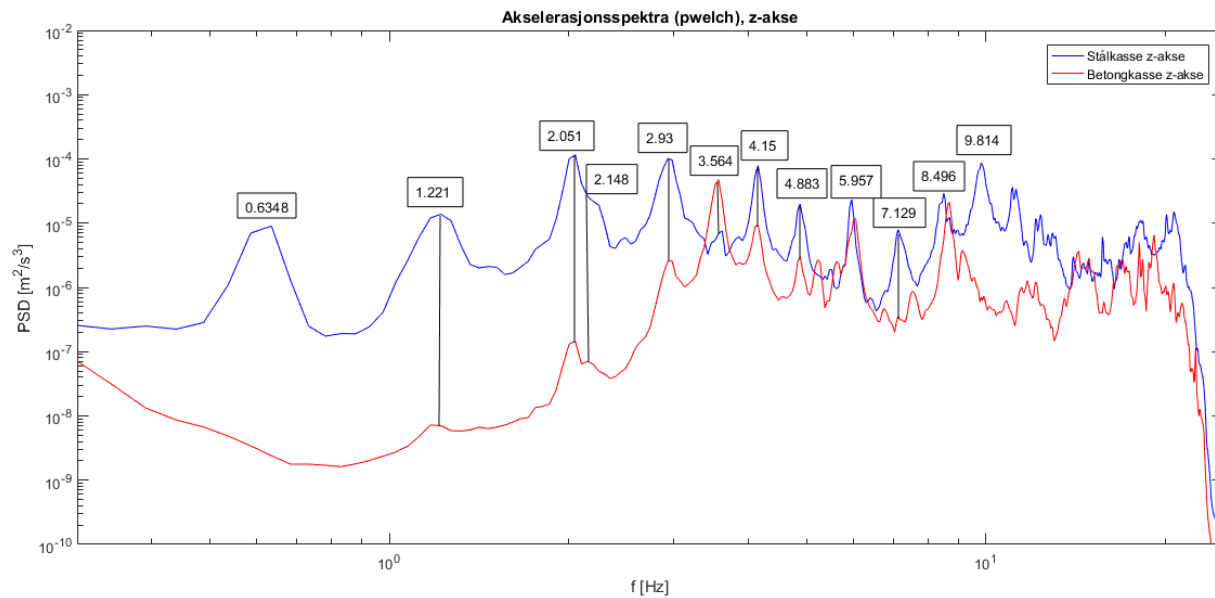
$$\frac{X_{S1}(f_i)}{X_{S2}(f_i)} \approx \frac{A_{S1}(f_i)}{A_{S2}(f_i)} = \sqrt{\frac{S_{aS1}(f_i)}{S_{aS2}(f_i)}} \approx \frac{\sigma_{aS1,F}}{\sigma_{aS2,F}}$$

der $S_{aS1}(f_i)$ og $S_{aS2}(f_i)$ er henholdsvis verdiene for spektraltetthet til sensor 1 og sensor 2, $\sigma_{aS1,F}$ og $\sigma_{aS2,F}$ er variansene til de filtrerte signalene rundt f_i .

Akselerasjonsspektra for y- og z-retning fra pwelch (se kapittel 6.3.2) er analysert ovenfor forskyvningsforhold mellom sensorene. Disse resulterende forskyvningsforholdene er videre sammenlignet med egenmodene fra datamodellanalysene, se kapittel 5. Her er alle samsvarende frekvenstopper som eksisterer i begge sensorene notert ut fra spektra, se figurer under.



Figur 6.20 Akselerasjonsspektra (pwelch), y-akse, med noterte frekvenser

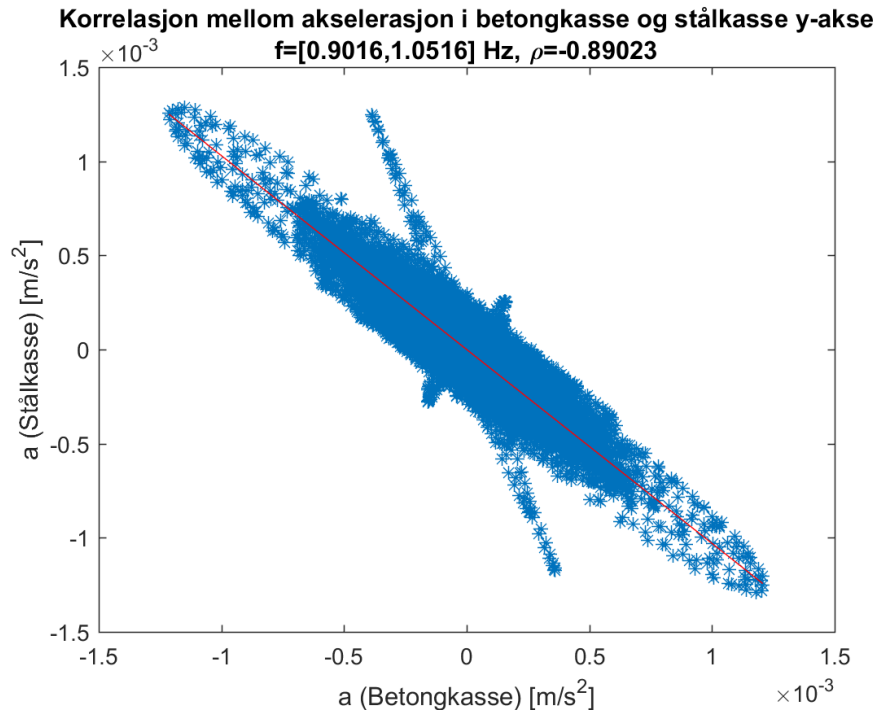


Figur 6.21 Akselerasjonsspektra (pwelch), z-akse, med noterte frekvenser

Akselerasjonsmålingene er deretter filtrert med et frekvensområde på 0.15 Hz rundt alle noterte samsvarende frekvensene mellom sensorene. For å automatisere prosessen ovenfor analysene, er det valgt å benytte et fast filtreringsintervall på 0.15 Hz rundt alle noterte frekvenser. En mer 'presis' filtrering for hver enkel egenfrekvens er også mulig å anvende, men er valgt bort grunnet antall analyser som er gjennomført her. Forskyvningsforholdene mellom de to sensorene er estimert basert på noterte spektraltettheter i pwelch-spektra. Resultatet er også kontrollert ved å beregne variansen til de filtrerte signalene, se vedlegg D.

I tillegg er det gjennomført korrelasjonsanalyser for alle samsvarende frekvenser mellom sensorene. Dette vil gi informasjon ovenfor hvordan modeformen knyttet til hver egenfrekvens vil se ut. En positiv korrelasjonskoeffisient mellom sensorene vil her gi indikasjon på at forskyvningene til begge sensorene skjer i samme retning, og en negativ korrelasjonskoeffisient vil si at forskyvningene i begge sensorene skjer i motsatt retning. Korrelasjonskoeffisientene er beregnet i Matlab for alle filtrerte signaler, se vedlegg D. Her korrelasjonene også presentert gjennom figurer, se vedlegg G.

En oversikt ovenfor forskyvningsforhold og korrelasjonskoeffisienter til hver frekvens er presentert i vedlegg E. Resultatene viser at forskyvningsforholdene estimert gjennom spektraltettheter stemmer godt overens med estimatene ut fra variansene til de filtrerte signalene. For mange av egenfrekvenser kan det observeres en sterk korrelasjon av akselerasjonene knyttet til begge sensorene. Derimot for andre frekvenser er det ikke like sterke korrelasjoner ovenfor data. Dette er som forventet ettersom at frekvensområdet i filtreringen var satt som 0.15 Hz for alle noterte frekvenser, noe som i mange tilfeller er for stort område. Resultatet av dette er at andre nærliggende responser og ulike forstyrrelser i data blir inkludert i analysene, som særlig er tydeliggjort i korrelasjonsplottene. Et eksempel på dette er vist i figuren under.



Figur 6.22 Korrelasjon mellom akselerasjon i betongkasse og stålkasse, y-akse, $f=[0.9016;1.0516]$ Hz

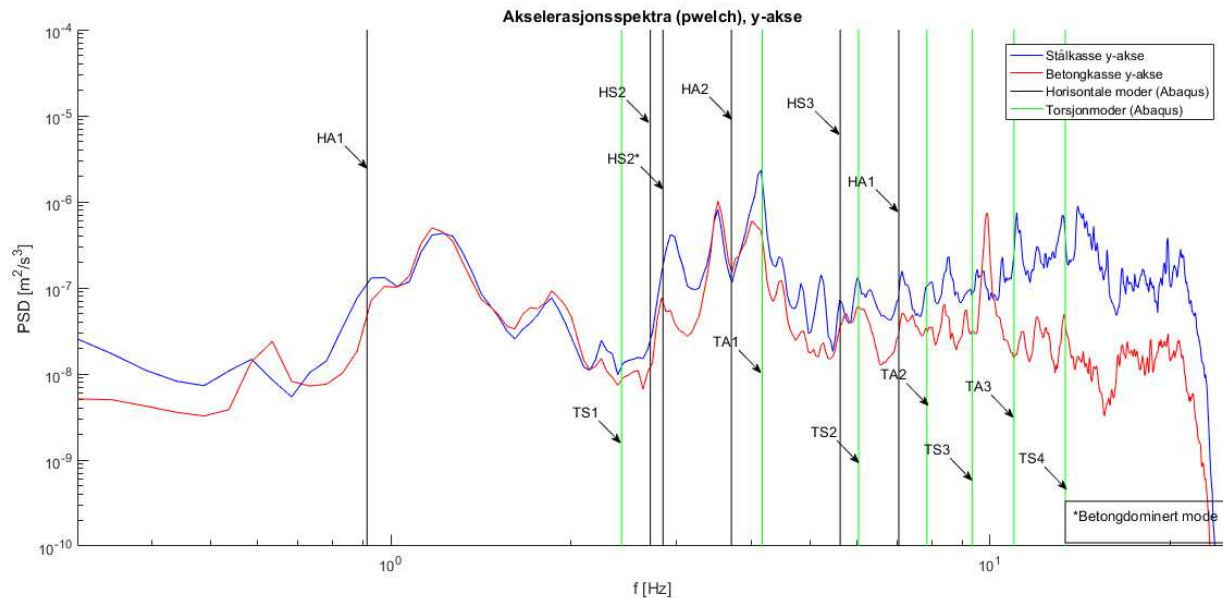
I figuren over kan det observeres at akselerasjonene mellom sensorene har en sterk negativ korrelasjon. Derimot kan det merkes at det er litt forstyrrelser i de filtrerte dataene, som da har en liten påvirkning på resulterende korrelasjonsfaktor i tillegg til variansen av signalet. For å fjerne disse forstyrrelsene er det mulig å gjøre frekvensområdet smalere og/eller ved å filtrere bort ekstremverdier fra tidsseriene. Derimot det viktigste med denne analysedelen er å få en indikasjon ovenfor modeformen til egenfrekvensene, og av den grunn er det derfor valgt å beholde resultatene.

7 Sammenligning av måledata og Abaqus-modell

7.1 Egenfrekvenser og egenmoder til brodekket

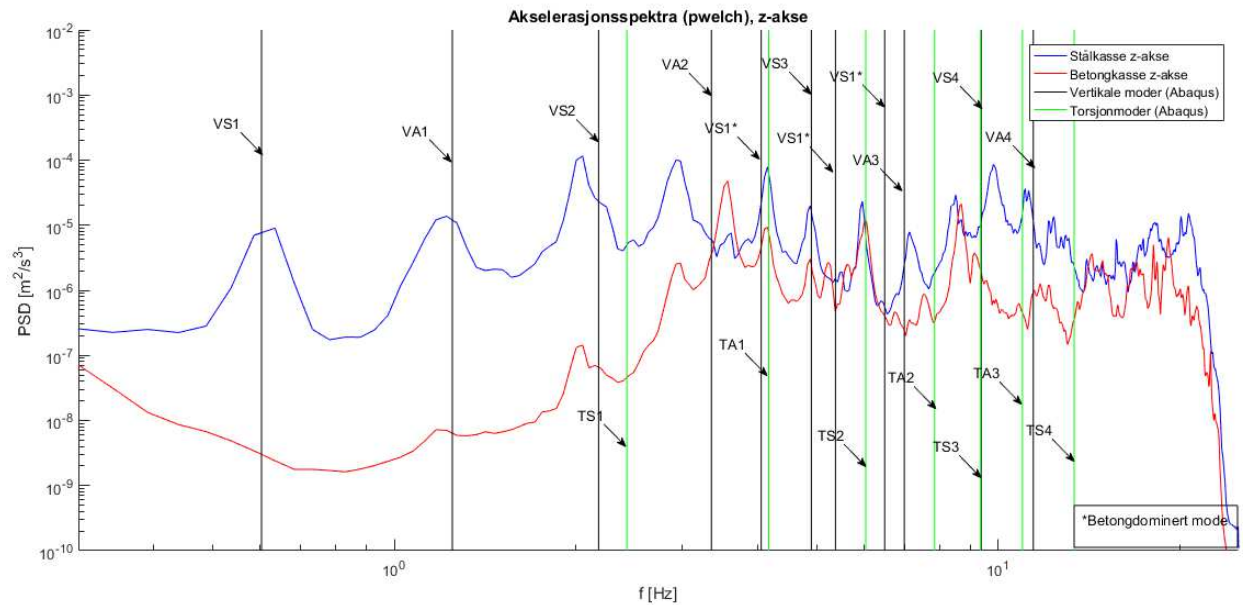
Alle resulterende symmetriske og asymmetriske egenmoder knyttet til brodekket er overlappet med spektra for en visuell undersøkelse. Ettersom at måleutstyrene er plassert på siden av brokassen, er det forventet at egenfrekvensene knyttet til torsjon også burde dukke opp i måledata for y- og z-akse.

For første randbetingelsesituasjon av datamodellen (se kapittel 5.2) er resulterende egenfrekvenser til brodekket overlappet i spektra for y- og z-retning i figurene under.



Figur 7.1 Akselerasjonsspektra y-akse med egenfrekvenser fra Abaqus (første randbetingelsesituasjon)

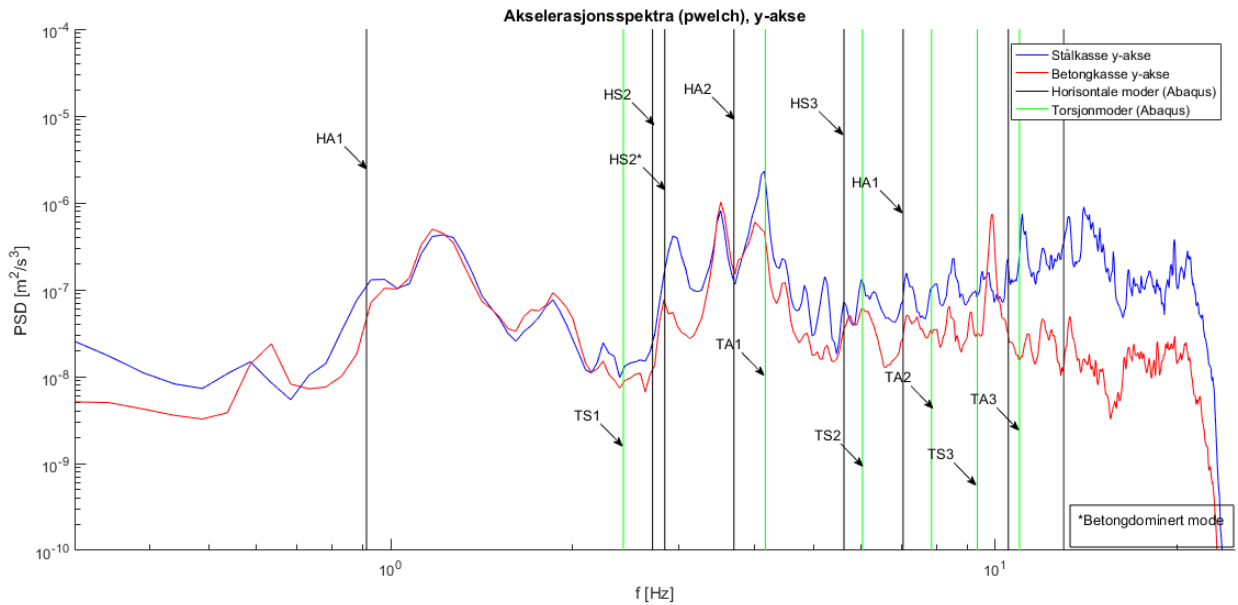
I figur 7.1 kan det observeres at HA1 overlapper godt med frekvenstoppen på rundt 0.9 Hz. De to variantene av HS2 ser ut til å stemme greit med toppene rundt 2.85 Hz. Det er en mulighet for at HA2 stemmer samsvarer med toppen på 3.5 Hz. Her kan alle torsjonmoder utenom TS1 også forklare enkelte frekvenstopper i spektra. Frekvenstopperne på rundt 1.2 Hz og 1.8 Hz kan ikke forklares i denne sammenligningen.



Figur 7.2 Akselerasjonsspektra z-akse med egenfrekvenser fra Abaqus (første randbetingelsessituasjon)

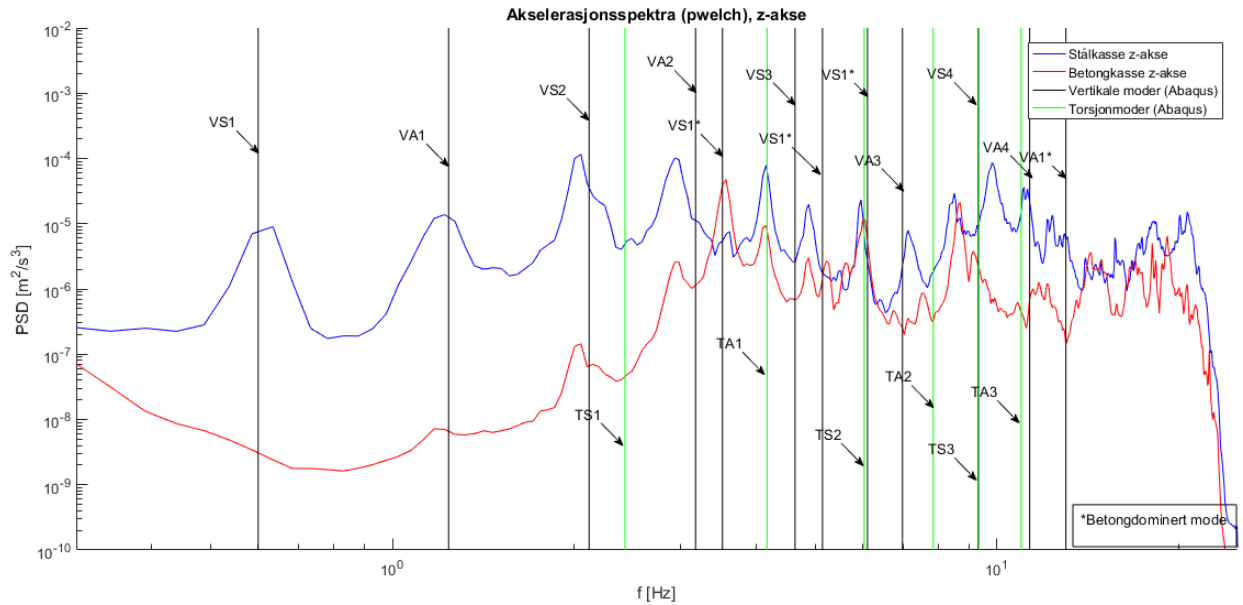
I figur 7.2 kan det observeres at VS1 og VA1 treffer frekvenstoppe veldig bra. VS2 ser ut til å treffe delvis greit med frekvenstoppen på rundt 2-2.2 Hz. Ved å observere responsen i betongkasse, er det en mulighet for at dette er to forskjellige egenfrekvenser som er skjult av pwelch-tilnærmingen. TS1 samsvarer trolig med den lille toppen på rundt 2.5 Hz, og resten av torsjonmodene utenom TA2 og TS4 overlapper greit med frekvenstopper. Frekvenstoppe rundt 2.9 og 3.5 Hz er derimot vanskelige å forklare basert på figuren.

For andre randbetingelsessituasjon av datamodellen (se kapittel 5.5) er resulterende egenfrekvenser til brodekket overlappet i spektra for y- og z-retning i figurene under.



Figur 7.3 Akselerasjonsspektra y-akse med egenfrekvenser fra Abaqus (andre randbetingelsessituasjon)

I forhold til figur 7.1 er det minimal med endring ovenfor egenfrekvensene fra datamodellanalysen. Dette viser at endringen av randbetingelser har liten påvirkning ovenfor de resulterende horisontale egenmodene til brodekket.



Figur 7.4 Akselerasjonsspektra y-akse med egenfrekvenser fra Abaqus (første randbetingelsesituasjon)

Sammenlignet med figur 7.2, er det første som er verdt å merke seg at den første betongdominerte (felt mellom akse 10 og 11) VS1 her treffer verdien for den største spektraltettheten i betongspektra utmerket. De to andre betongdominerte VS1 ser også ut til å treffe frekvenstopper med høyere spektraltetthet for betongdekket i forhold til ståldekket. Her kan det også observeres at VA2 har flyttet seg nærmere frekvenstoppen på rundt 2.9 Hz. Det er derimot ingen tilsynelatende endringer på torsjonsmodene. Dette er som forventet ettersom at randbetingelsene ovenfor rotasjoner om lengdeaksen til brodekket ikke er endret.

Eigenfrekvensene og egenmodene fra Abaqus-analysene er sammenlignet med måledata ved å undersøke modeformene. Dette vil bekrefte om egenmodene for samsvarende egenfrekvenser faktisk stemmer overens. Her er det undersøkt forskyvningene til noder på brodekket som tilsvarer plasseringen til akselerometrene, i datamodellen vil dette være node 20 og 45. Gjennom funksjonen *NODE PRINT er forskyvningene til disse nodene hentet for alle egenmoder til brodekket som er inkludert i sammenligningen. Ut fra disse forskyvningene er forskyvningsforholdet mellom nodene beregnet. Resulterende forskyvningsforhold til egenmodene er deretter sammenlignet med estimerte forskyvningsforhold og korrelasjonskoeffisient fra måledata (se kapittel 6.5). Her er det gjennomført sammenligninger ovenfor de mest sannsynlige samsvarende egenfrekvensene basert

på figurene 7.1-7.4. I tilfeller der er flere muligheter for en frekvenstopp i spektra, er det testet for flere egenmoder. Vertikale forskyvninger som følge av rotasjoner i torsjonsmoder er ikke undersøkt i sammenligningen. En oversikt over sammenligningene er presentert i vedlegg E. Basert på resultatene av sammenligningene, er de egenfrekvensene som er mer eller mindre bekreftede plasserte i tabellen under.

Tabell 7.1 Resultat fra sammenligningen

Modeform	$f(\text{spektra})$ [Hz]	$f(\text{Abaqus})$ [Hz]	Avvik frekvens %
VA1	1.221	1.239	1.5%
VS2	2.051	2.116	3.2%
VA2	2.93	3.173	8.3%
VS1*(10-11)	3.564	3.516	-1.3%
VS3	4.883	4.634	-5.1%
VS1*(11-12)	~6.0	6.108	1.8%
TS2	6.006	6.033	0.4%
TA2	8.008	7.843	-2.1%

Resultatet av sammenligningene viser at de vertikale egenmodene fra Abaqus stemmer veldig bra overens med måledata. Det kan særlig observeres en betydeligere forbedring etter endring av randbetingelser (se kapittel 5.5). Dette bekrefter at koblingene fra brodekket til søyler og tårnrigel faktisk ikke er stive ovenfor rotasjoner i vertikalplanet.

Sammenligningene ovenfor de horisontale modene stemmer derimot ikke like godt overens med måledata, uavhengig av endring på randbetingelser ovenfor rotasjoner i horisontalplanet. Dette er særlig tydeliggjort i forskjell på forskyvningsforhold i sammenligningen. Det kan være flere årsaker til dette. For det første er det generelt lite informasjon å gå ut fra ved konstrueringen av datamodellen. Dette vil da skape en viss usikkerhet ovenfor resultatene i forhold til estimering av mekaniske egenskaper. Blant annet kan treghetsmomentet om horisontalplanet til broen være modellert med et avvik.

Skjærsenteret til brodekket vil ha en innvirkning på hvordan brodekket oppfører seg i forhold til torsjon (og tilknyttede horisontalforskyvninger). I denne oppgaven var skjærsenter ikke spesifisert i Abaqus-analysene, dette kan ha en påvirkning resulterende horisontale moder.

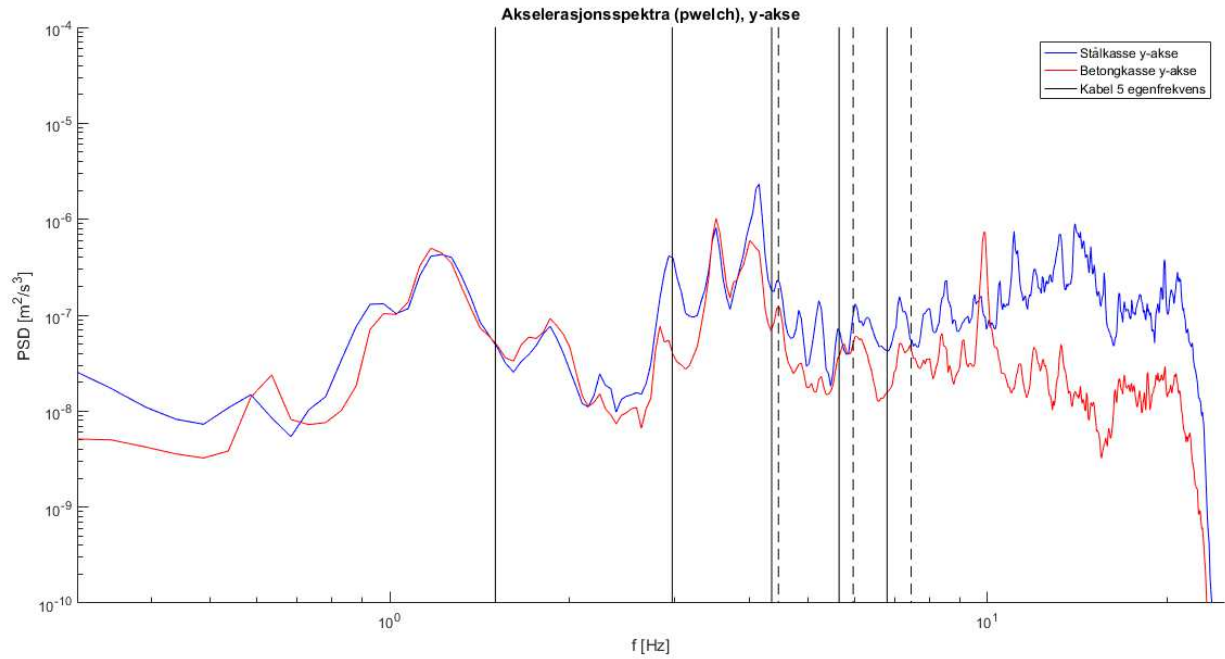
En annet mulig forklaring kan være at randbetingelsene ovenfor brodekket ikke er riktig estimert, særlig ovenfor de horisontale forskyvningsbegrensningene på grunn av søyler og tårn.

Koblingene til de komponentene i datamodellen er antatt slik at alle forskyvninger blir begrenset. For de vertikale modeformene er dette et greit estimat ettersom at søylene og tårnrigel vil ha en såpass stor stivhet ovenfor bevegelser i vertikalretning. Derimot for de horisontale modene blir svingeformen til brodekket fullstendig tilknyttet søyler og tårnet ovenfor horisontale stivheter. I virkeligheten, er det en mulighet for at søylene og tårnrigelen kun gir en viss begrensning ovenfor horisontale forskyvninger ettersom at koblingene ikke er fullstendig stive i tillegg til at det kan være litt rom for 'glidning' i koblingen.

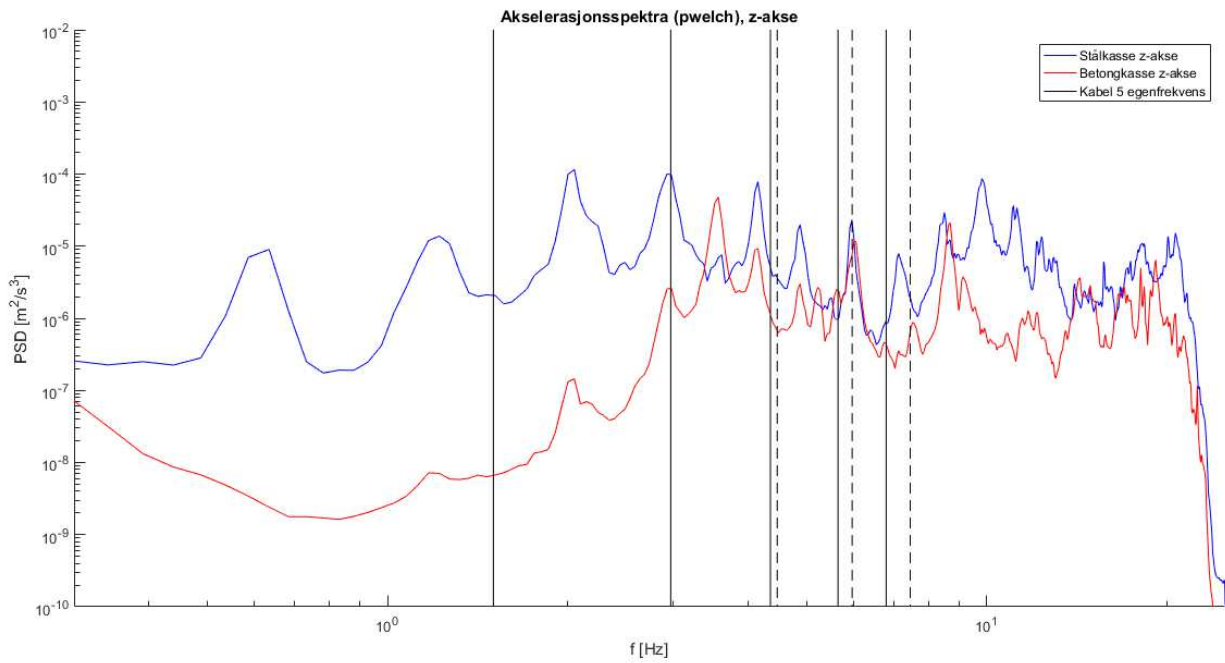
7.2 Egenfrekvenser kabler

Ut fra resultatene fra kapittel 5.6, er det gjennomført en visuell inspeksjon ovenfor egenfrekvensen mot spektra. De estimerte egenfrekvensene er plassert over spektralkurvene for y- og z-retning gjennom Matlab, se vedlegg D. Alle resulterende figurer er presentert i vedlegg G. Her er egenfrekvensene knyttet til kabel 5 fremhevet.

Akselerometret festet til stålkassen veldig nært forankringen til kabel 5. Av denne grunn er det valgt å sammenligne resulterende egenfrekvenser for kabel 5 ovenfor akselerasjonsspektra. De stiplede linjene viser de teoretiske betraktede kabelfrekvensene av høyere svingeform.



Figur 7.5 Akselerasjonsspektra y-akse med egenfrekvenser til kabel 5



Figur 7.6 Akselerasjonsspektra z-akse med egenfrekvenser til kabel 5

Gitt at vibrasjoner fra kabel 5 blir plukket opp av måledata, kan det forventes at egenfrekvensene ikke gir utslag for betongdekket. Dette er på grunn av at kablene vil hovedsakelig forårsake lokale svingninger i området rundt målesensoren plassert i ståldekket.

I figurene over kan det observeres at kabelfrekvensene treffer enkelte frekvenstopper fra måledata. A1 treffer frekvenstopperne på ~ 2.9 Hz, og A2 treffer frekvenstopperne på ~ 6 Hz. Det kan også observeres at S1 treffer en relativt liten frekvenstopp på ~ 1.5 Hz som kun vises i ståldekket for z-akse. Det er da en mulighet for at denne frekvenstoppen samsvarer med den første symmetriske svingemoden til kabel 5. Stort sett for alle kabler, virker det som at kabelfrekvensene overlapper en del med egenfrekvenser som sannsynligvis er fra dekket. Ut fra disse resultatene i seg selv, er det derfor lite grunnlag for å konkludere at enkelte egenfrekvenser i spektra er forårsaket av rene kabelvibrasjoner.

8 Konklusjon

I denne oppgaven er Bybrua i Stavanger analysert gjennom en datamodell og akselerasjonsdata. Modellen består hovedsakelig av bjelkeelementer med påførte mekaniske egenskaper som er estimert ut fra arbeidstegninger og opprinnelige beregninger, gitt av Statens vegvesen. Effekten av spennarmering i brodekket av betong ble inkludert i datamodellen gjennom å plassere beregnede ekvivalente krefter langs brodekket. I tillegg ble kabelforspenninger beregnet gjennom en optimaliseringsalgoritme som ble laget i Matlab.

Måledata fra to akselerometre plasserte på to ulike steder langs brodekket, ble analysert ovenfor spektraltettheter og frekvenser gjennom pwelch funksjonen i Matlab. Spektraltetthetene ble validert ved manuelle undersøkelser av frekvenser til stede i tidsserien, i tillegg til en kontroll for variansen av signalet med arealet under spektralkurven.

Ulike varianter av datamodellen ble analysert for statistisk- og egenfrekvensanalyse. Resultatet fra de statiske analysene av modellen viste at de beregnede kabelforspenningene hadde en god effekt ovenfor motvirkning av nedbøyninger i dekket som følge av egenvekt. I tillegg ble effekten av spennarmeringen i betongdekket tydeliggjort, og de inkluderte ekvivalente kreftene fungerte etter sin hensikt.

Egenmodene til brodekket i datamodellen ble sammenlignet med måledata ved å se på forskyvningsforhold mellom plasserte måleinstrumenter på brodekket. Ut fra spektraltettheter til akselerasjonssignalene ble korrelasjonskoeffisienter og estimerte forskyvninger beregnet i Matlab. Både korrelasjonskoeffisienter og estimerte forskyvninger fra måledata viste positivt samsvar ovenfor mange av de vertikale egenmodene fra datamodellanalysen. Dette var tydeligere i datamodellanalysen med tillatte rotasjoner i vertikalplanet og horisontalplanet i forhold til koblingen mellom brodekket til søyler og tårnrigel. Dette bekreftet at brodekket ikke er fastholdt for rotasjoner i vertikalplanet til både søyler og tårnrigel. I tillegg gir dette en indikasjon på at datamodellen er modellert riktig ovenfor randbetingelser og mekaniske egenskaper i vertikalretning. For tversgående retning, var det derimot ikke like bra samsvar under sammenligningen. Justering av randbetingelser ovenfor rotasjoner i horisontalplanet hadde i tillegg lite påvirkning på dette.

Spektra fra måldata ble også sammenlignet med egenfrekvensene til kablene, som ble estimerte gjennom en separat måldataanalyse der kablene var modellerte som bjelkeelementer. Denne sammenligningen viste ingen tydelige tegn på at noen egenfrekvenser fra måldata er forårsaket av rene kabelvibrasjoner.

8 Referanser

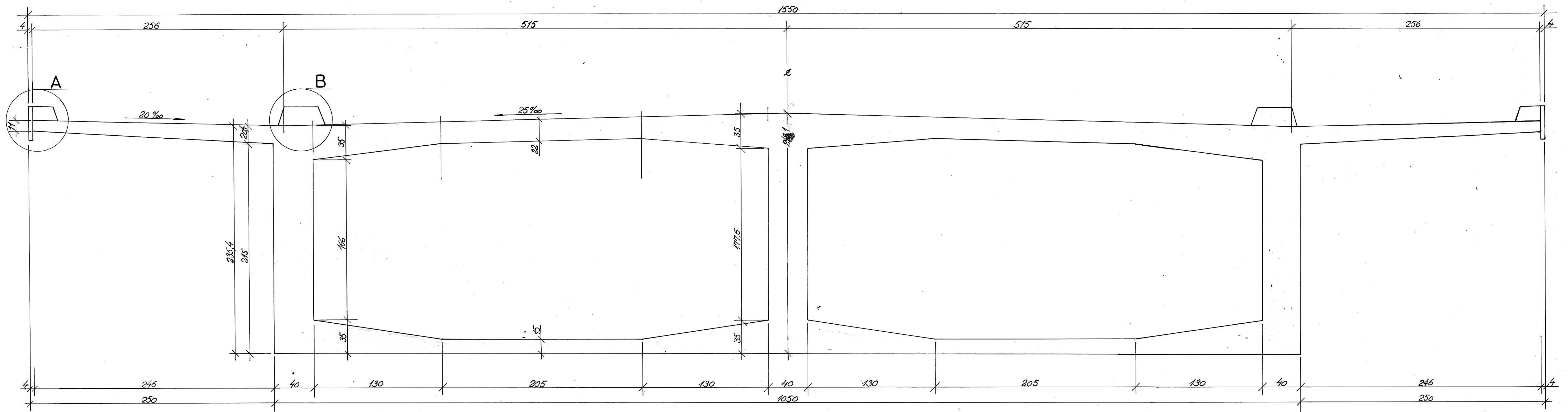
- [1] J. B. Jakobsen og J. T. Snæbjörnsson, «Cable vibration monitoring at Bybrua in Stavanger,» Stavanger, 2019.
- [2] Wikimedia Foundations, «Abaqus,» 2020. [Internett]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Abaqus>. [Funnet 5 mai 2020].
- [3] Helsedirektoratet, «Helsedirektoratet har vedtatt omfattende tiltak for å hindre spredning av Covid-19,» 2020. [Internett]. Available: <https://www.helsedirektoratet.no/nyheter/helsedirektoratet-har-vedtatt-omfattende-tiltak-for-a-hindre-spredning-av-covid-19>. [Funnet 5 mai 2020].
- [4] Dassault Systemes, «Abaqus Student Edition,» 2020. [Internett]. Available: <https://academy.3ds.com/en/software/abaqus-student-edition>. [Funnet 5 mai 2020].
- [5] D. Ho, «Notepad++,» 2020. [Internett]. Available: <https://notepad-plus-plus.org/>. [Funnet 5 mai 2020].
- [6] Wikimedia Foundations, «Mathcad,» 2020. [Internett]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Mathcad>. [Funnet 5 mai 2020].
- [7] Wikimedia Foundations, «MATLAB,» 2020. [Internett]. Available: <https://no.wikipedia.org/wiki/MATLAB>. [Funnet 5 mai 2020].
- [8] Wikimedia Foundations, «Microsoft Office Excel,» 2020. [Internett]. Available: https://no.wikipedia.org/wiki/Microsoft_Office_Excel. [Funnet 5 mai 2020].
- [9] Wikimedia Foundations, «Cable-stayed bridge,» 2020. [Internett]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Cable-stayed_bridge. [Funnet 27 juni 2020].
- [10] Wikimedia Foundations, «Skråkabelbro,» 2020. [Internett]. Available: <https://no.wikipedia.org/wiki/Skr%C3%A5kabelbro>. [Funnet 27 juni 2020].
- [11] P. Aune og I. Holand, Red., Norwegian Bridge Building: A volume honoring Arne Selberg, Tapir, 1981.
- [12] A. Nordrum, «Popular Cable-Stay Bridges Rise across U.S. to Replace Crumbling Spans,» 22 januar 2015. [Internett]. Available: <https://www.scientificamerican.com/article/popular-cable-stay-bridges-rise-across-u-s-to-replace-crumbling-spans/>. [Funnet 27 juni 2020].

- [13] Wikimedia Foundations, «Fritt frambygg-bro,» 2020. [Internett]. Available: https://no.wikipedia.org/wiki/Fritt_frambygg-bro. [Funnet 27 juni 2020].
- [14] I. Golebiowska og K. Peszynski, «Reduction of cable vibrations caused by wind,» i *Engineering Mechanics*, Svratka, Czech Republic, 2016.
- [15] Wikimedia Foundations, «Bybrua (Stavanger),» 2020. [Internett]. Available: [https://no.wikipedia.org/wiki/Bybrua_\(Stavanger\)](https://no.wikipedia.org/wiki/Bybrua_(Stavanger)). [Funnet 27 juni 2020].
- [16] Johs Holt, «Bybrua i Stavanger,» [Internett]. Available: <http://www.johsholt.no/prosjekt/bybrua-i-stavanger/>. [Funnet 28 juni 2020].
- [17] Dassault systemes , *Abaqus analysis user's guide*, 6.14 red., Simulia Corp., 2014.
- [18] C. F. Kollbrunner og K. Basler, *Torsion in Structures: An Engineering Approach*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 1969.
- [19] Standard Norge, *Eurokode 2: Prosjektering av betongkonstruksjoner Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger*, Standard Norge, 2008.
- [20] Wikimedia Foundations, «Pond,» 2020. [Internett]. Available: <https://no.wikipedia.org/wiki/Pond>. [Funnet 14 mai 2020].
- [21] R. I. Gilbert, N. C. Mickleborough og G. Ranzi, *Design of Prestressed Concrete to Eurocode 2, Second Edition*, CRC Press, 2017.
- [22] W. C. Young, R. G. Budynas og A. M. Sadegh, *Roark's Formulas for Stress and Strain, Eight Edition*, The McGraw-Hill Companies, Inc., 2012.
- [23] I. Kusano, «Reliability based design optimization of long-span bridges under flutter constraint,» School of Civil Engineering, University of Coruña, Spain, 2015.
- [24] A. Baldomir, «Cable-stayed bridge practice 1, class material from 'Bridge II',» School of civil engineering, University of Coruña, Spain, 2018.
- [25] N. J. Gimsing og C. T. Georgakis, *Cable Supported Bridges: Concept and design, Third Edition*, John Wiley & Sons, Ltd, 2012.
- [26] Wikimedia Foundations, «Fast Fourier transform,» 2020. [Internett]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Fast_Fourier_transform. [Funnet 9 juni 2020].
- [27] Mathworks, «fft,» [Internett]. Available: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/fft.html>. [Funnet 9 juni 2020].

- [28] M. Frigo og S. G. Johnson, «FFTW,» [Internett]. Available: <http://www.fftw.org/>. [Funnet 9 juni 2020].
- [29] Mathworks, «pwelch,» [Internett]. Available: <https://www.mathworks.com/help/signal/ref/pwelch.html>. [Funnet 10 juni 2020].
- [30] J. B. Jakobsen, «Mode shape estimation from measurement data,» (Notat), Stavanger, 2020.

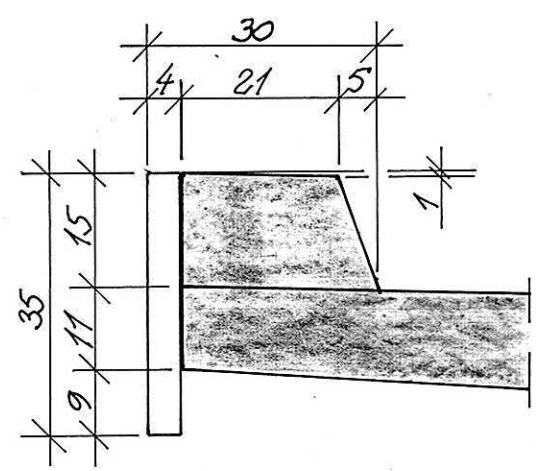
VEDLEGG A

Arbeidstegninger



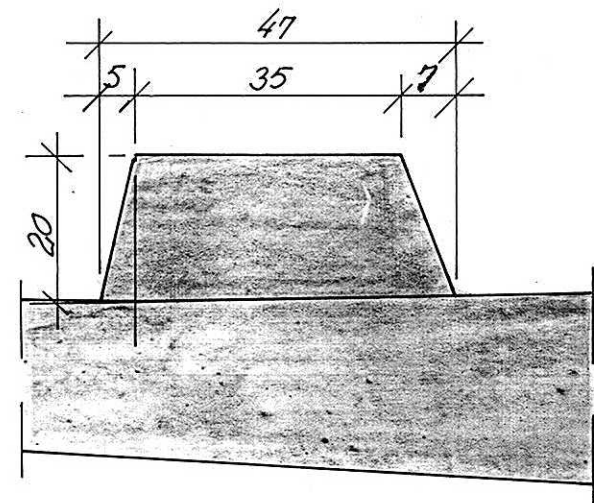
TVERRSNITT

1:20



DETALJ A

1:10



DETALJ B

1:10

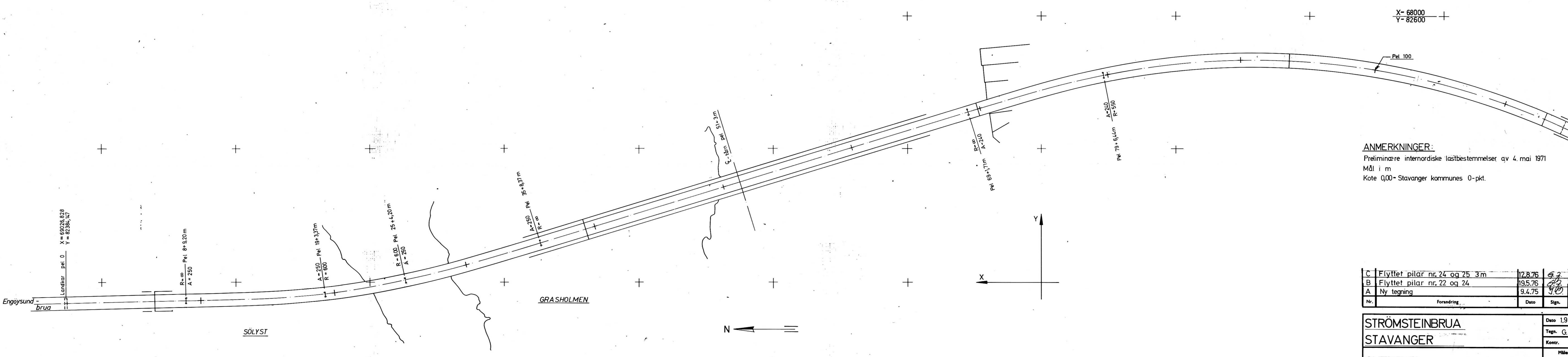
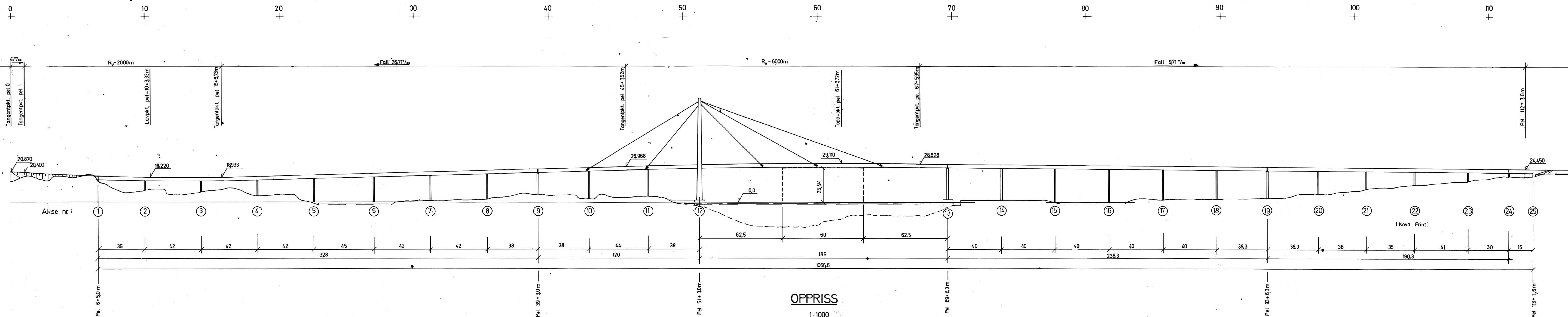
ANMERKNINGER:

- Mål i cm.
- Betong: C35
 - D₁₀₀ = 38 mm
 - Armering: Ks 40 og Ks40S
 - Overdekning: 5cm i ok. kjørebane
3cm forøvrig
 - Kontrollklasse: Utvidet kontroll etter NS 3474

HENVISNINGER:

Tegn.nr. 7208/B010.

Nr.	Forandring	Dato	Sign.	Kontr.
STRØMSTEINBRUA STAVANGER				Dato 4.2.1976
				Tegn. <i>E.S.</i>
				Kontr. <i>E.S.</i>
TVERRSNITT I FELT 10-11 OG 11-12 FORMTEGNING				Målestokk 1:10, 1:20
Professor dr. Arne Selberg <i>Arne Selberg</i> NTH Trondheim Sivilingeniør Johs. Holt <i>Johs Holt</i> Kr. Augustsgt. 6, Oslo 1. Tlf. 33 39 26 - 33 15 12				Tegning nr. 7208/ B013

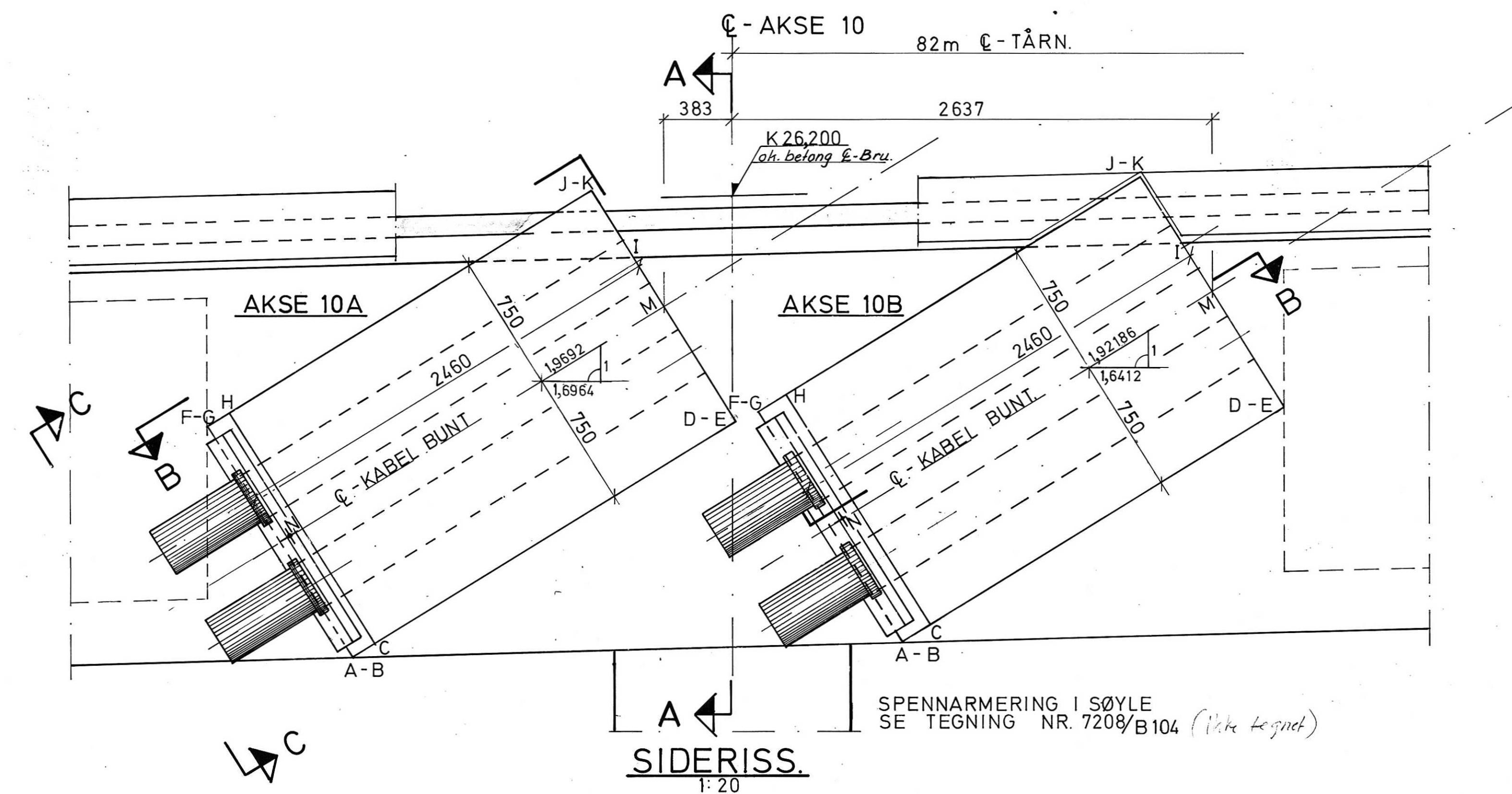


ANMERKNINGER:
 Preliminære internordiske lastbestemmelser av 4. mai 1971
 Mål i m
 Kote 0,00 - Stavanger kommunes 0-pkt.

C	Flyttet pilar nr. 24 og 25 3m	12.8.76	G.J.	G.J.
B	Flyttet pilar nr. 22 og 24	19.5.76	G.J.	G.J.
A	Ny tegning	9.4.75	G.J.	G.J.
Nr.	Forandring	Dato	Sign.	Kontr.

STRÖMSTEINBRUA
STAVANGER
 Dato 1.9.1974
 Tegner G.J.
 Kontr.

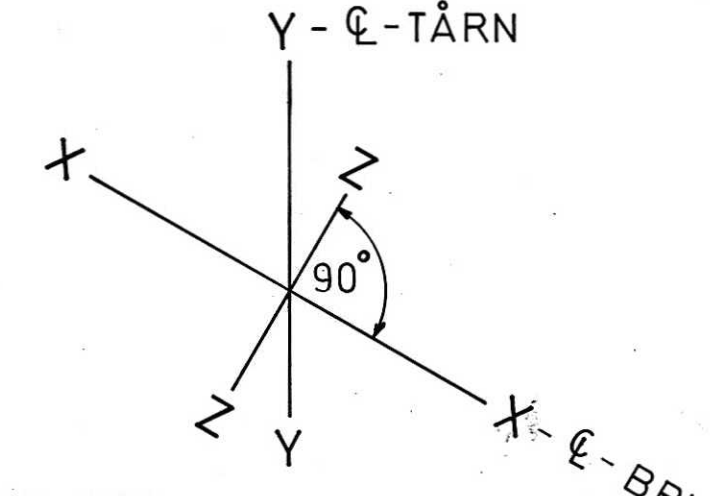
OVERSIKT
 Målestokk 1:1000
 Tegning nr. 7208/1c
 Professor dr. Arne Selberg
 NTH Trondheim
 Sivilingeniør Johs. Holt
 Kr. Augustsg. 6, Oslo 1, Tlf. 33 39 26 - 33 15 52



AKSE 10A

Koordinater			
PKT	Z	X	Y
A	5,25	-84,121	23,661
B	8,052	-84,121	23,661
C	10,070	-84,000	23,733
D	5,25	-82,002	24,911
E	9,908	-82,002	24,911
F	5,25	-84,883	24,953
G	8,052	-84,883	24,953
H	10,070	-84,762	25,025
I	5,25	X	X
J	7,710	-82,764	26,203
K	9,908	-82,764	26,203

M	8,907	-82,383	25,557
N	9,074	-84,440	24,344

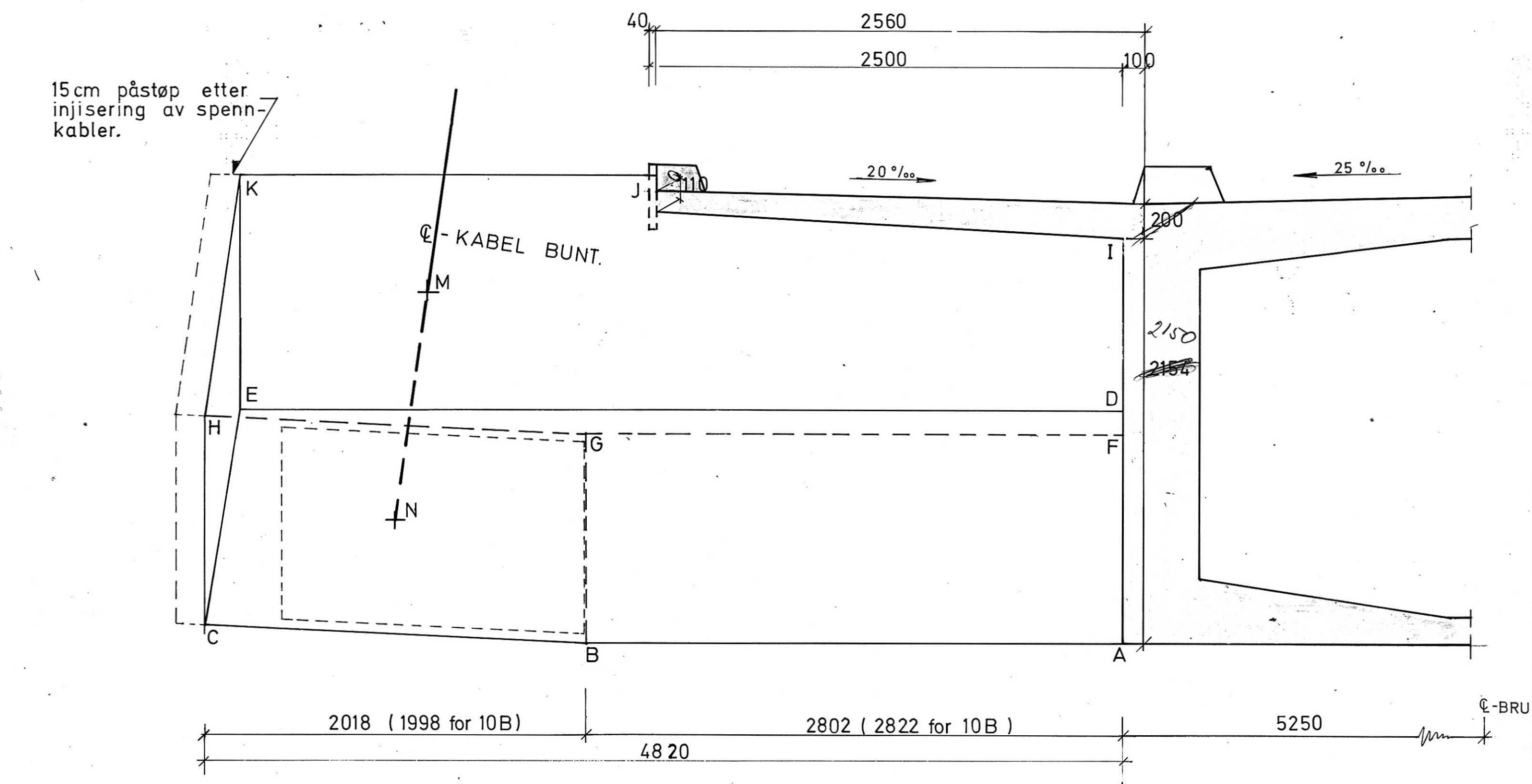


AKSE 10B

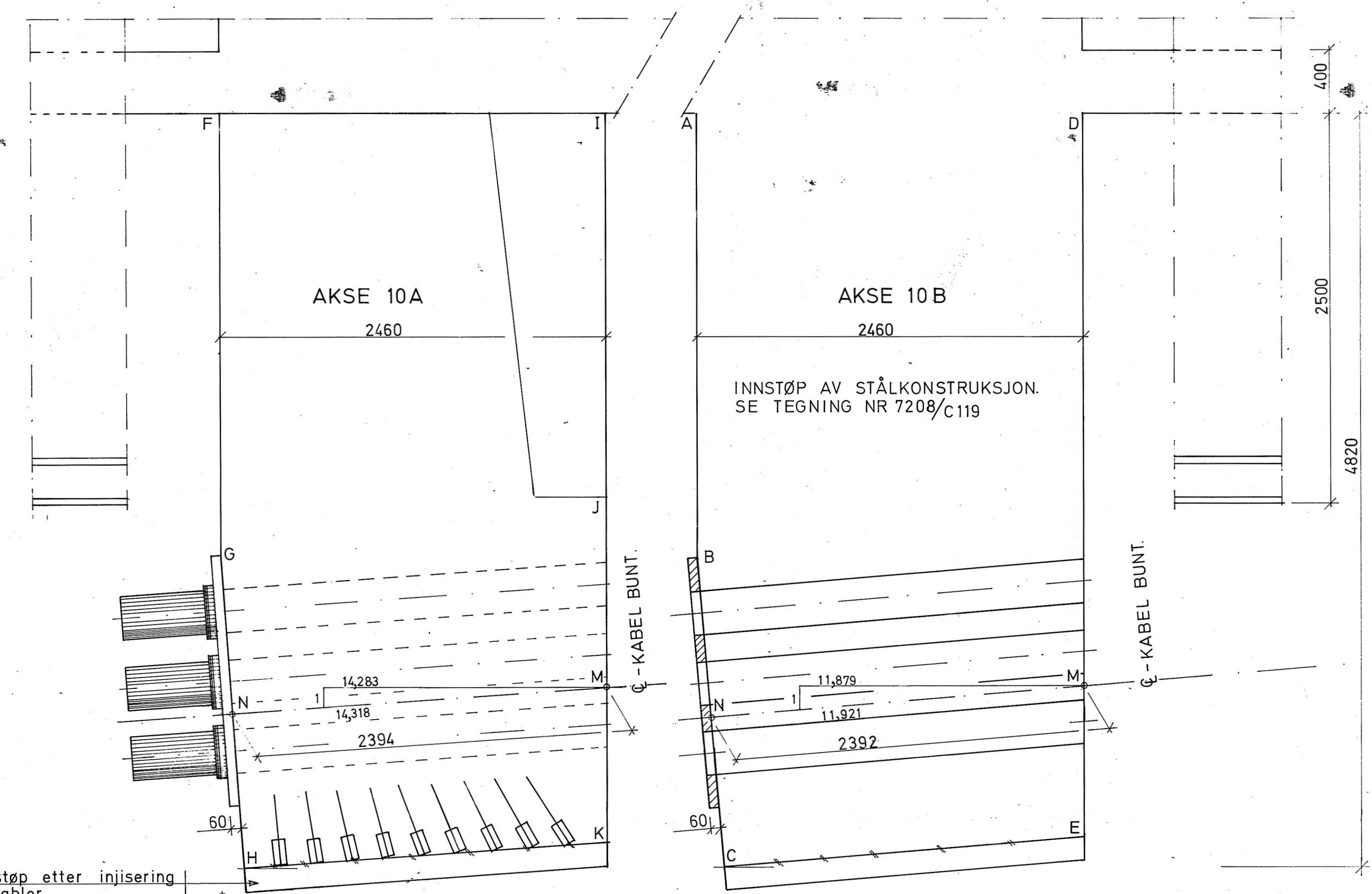
Koordinater			
PKT	Z	X	Y
A	5,25	-81,073	23,743
B	8,072	-81,073	23,743
C	10,070	-80,930	23,830
D	5,25	-78,973	25,023
E	9,877	-78,973	25,023
F	5,25	-81,853	25,023
G	8,072	-81,853	25,023
H	10,070	-81,710	25,110
I	5,25	X	X
J	7,710	-79,753	26,303
K	9,877	-79,753	26,303

M	8,893	-79,363	25,663
N	9,093	-81,390	24,428

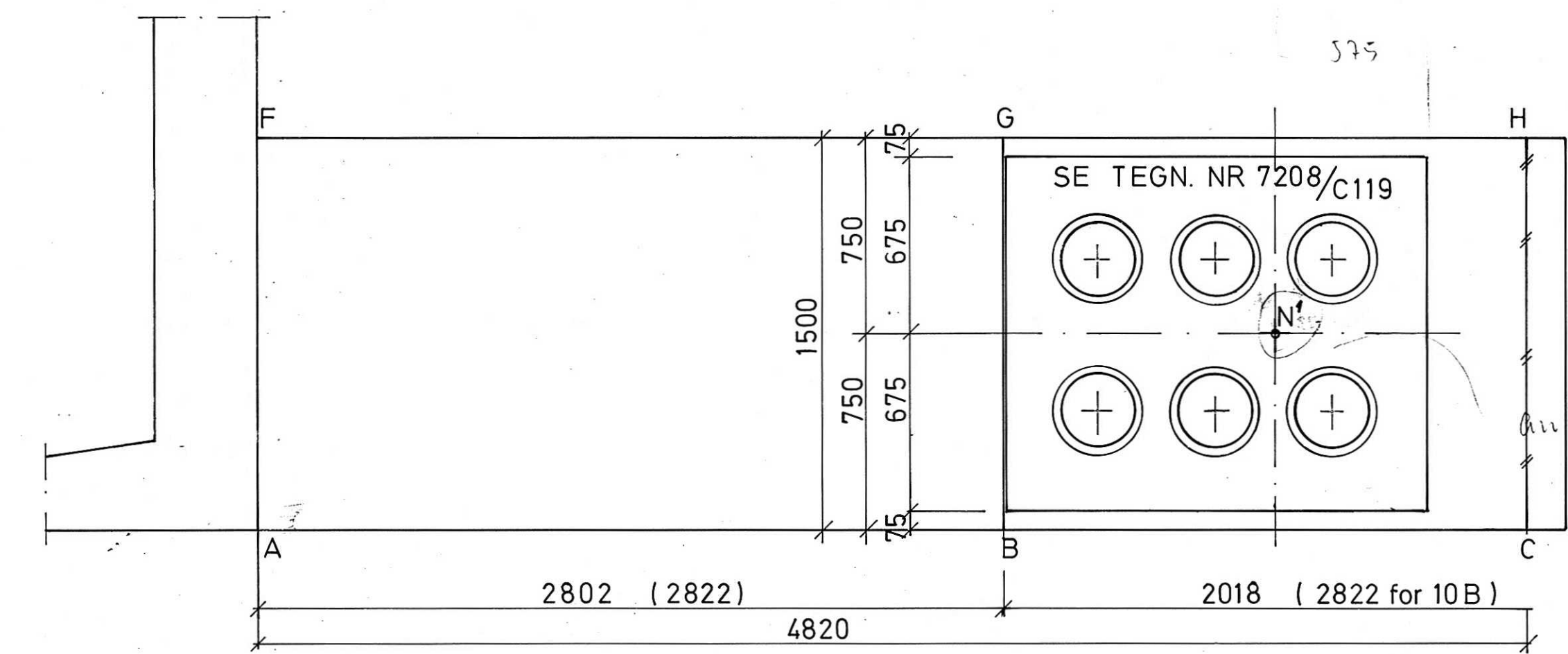
Y - Koordinater = kotehøyder.



SNITT A-A
1:20



SNITT B-B
1:20



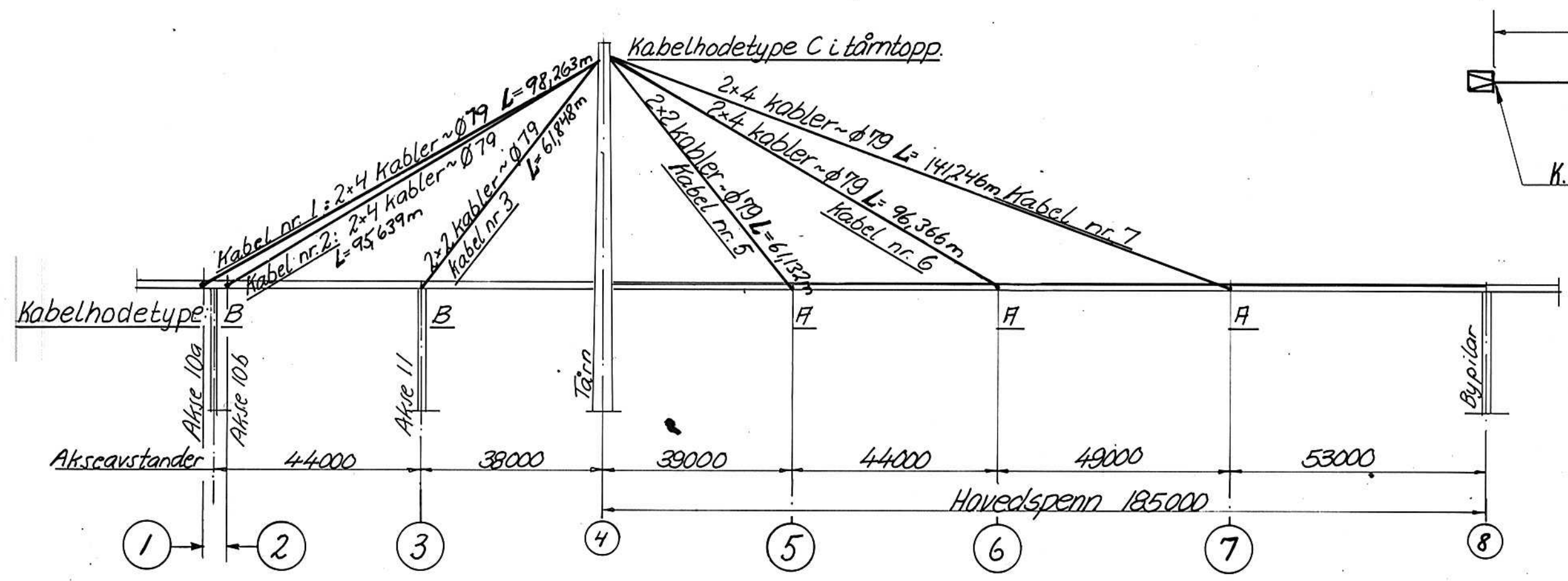
SNITT C-C
1:20

- ANMERKNINGER:**
- Betong : C 45
 - Mål i mm : D100 : 38 mm
 - Kotehøyder i m. : Armering : Ks 40 og Ks 40S
 - Kote 0,00 = Stavanger kommunes 0-pkt.
 - Overdekning : 3 cm
 - Kontrollklasse: Utvidet kontroll etter NS 3474

HENVISNINGER:
7208/C119
7208/B105

15cm påstøp etter injisering av spennkabler. SE TEGN. NR 7208/B105 SPENNARMERING.

Nr.	Forandring	Dato	Sign.	Kontr.
STRØMSTEINBRUA STAVANGER FORMTEGNING FORANKRINGSBJELKER, AKSE 10				Dato: 25.2.1976 Tegn. <i>J. Hansen</i> Kontr.
Professor dr. Arne Selberg NTH Trondheim Sivilingeniør Johs. Holt Kr. Auguststgt. 6, Oslo 1. Tlf. 33 39 26 - 33 15 12				Målestokk 1:20 Tegning nr. 7208/B014



L = Kabellengde mellom kabelhoder målt under 50 tonns strekk i hver kabel
 0g +5°C. (korrigeres ved andre måletemperaturer)

Monteringsinstruks, kfr tegn. 7208/8.303F
 Kabler nr 1 går fra akse 10a til lagerdel 3
 " " 2 " " " 10b til " 2
 " " 3 " " " 11 til " 1
 " " 5 " til lagerdel 1
 " " 6 " " " 2
 " " 7 " " " 3

Kablene monteres i de 2 indre spor (nærmest E bru)

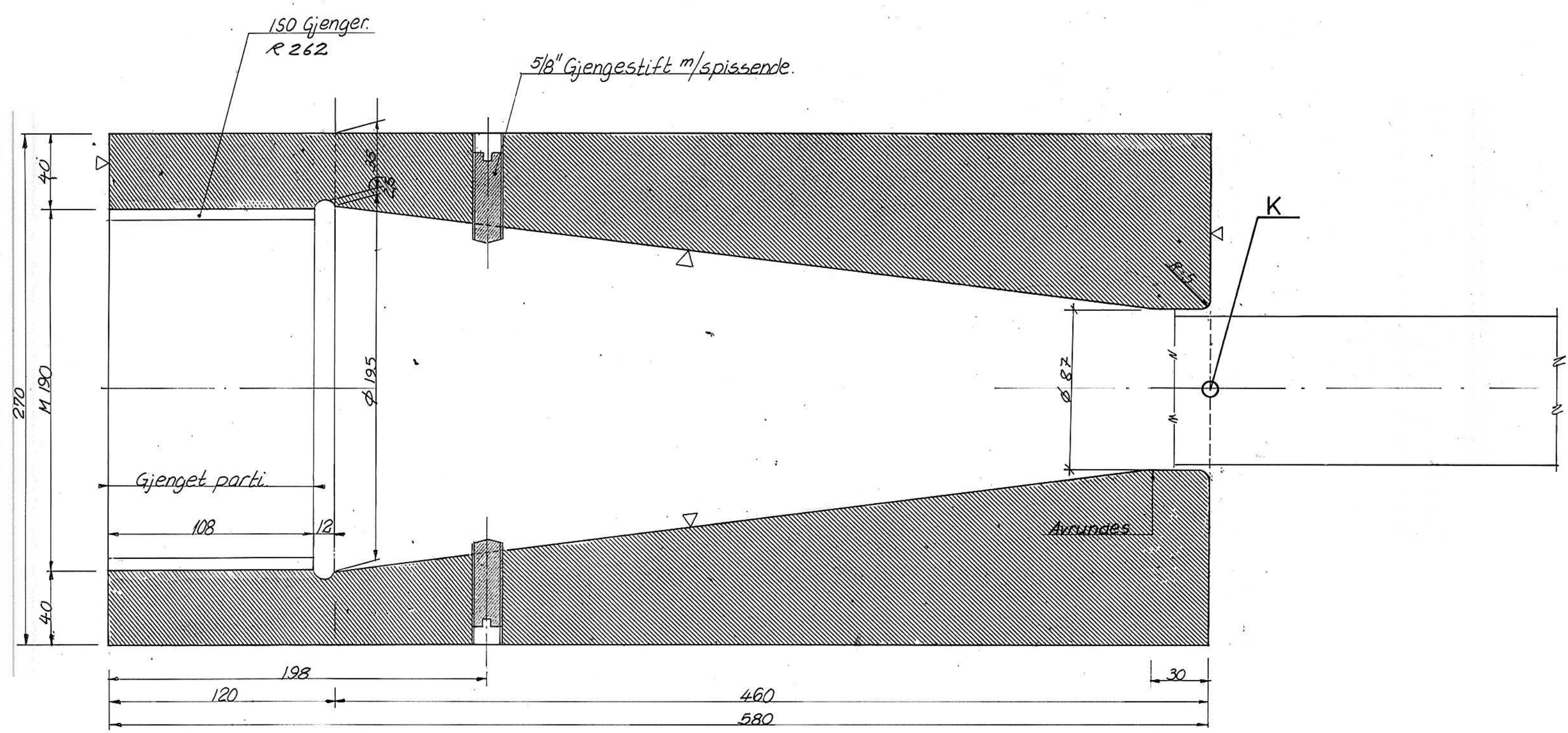
Kabelskjema

Kabel nr.	Antall	Kabellengde L i mm
1	8	98.263
2	8	95.639
3	4	61.848
5	4	61.848
6	8	96.366
7	8	141.246
Sum	40	

Ca. kabelvekter

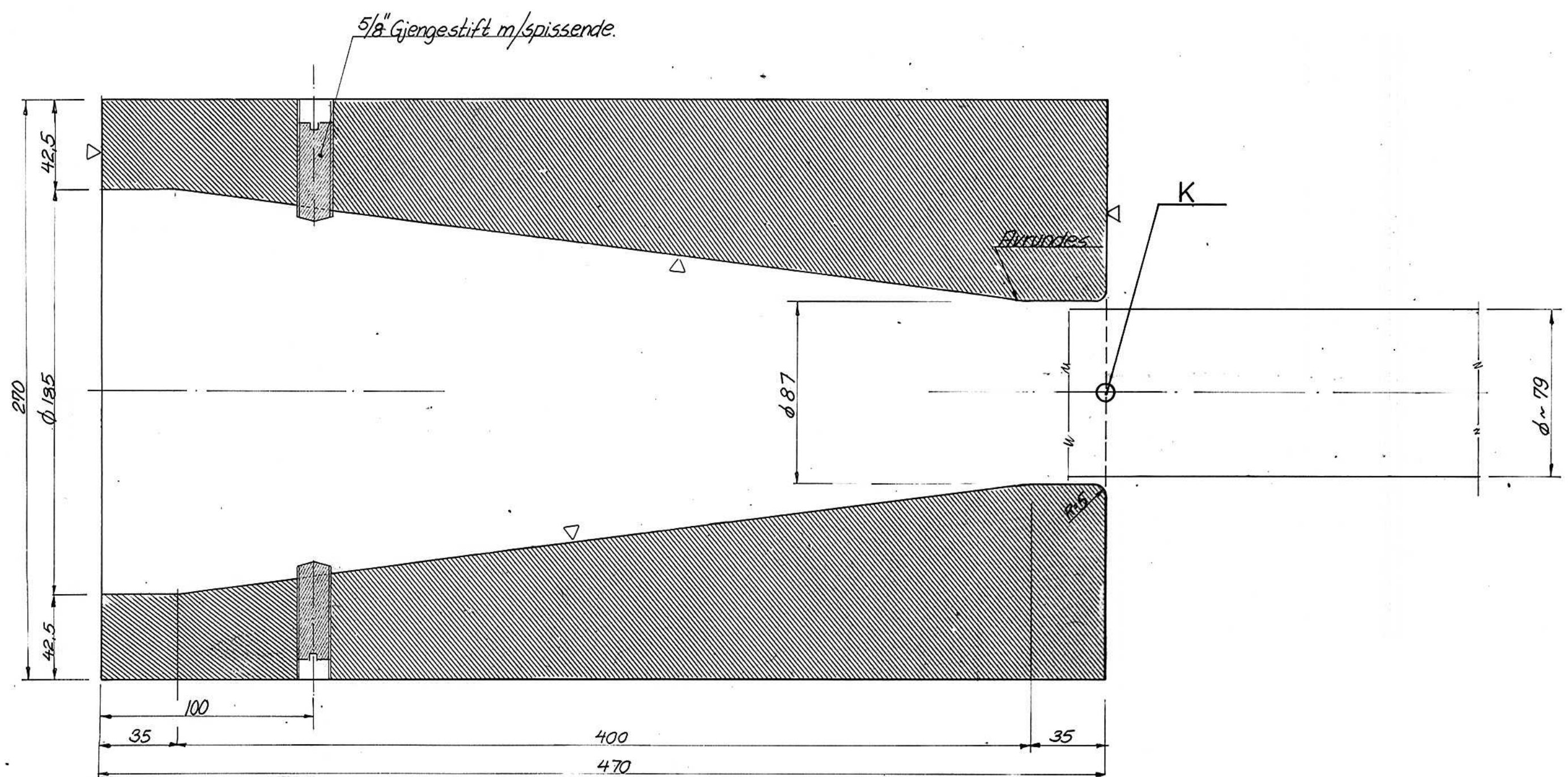
Kabel nr.	ca	inkl. hoder
1	4,0 t	" "
2	4,0 t	" "
3	2,7 t	" "
5	2,7 t	" "
6	4,0 t	" "
7	5,6 t	" "

OVERSIKT.
1:1000.



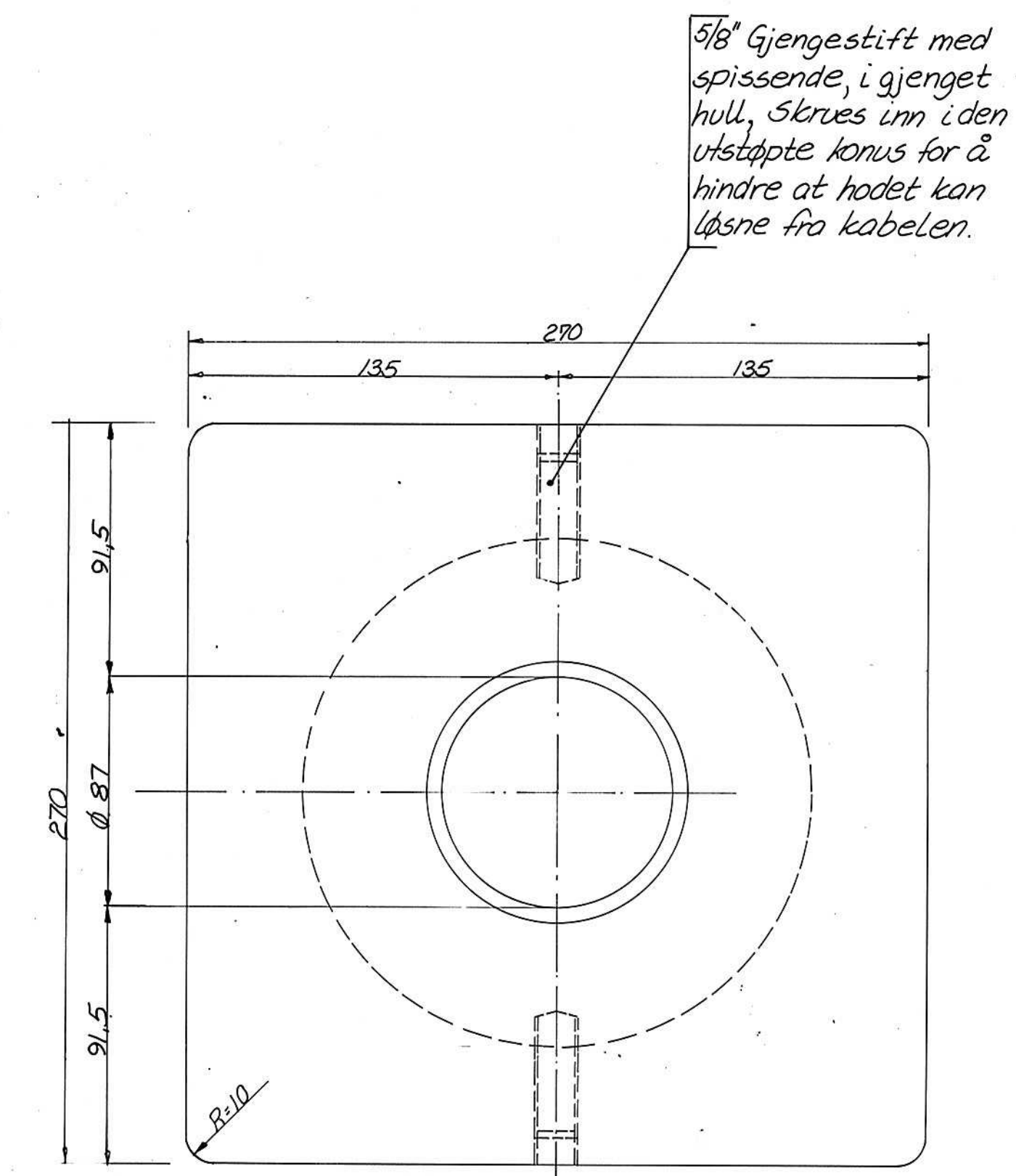
KABELHODE TYPE A og B.

1:2



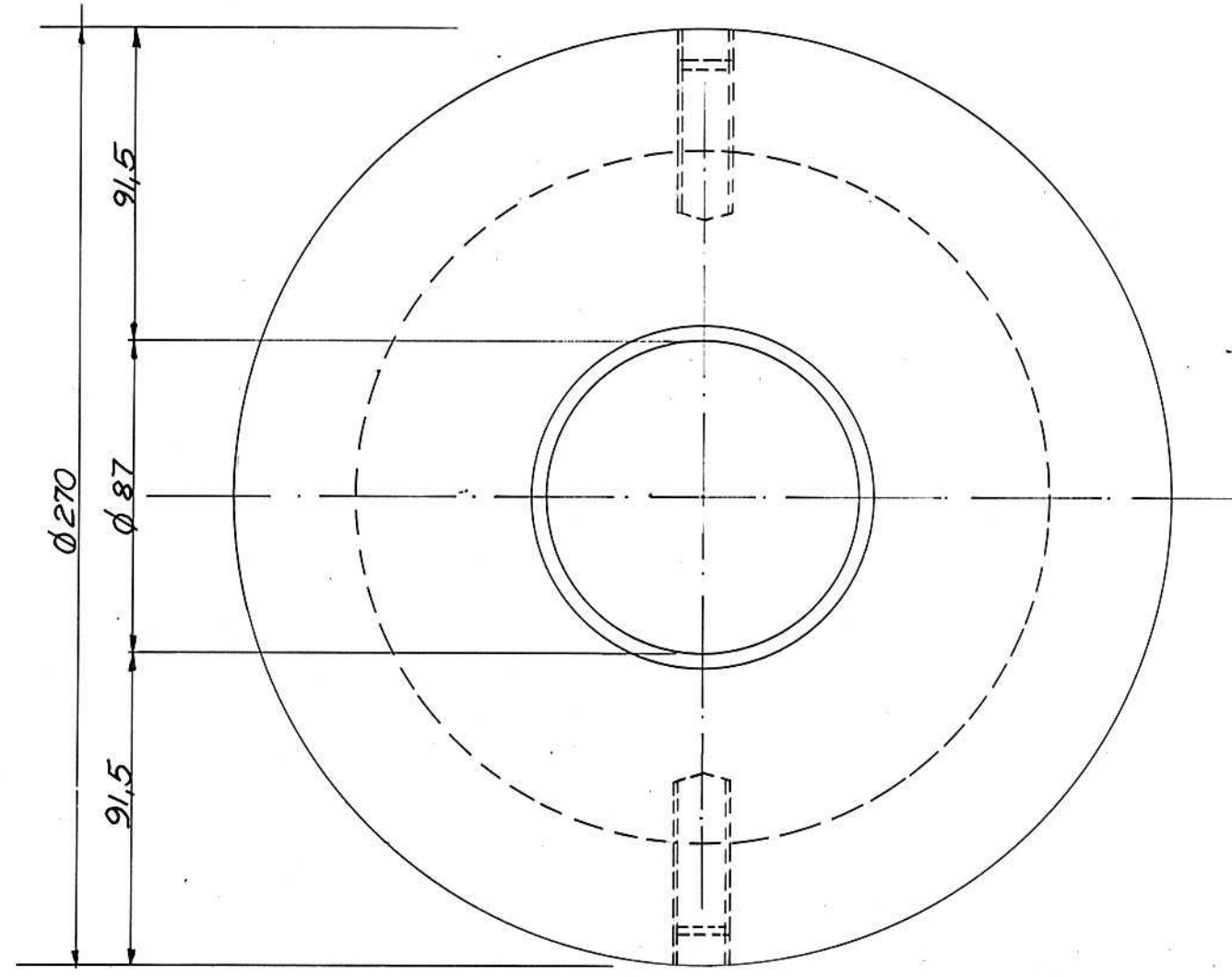
KABELHODE TYPE C.

1:2



KABELHODE TYPE A og C.

1:2



KABELHODE TYPE B.

1:2

ANMERKNINGER:

Kabelhode, støpestål GS-52-3 DIN1681
 Kabeltverrsnitt 4272mm² ~ d 79mm.
 Montasjespindel må sikres mot å skru seg ut under bruk.

HENVISNINGER:

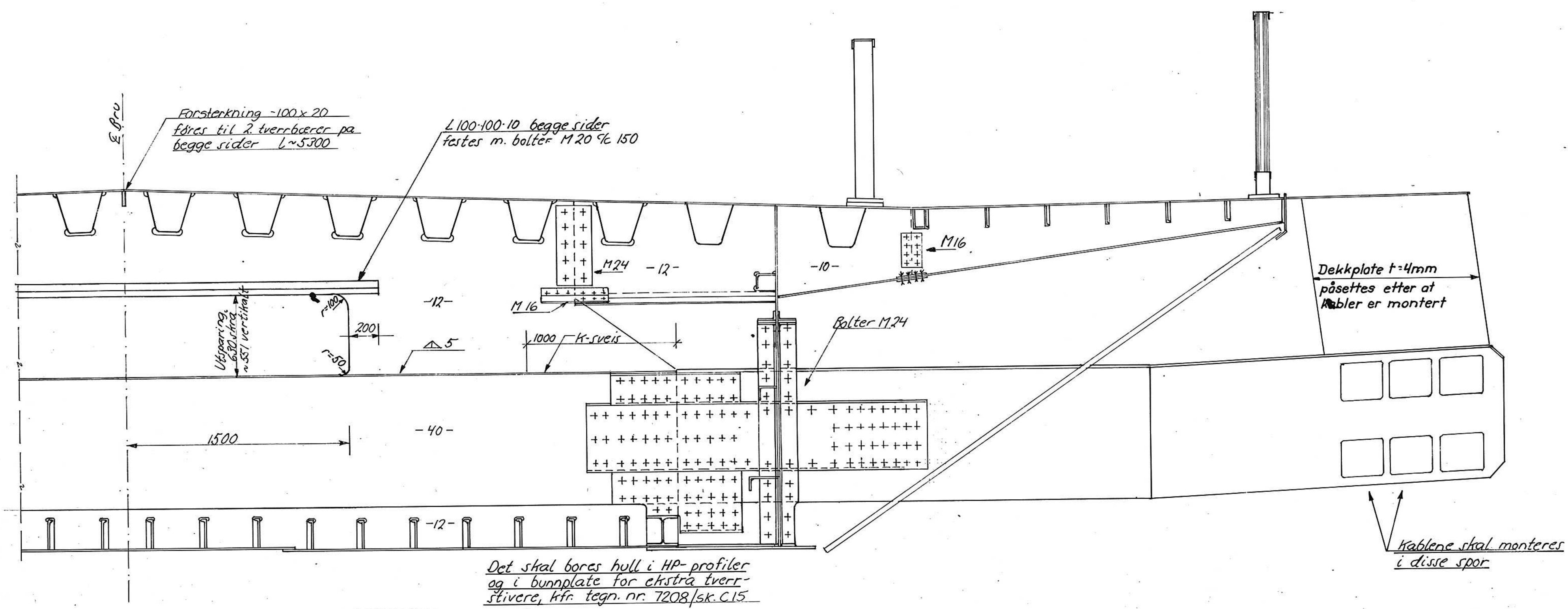
E	Monteringsinstruks og kabelvekter	7.3.77	JH	
D	Kabellengder	15.9.76	JH	kontr. J.H.
C	Kabelnummerering, kabelskjema	30.8.76	JH	
B	Generell målrevisjon	29.12.75	W.F.	
A	Tegnet ny tegning	13.9.75	A. Skov	
Nr.	Forandring	Dato	Sign.	Kontr.

STRØMSTEINBRUA
STAVANGER

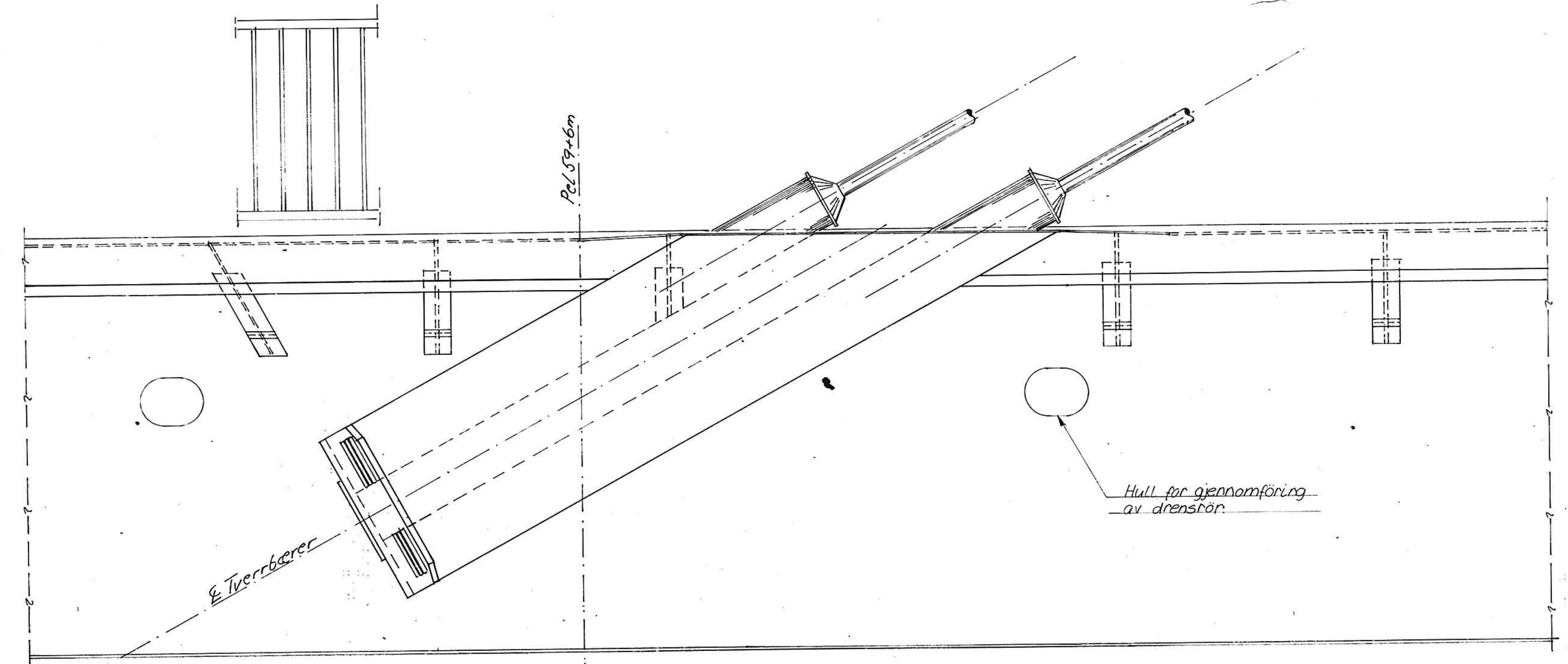
KABEL OG KABELHODE. Målestokk 1:2 1:1000

Professor dr. Arne Selberg
 NTH Trondheim
 Sivilingeniør Johs. Holt
 Kr. Augustsgt. 6, Oslo 1. Tlf. 33 39 26 - 33 15 12

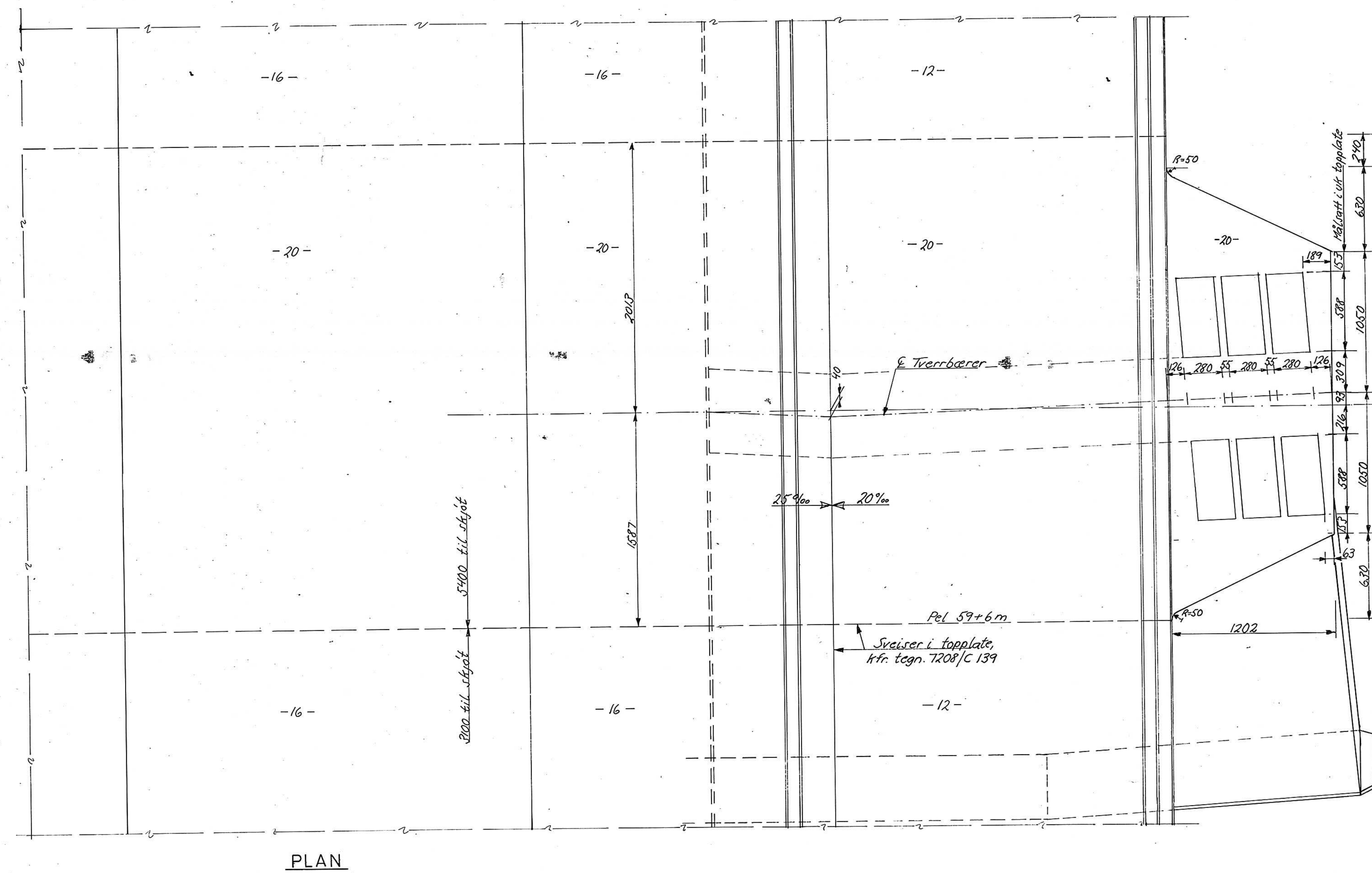
Tegning nr. 7208/ C104 E



TVERRSNITT



SIDERISS



PLAN

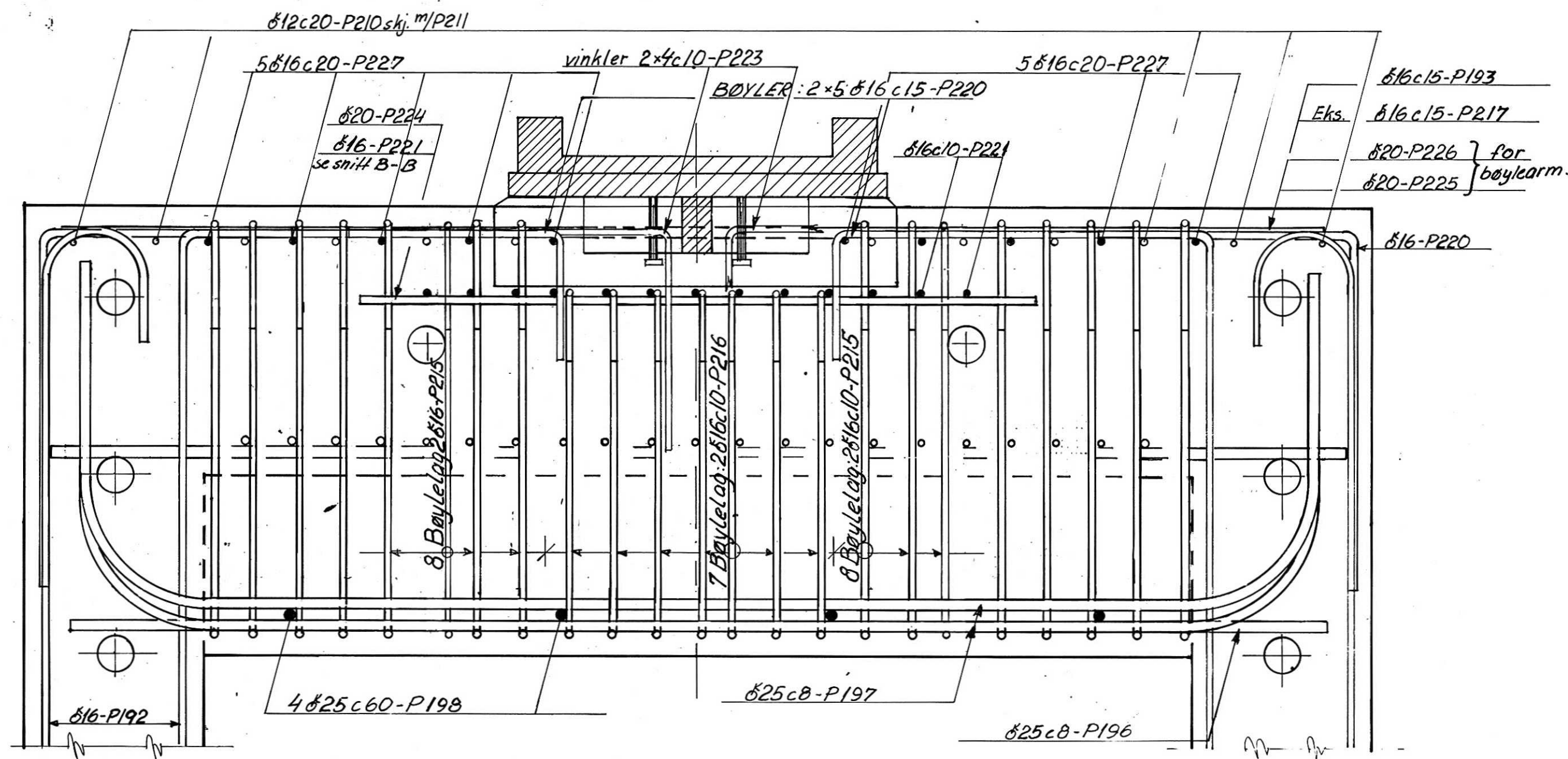
ANMERKNINGER:

HENVISNINGER:

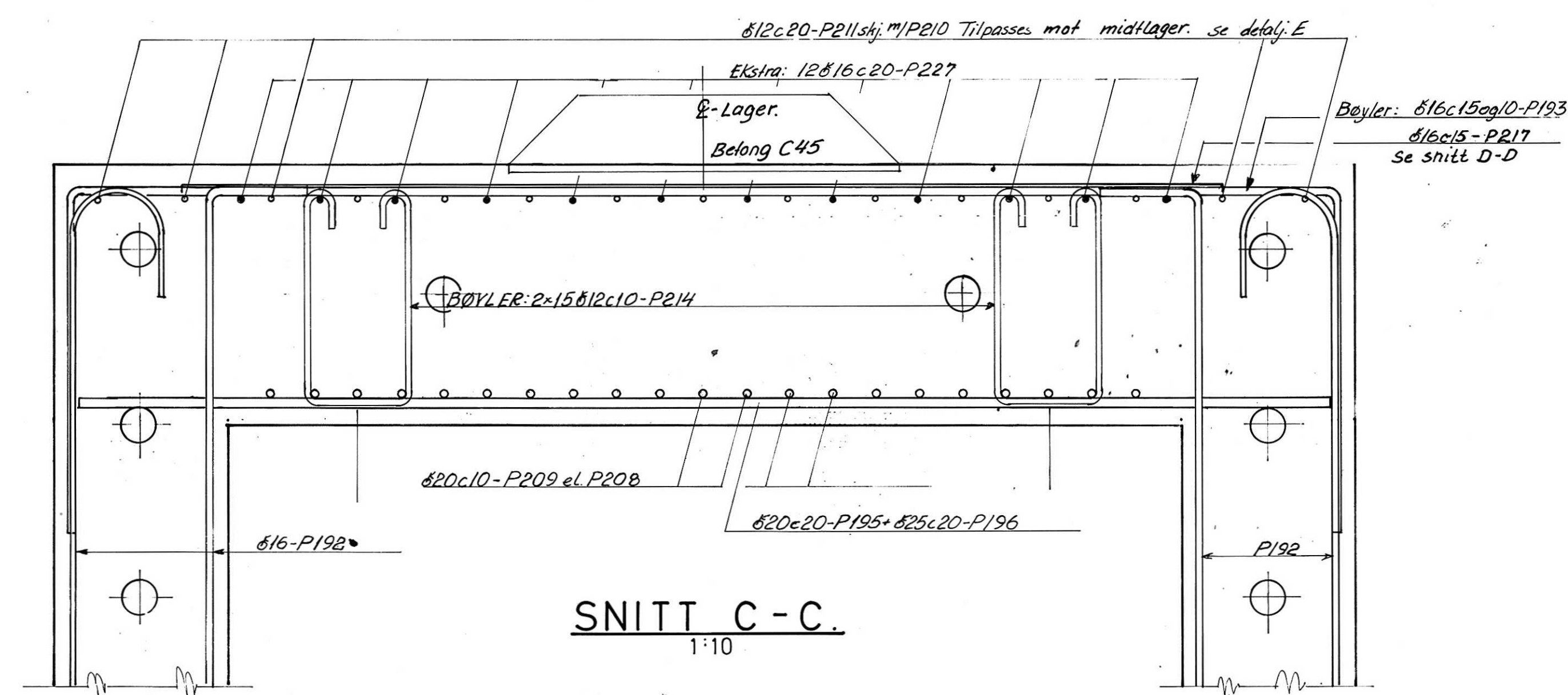
Detaljer tverrbærer: Tegn.nr. 7208/C.113, 126, 128, 129 og 130
 Vannavløp for hovedspenn 7208/C.117
 Vannavløp for hovedspenn oversikt C.143

Nr.	Forandring	Dato	Sign.	Kontr.
D	Ajourført	3.1.78	R.B.	
C	Div. justeringer og tilføyelser	3.11.76	WF	F.H.A.
B	Tegnet ny tegn.	6.8.76	FH	
A	Div. justeringer	9.1.76	WF	

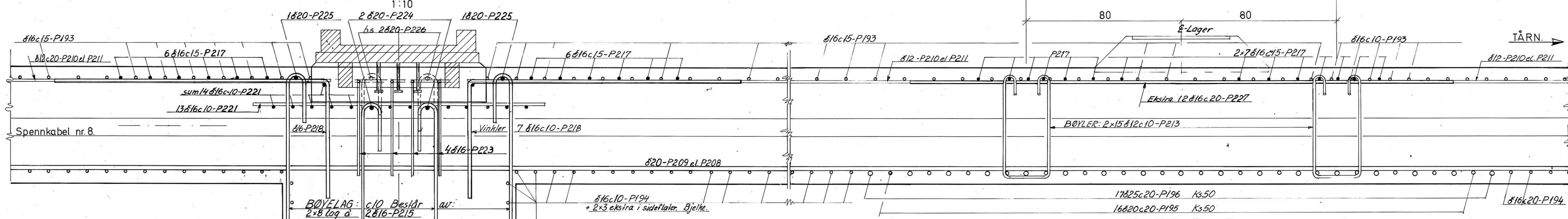
STRØMSTEINBRUA		Dato	4.12.75
STAVANGER		Tegn.	L.S.
IVERRBÆRER V/ PEL 59+6m		Kontr.	F.H.A.
OVERSIKT		Målestokk	1:20
Professor dr. Arne Selberg NTH Trondheim		Tegning nr.	7208/C.115
Sivilingeniør Johs. Holt Kr. Augustsgt. 6, Oslo 1. Tlf. 33 39 26 - 33 15 12			



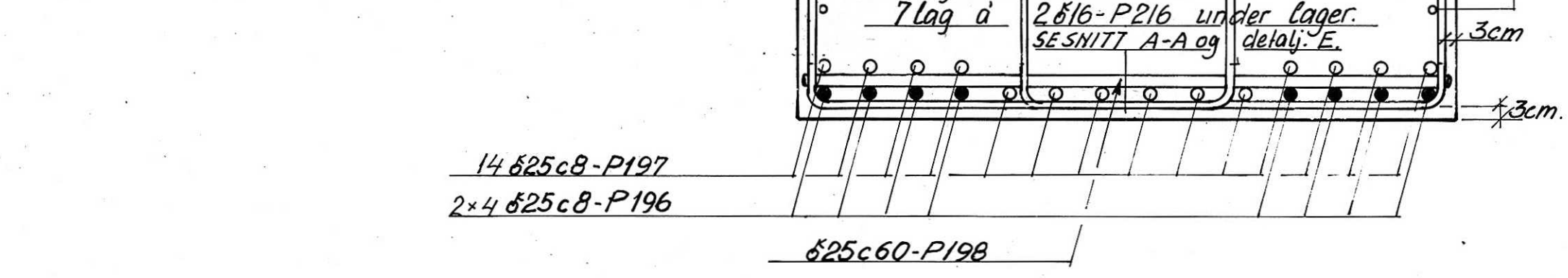
SNITT A-A
1:10



SNITT C-C
1:10

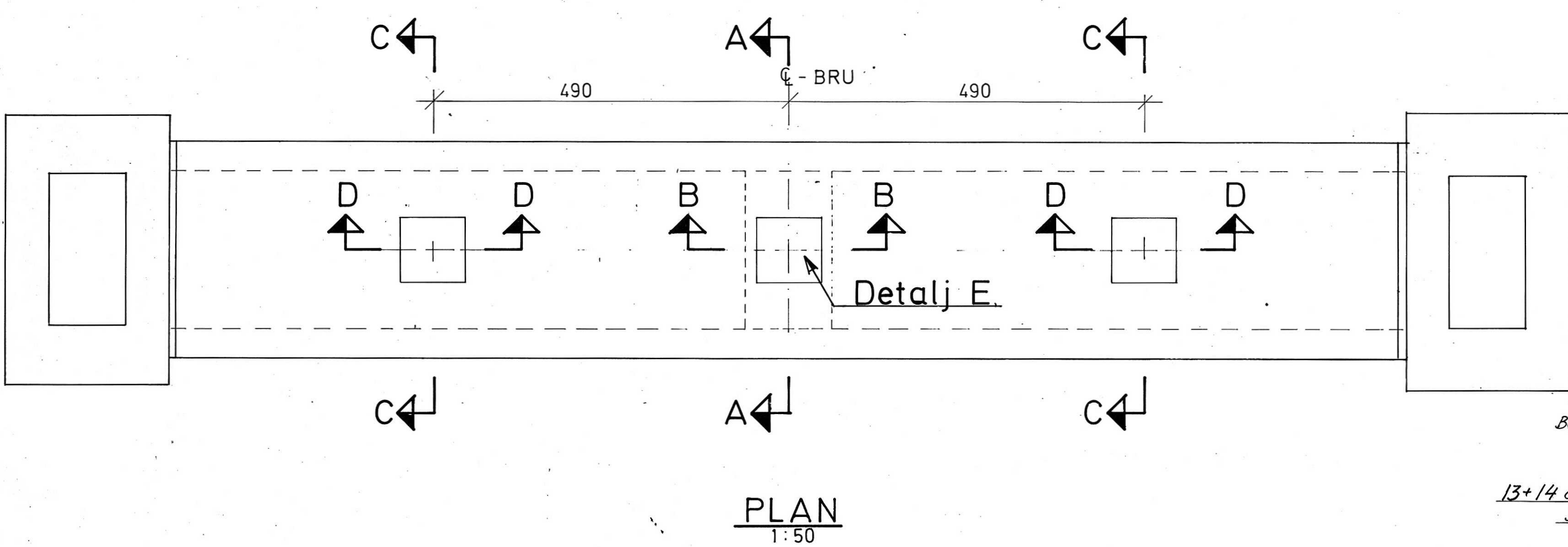


SNITT D-D
1:10

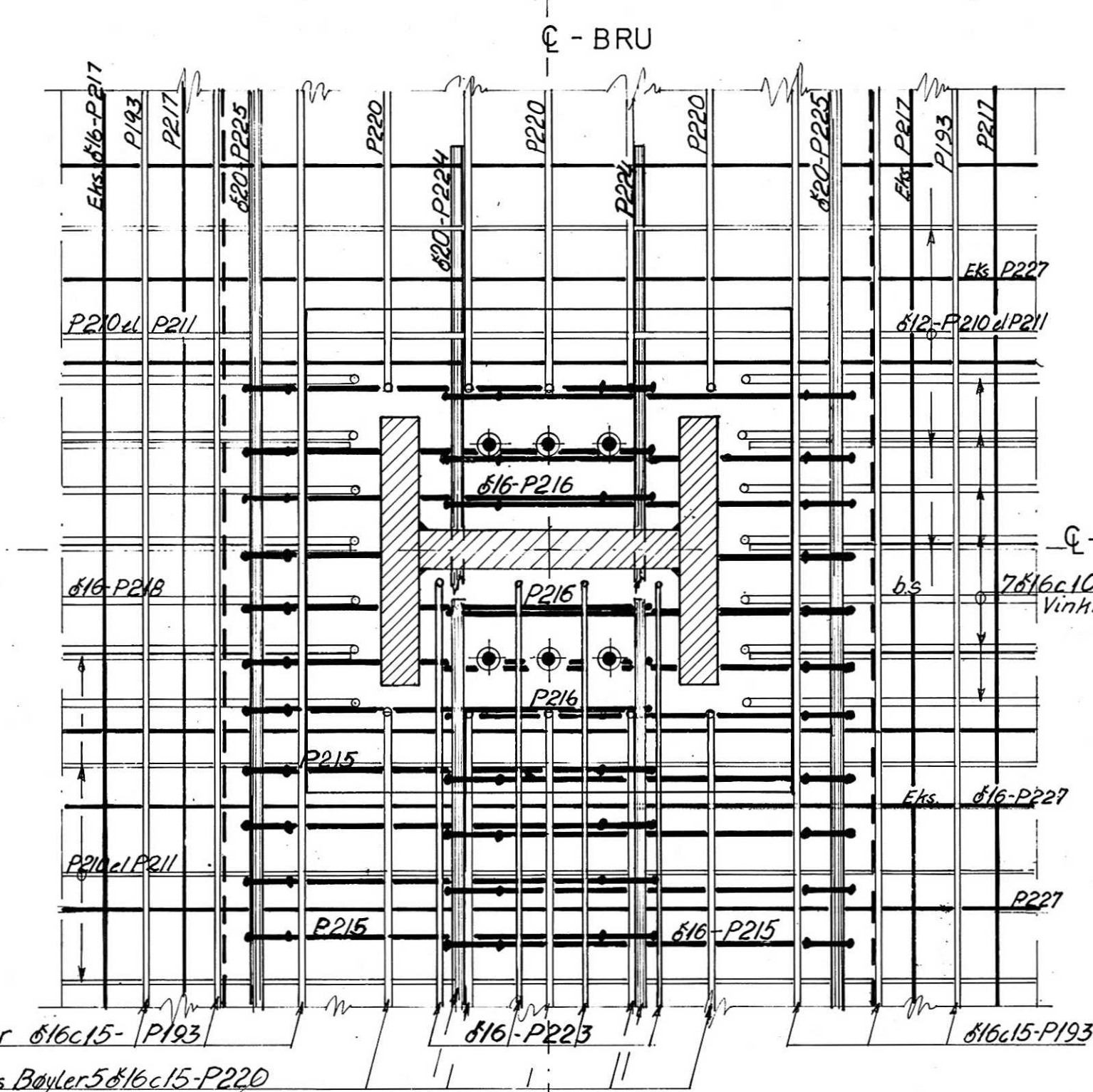


SNITT B-B
1:10

ANMERKNINGER:
Betong lager C45.



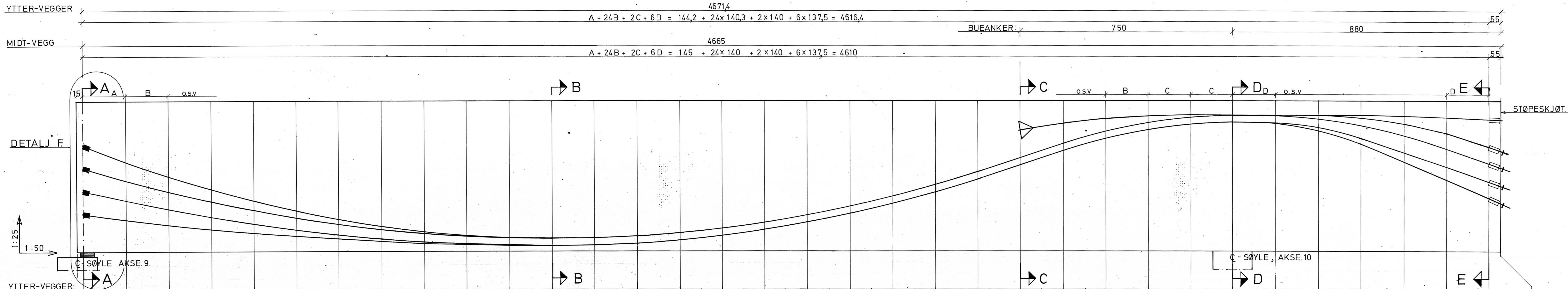
PLAN
1:50



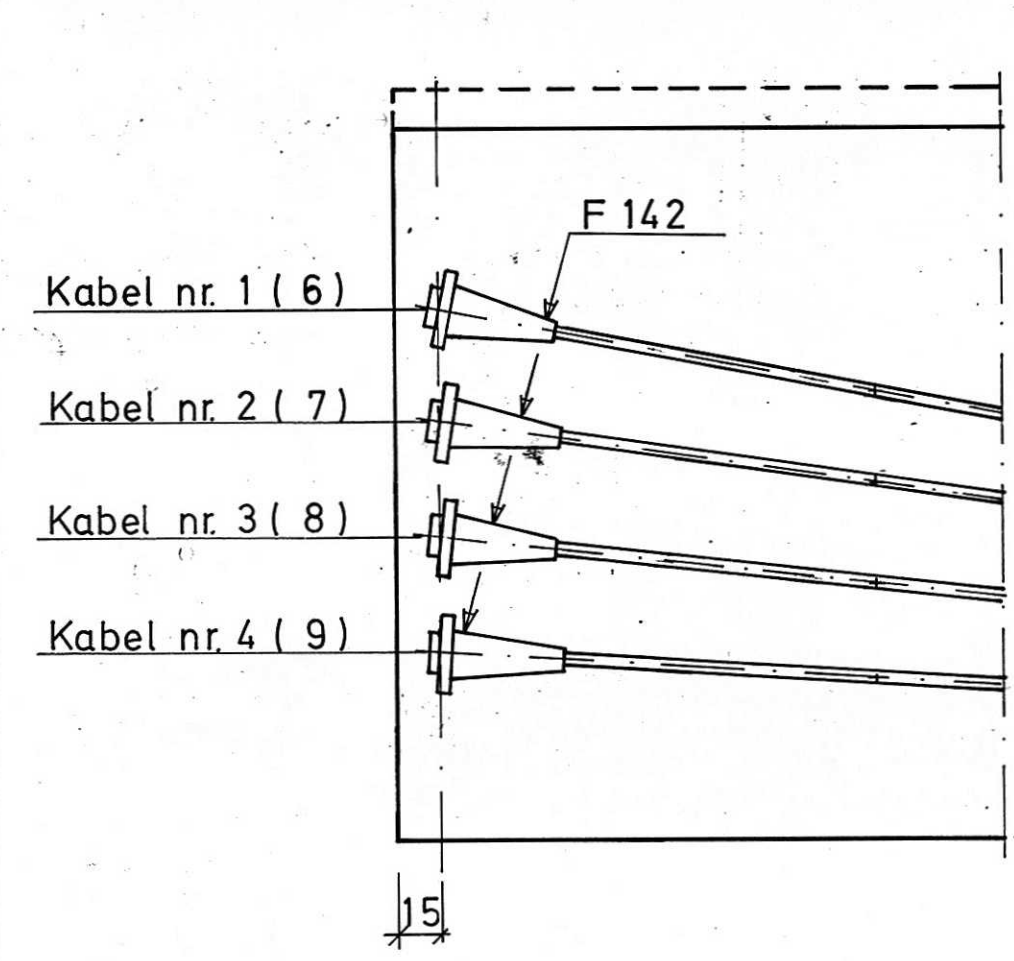
DETALJ E
1:10

HENVISNINGER: Som tegn nr. 7208/B 252

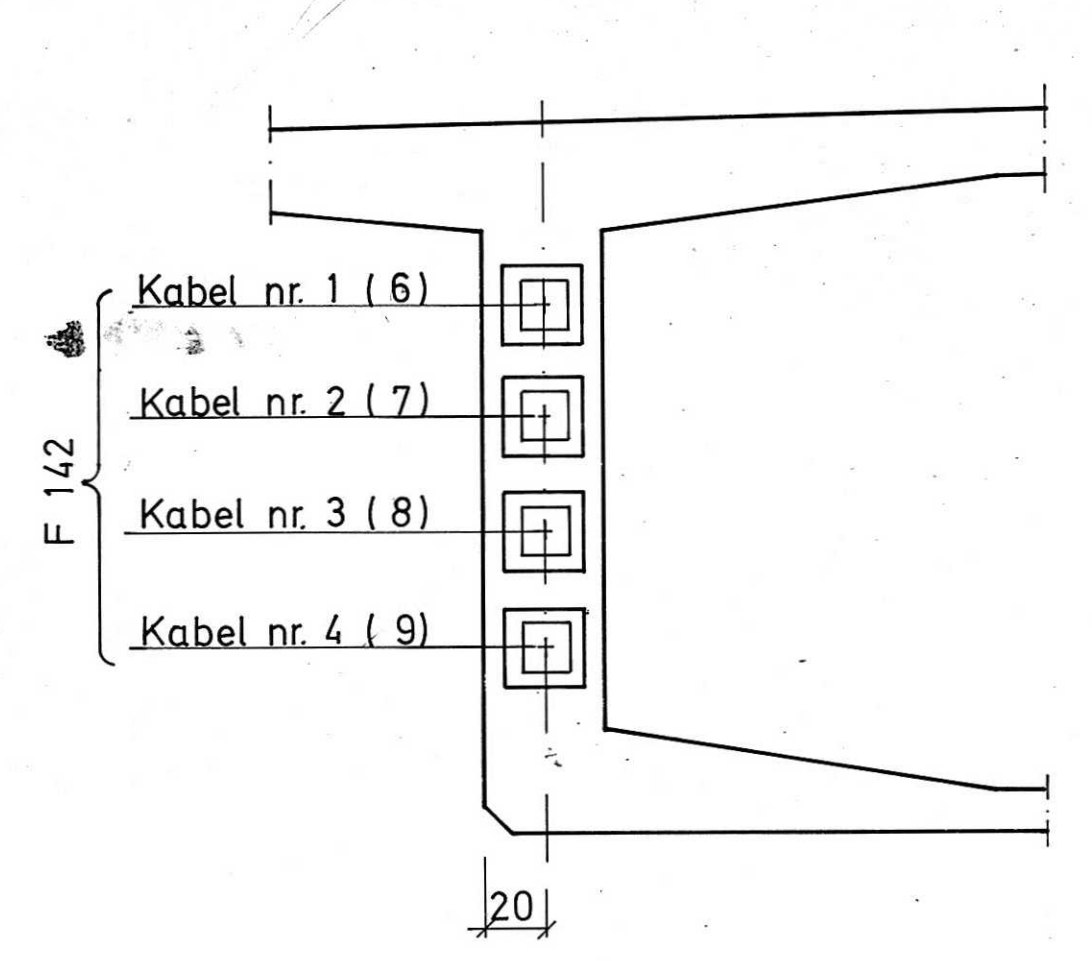
Nr.	Forandring	Dato	Sign.	Kontr.
STRØMSTEINBRUA STAVANGER				
RIGEL. DETALJER. Arm. ved lager.				Målestokk 1:10, 1:50
Professor dr. Arne Selberg NTH Trondheim				Tegning nr. 7208
Sivilingeniør Johs. Holt Kr. Augustsgt. 6, Oslo 1. Tlf. 33 39 26 - 33 15 12				B 255



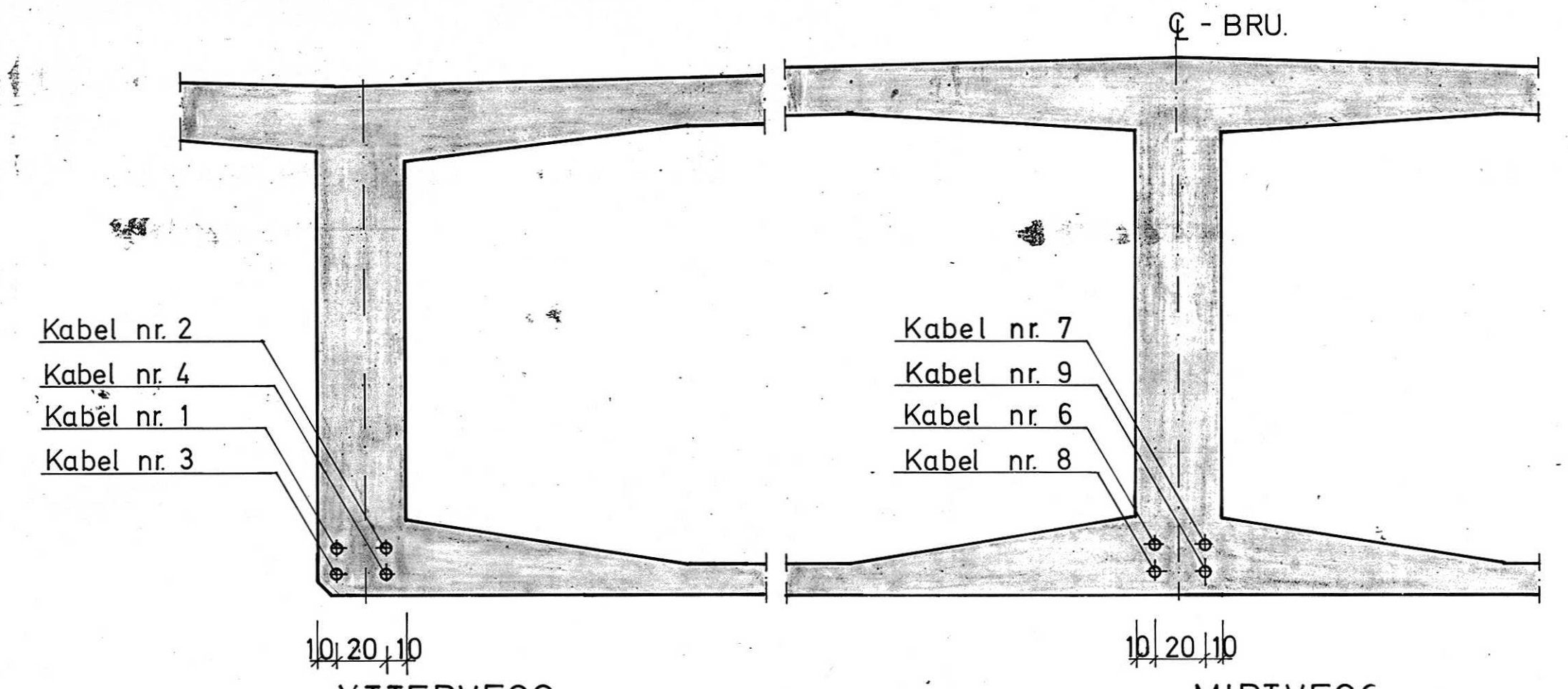
KABEL nr.1	176	148	124	103	83	67	53	41	32	26	22	21	22	25	31	39	49	61	75	92	110	131	154	179	199	213	223	226	226	225	220	211	197	174	165		
— " 2	138	117	99	83	68	56	45	36	30	25	22	21	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	225	218	208	191	169	146	137			
— " 3	100	84	70	57	46	36	28	21	16	12	10	9	10	13	19	27	37	49	63	80	98	119	142	167	187	201	211	217	213	206	186	163	140	116	107		
— " 4	62	53	44	37	30	25	20	16	13	11	9	9	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	212	200	175	147	118	90	79			
KABEL nr.5																								200	211	219	224	226	226	226	226	225	223	220	217	216	
MIDT-VEGG:																																					
KABEL nr.6	188	158	132	109	88	70	55	43	33	26	22	21	22	26	31	40	50	63	78	96	115	138	162	188	210	225	234	237	237	236	234	223	208	183	173		
— " 7	146	124	104	87	71	58	47	37	30	25	22	21	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	235	231	221	202	178	154	144		
— " 8	104	87	72	59	47	37	29	21	16	12	10	9	10	14	19	28	38	51	66	84	103	126	150	176	198	213	222	225	225	220	206	181	154	126	115		
— " 9	62	53	44	37	30	25	20	16	13	11	9	9	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	223	215	192	161	130	99	87			
KABEL nr.10																								212	223	231	236	237	237	237	237	237	237	235	232	229	228



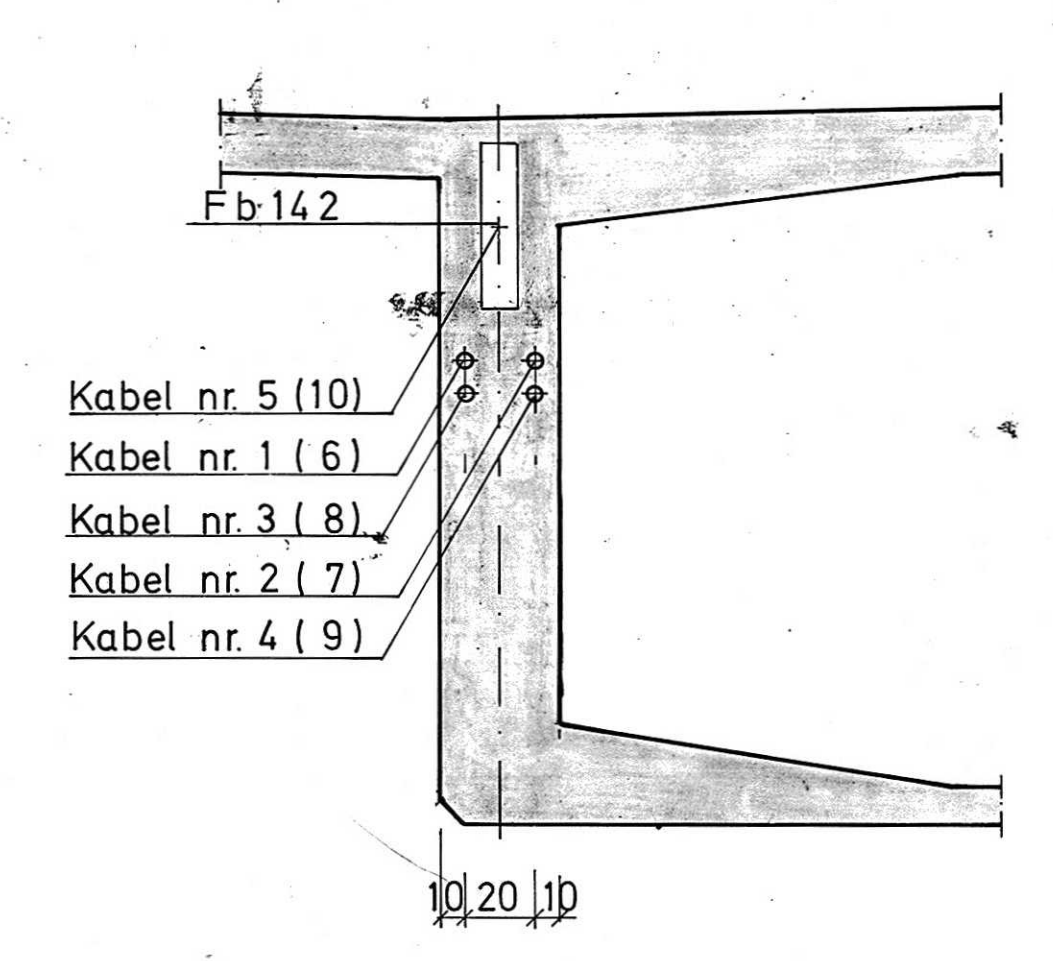
DETAILJ F
1:25



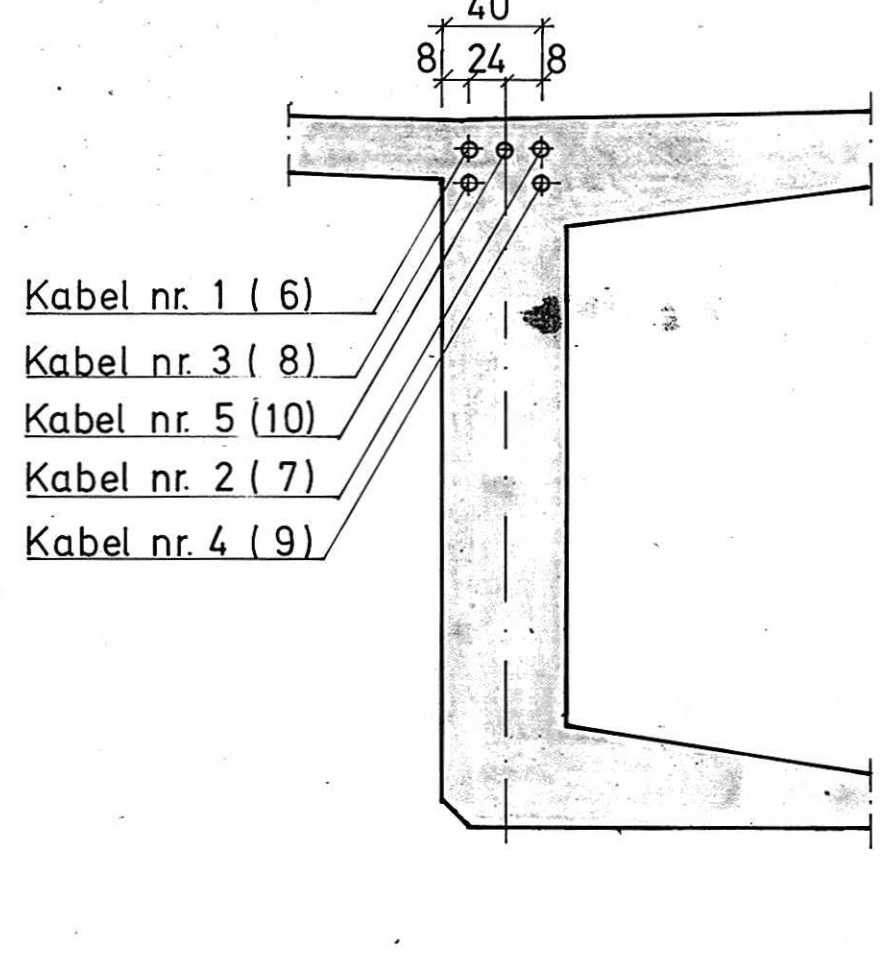
SNITT A - A
1:25



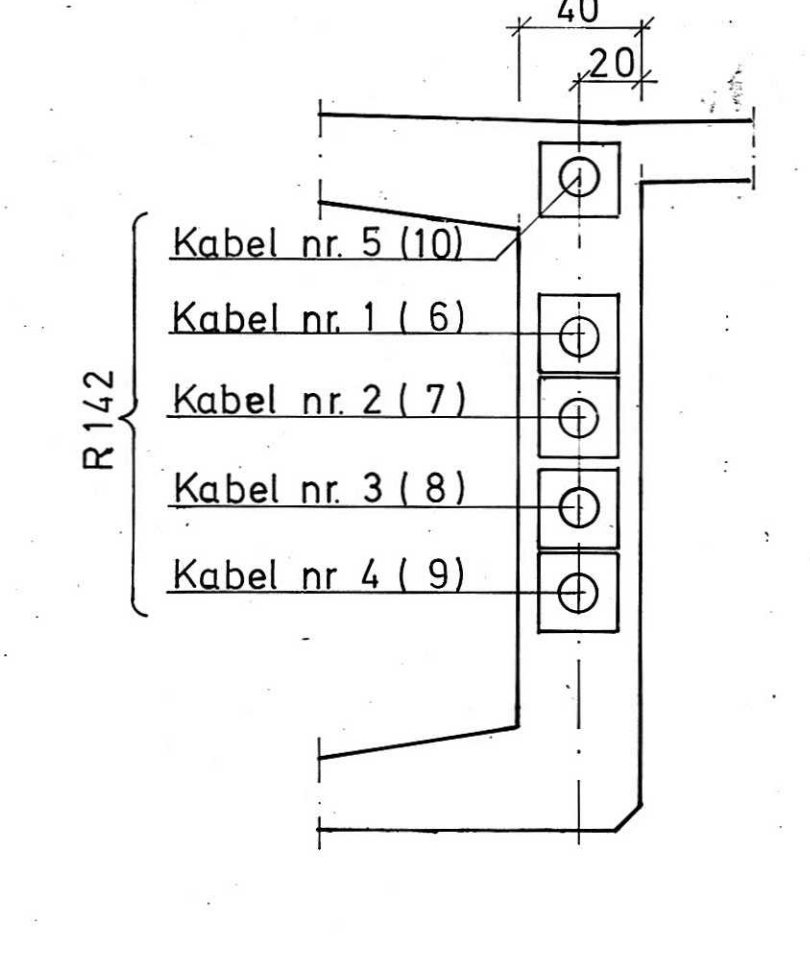
SNITT B - B
1:25



SNITT C - C
1:25



SNITT D - D
1:25

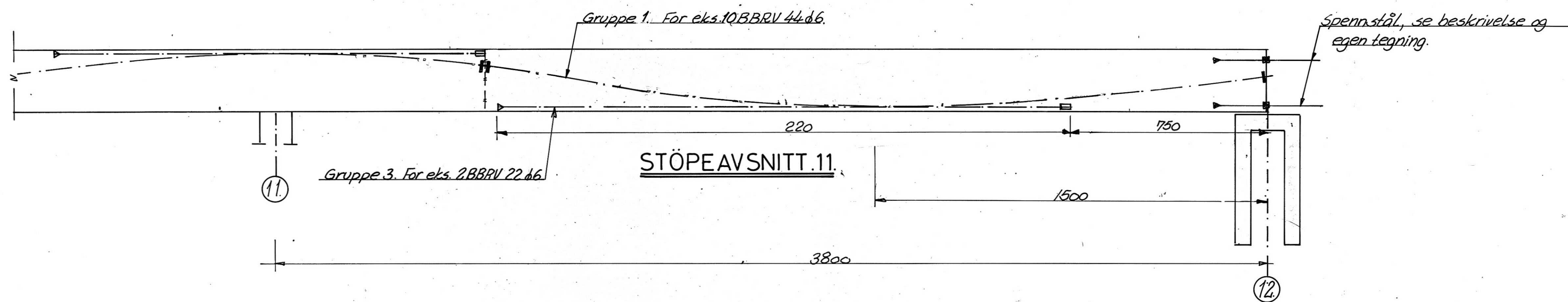
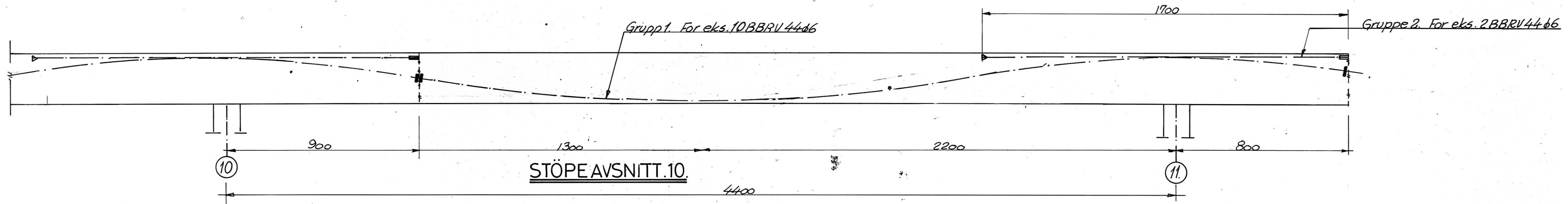
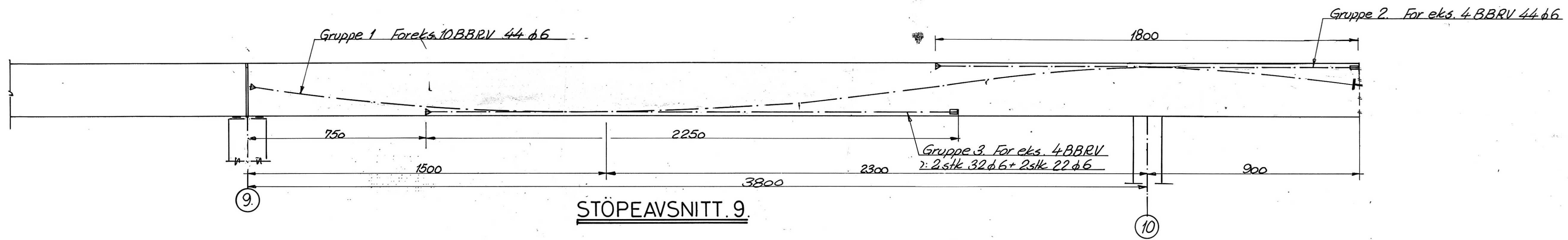


SNITT E - E
1:25

- KABEL TYPE.**
- FAST FORANKRING TYPE F 142
 - BEV. " " R 142
 - SKJÖTKOPLING " " SS 142
 - ▷ BUEANKER " " Fb 142

ANMERKNINGER:
 KONTROLLKLASSE: UTVIDET KONTROLL ETTER NS 3474
 Mål i cm.
 Kabelhöyder er regnet fra underkant bunnplate til senterlinje kabel.
 Tall i () gjelder kabel nr. i midtvegg.

Nr.	Forandring	Dato	Sign.	Kontr.
STRÖMSTEINBRUA STAVANGER				Dato 12.2.1976 Tegn. <i>F. Asen</i> Kontr. <i>F. Asen</i>
PLASSERING AV SPENNARMERING. STÖPEAVSNITT nr. 9				Målestokk 1:50, 1:25
Professor dr. Arne Selberg NTH Trondheim Sivilingeniør Johs. Holt Kr. Augustsgt. 6, Oslo 1, Tlf. 33 39 26 - 33 15 12				Tegning nr.: 7208/ B006



ANMERKNINGER:
Mål i cm

Betong
D₁₀₀
Slakkarmering: Ks40
Overdekning
Kontrollklasse: Utvidet kontroll etter NS 3474

HENVISNINGER:

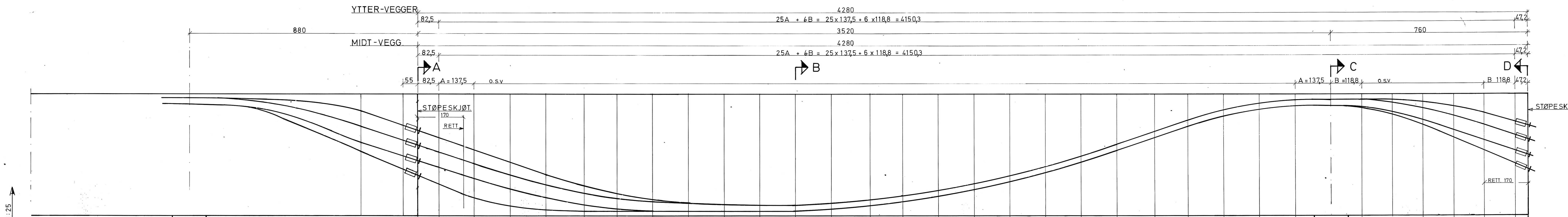
Støpe- etappe	d i rad.						Nødv. flytekræft (Mp)			Min. samlet sp. kræft etter låsing (Mp)		
	d1	d2	d3	L1	L2	L	Gr.1	Gr.2	Gr.3	Gr.1	Gr.2	Gr.3
	9							2000	800	480	1425	640
10							2000	400	-	1530	370	-
11							2000	-	200	1425	-	160

NB. Plasing av kabler se tegn.nr. og

SYMBOLER:

- : Aktiv forankring
- : Aktiv skjøtbar forankring
- △— : Passiv forankring

Nr.	Forandring	Dato	Sign.	Kontr.
STRÖMSTEINBRUA STAVANGER				Dato 13.9.1974 Tegn. A. Skarbo Kontr.
VIADUKT SÖLYST AKSE 9 TIL 12. SPENNARMERING				Målestokk 1:100
Professor dr. Arne Selberg NTH Trondheim Sivilingeniør Johs. Holt Kr. Augustsgt. 6, Oslo 1, Tlf. 33 39 26 - 33 15 12				Tegning nr. 7208/ B005

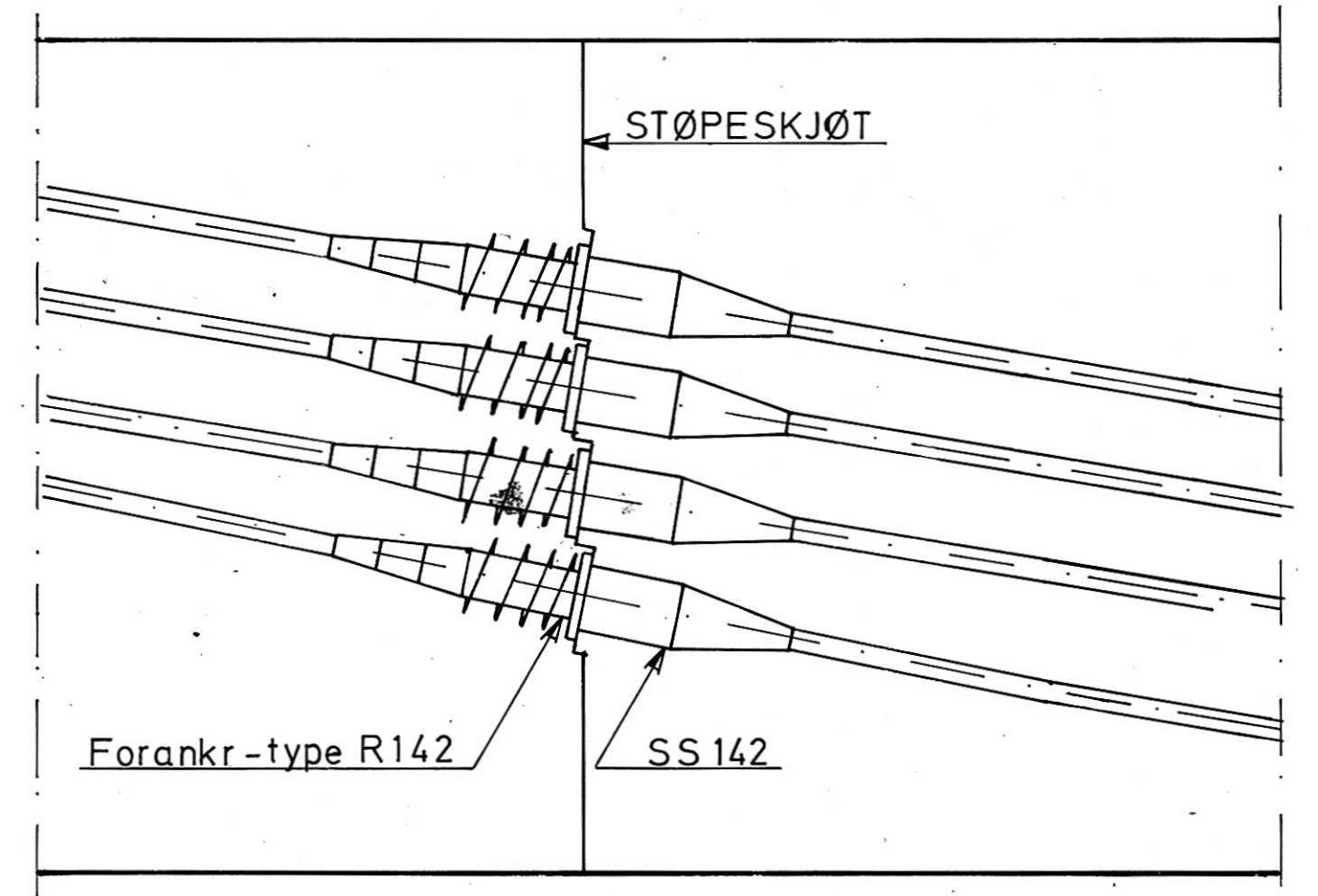


YTTER-VEGGER																																		
KABEL NR 1	165	151	127	103	80	59	43	32	26	22	21	22	26	32	40	50	63	78	96	116	138	163	185	203	215	224	226	226	225	220	211	197	174	165
2	137	123	101	79	61	45	33	27	24	22	21	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	226	225	218	208	191	169	146	137
3	107	94	73	52	35	21	13	9	9	9	9	10	14	20	28	38	51	66	84	104	126	151	173	191	203	212	214	213	206	186	163	140	116	107
4	79	62	35	19	12	9	9	9	9	9	9	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	214	213	200	175	147	118	90	79	

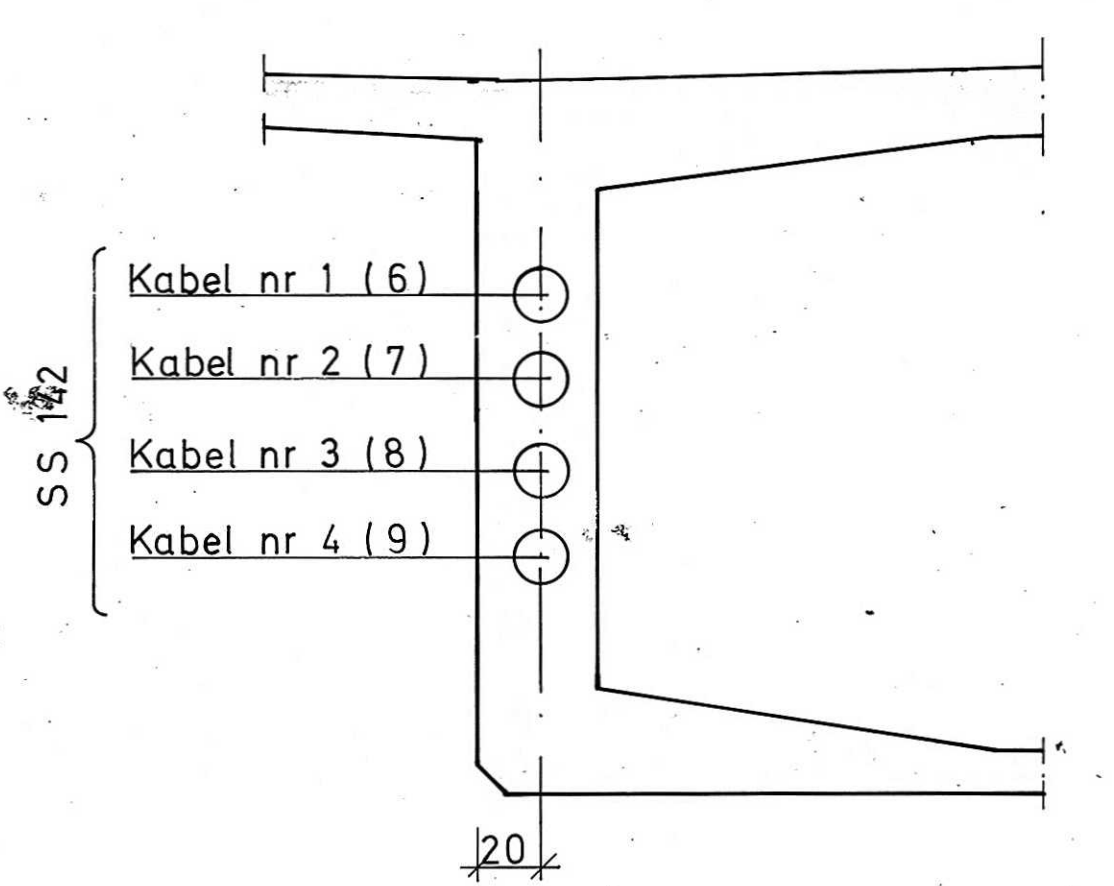
KABEL NR 5 OG 10. UTGÅR.																													

MIDT-VEGG																																		
KABEL NR 6	173	158	133	106	81	59	42	31	26	22	21	22	26	32	41	52	66	82	100	122	145	171	195	213	226	234	237	237	236	234	223	208	183	173
7	144	129	106	85	64	47	34	27	21	21	21	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	237	235	231	221	202	178	154	144
8	115	99	72	48	29	16	9	9	9	9	9	10	14	20	29	40	54	70	88	110	133	159	183	201	214	222	225	225	220	206	181	154	126	115
9	87	68	38	19	10	9	9	9	9	9	9	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	225	223	215	192	161	130	99	87	

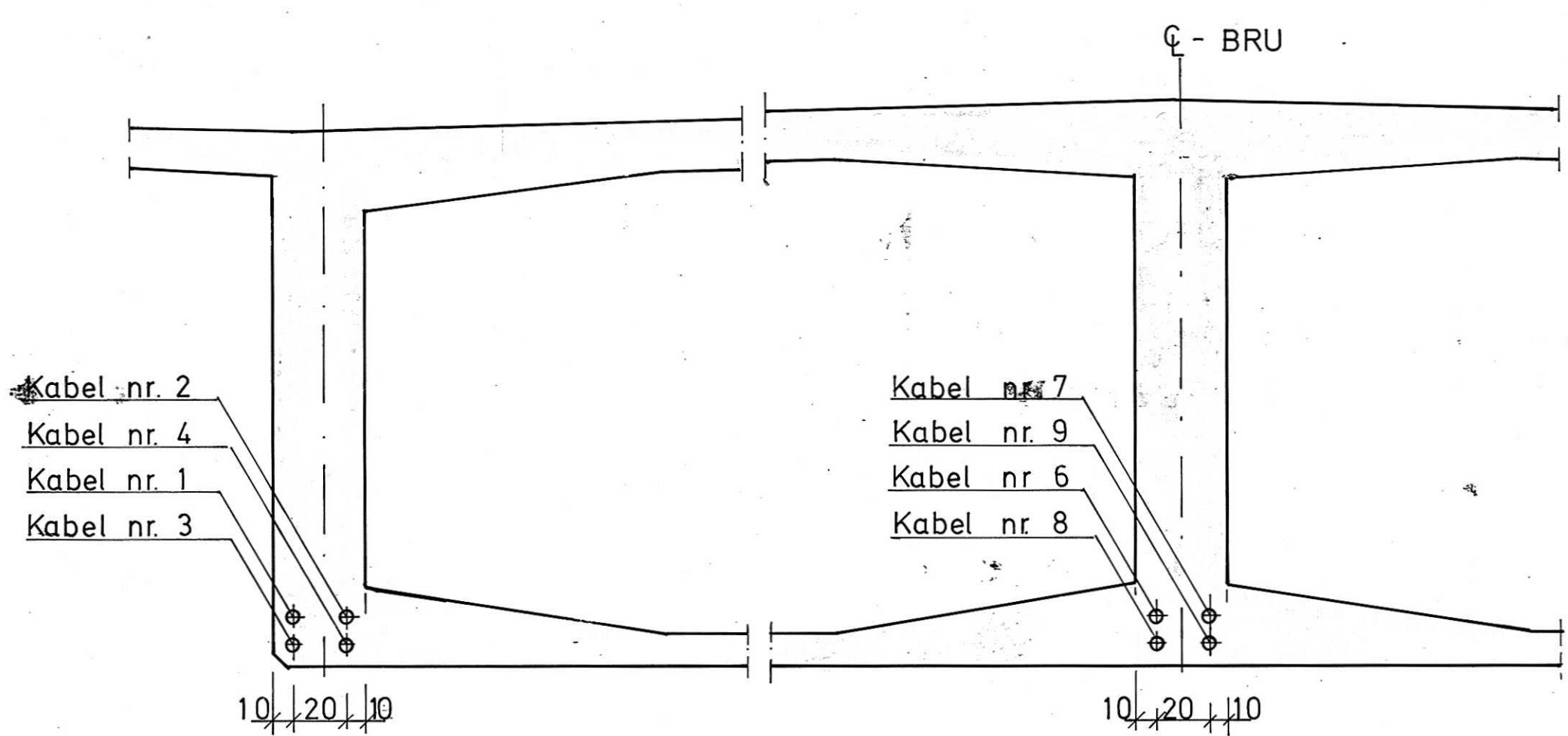
KABEL TYPE.
 BEV. FORANKRING TYPE R142
 SKJØTKOPLING SS142



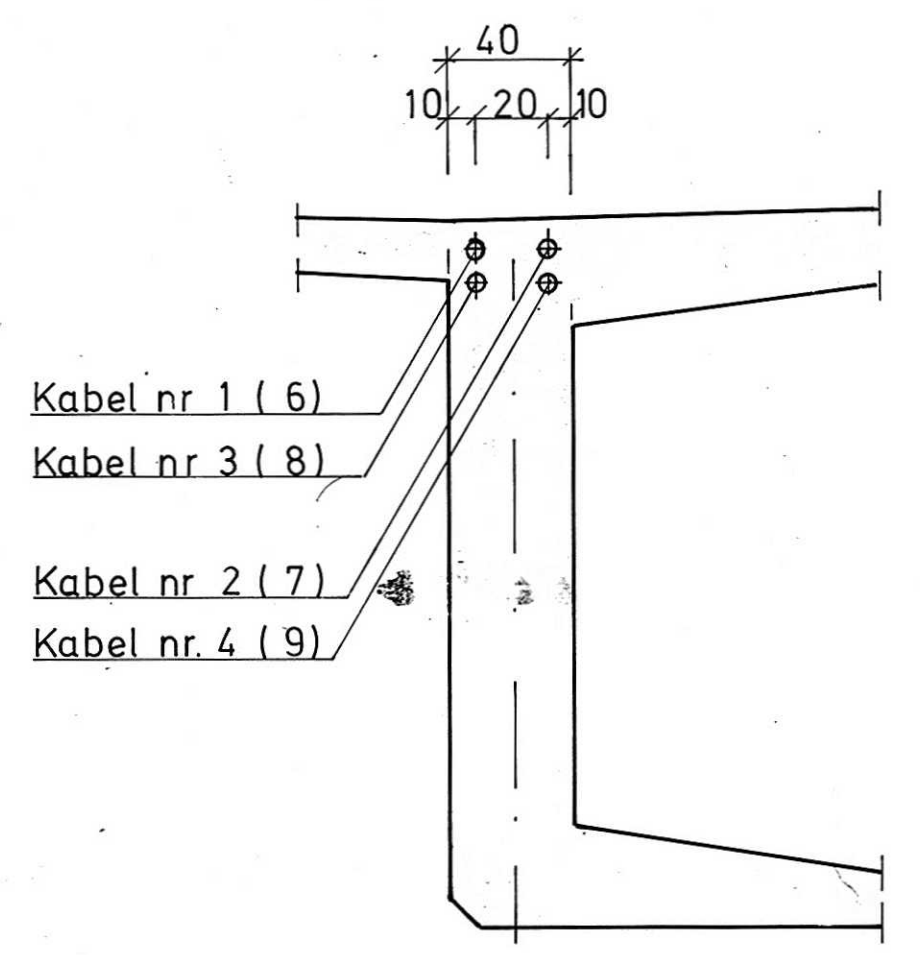
FORANKRINGER VED STØPESKJØT
1:20



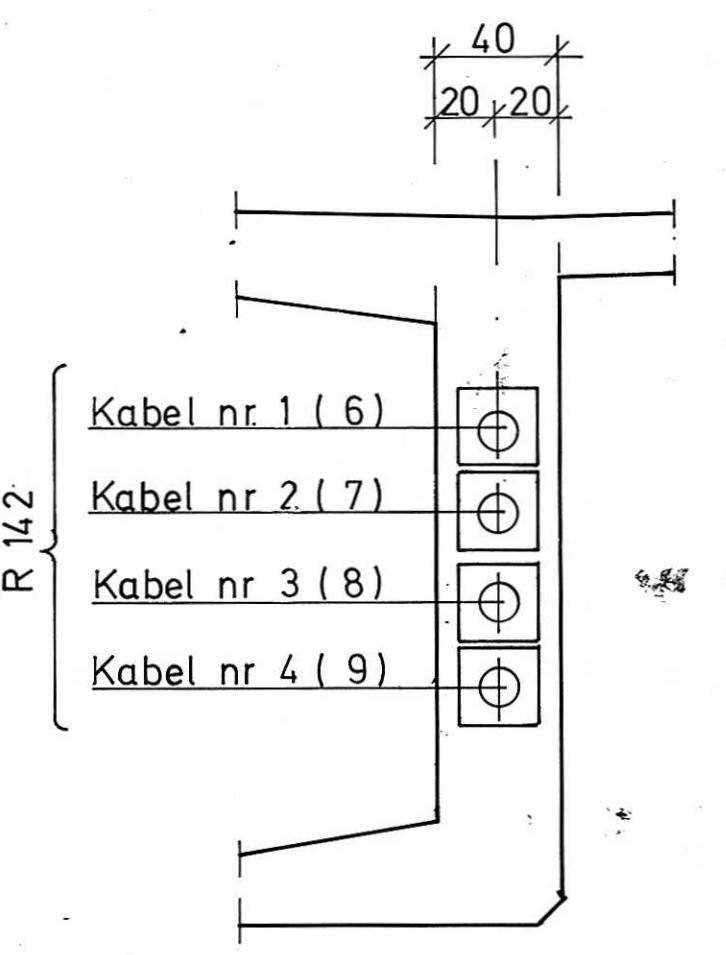
SNITT A-A
1:25



SNITT B-B
1:25



SNITT C-C
1:25

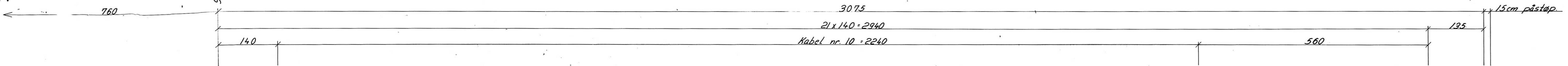


SNITT D-D
1:25

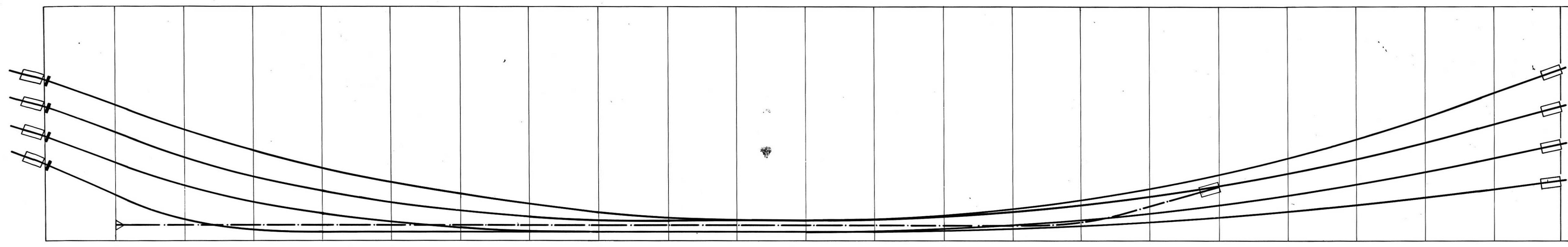
ANMERKNINGER:
 KONTROLLKLASSE: UTVIDET KONTROLL ETTER NS 3474
 Mål i cm
 Kabelhøyder fra underkant bunnplate til senterlinje kabel.
 Tall i () gjelder kabel nr. i midtvegg.

HENVISNINGER:

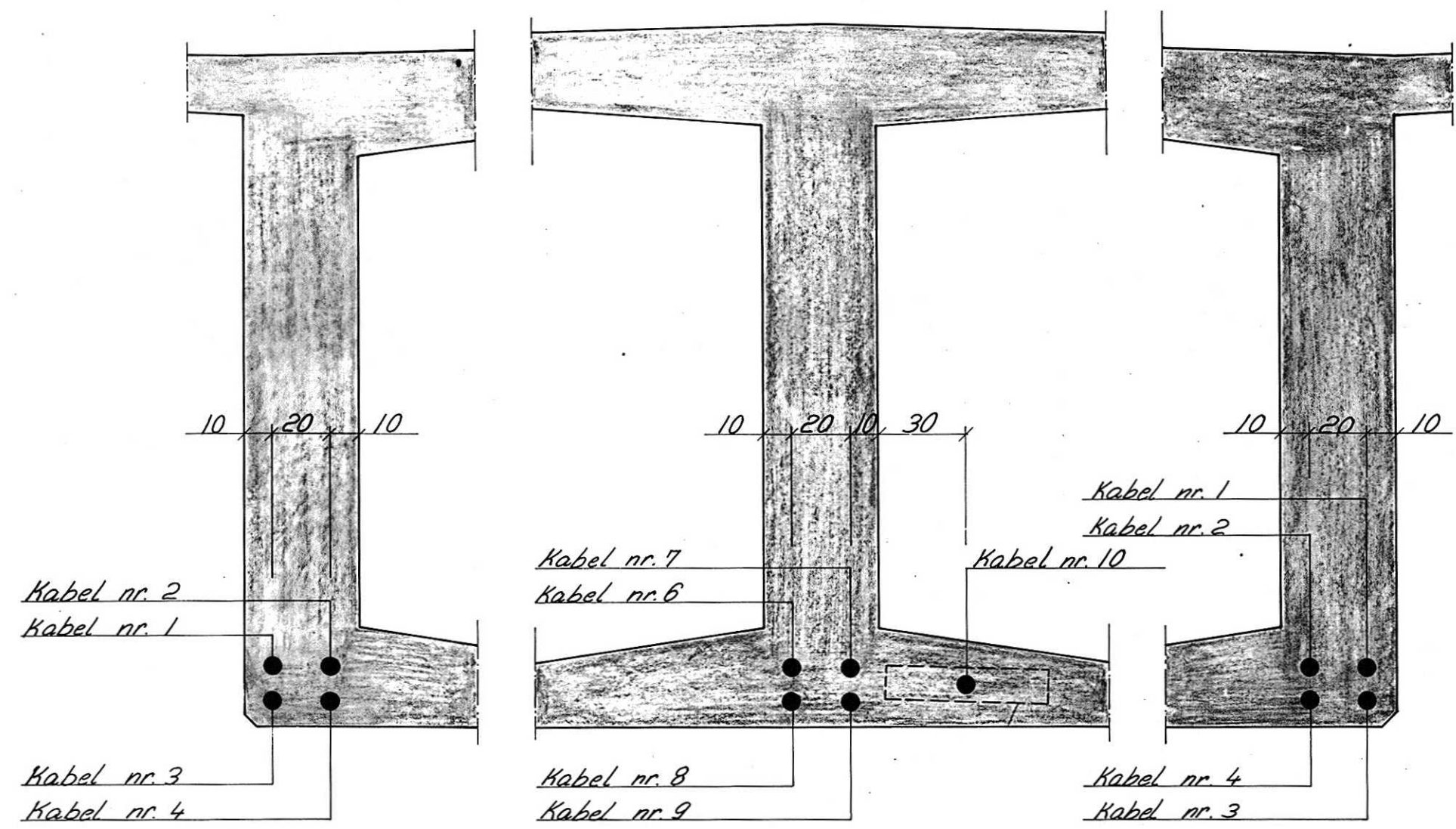
Nr.	Forandring	Dato	Sign.	Kontr.
STRØMSTEINBRUA STAVANGER				Dato 3.3.1976
PLASSERING AV SPENNARMERING. STØPEAVSNITT nr.10				Tegning nr. 7208 / B007
Professor dr. Arne Selberg NTH Trondheim Sivilingeniør Johs. Holt Kr. Auguststgt. 6, Oslo 1. Tlf. 33 39 26 - 33 15 12				Kontr. <i>F. Aas</i> Tegning nr. <i>Arne Selberg</i> <i>Johs. Holt</i>



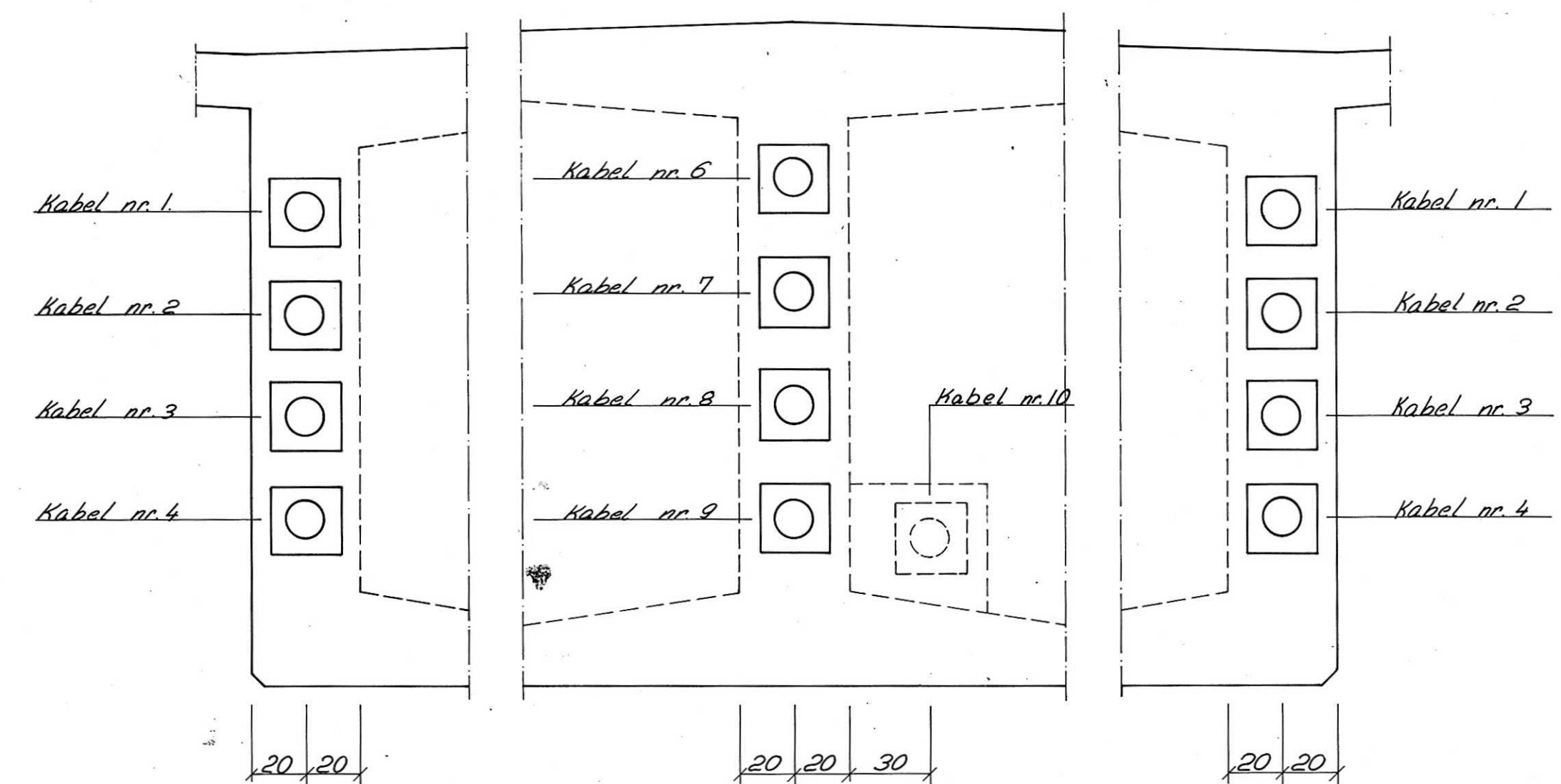
1:25
1:50



Kabel nr. 1	165	138	113	92	74	60	47	37	30	24	22	21	22	26	33	42	54	68	85	105	127	151	176
Kabel nr. 2	137	110	85	65	51	39	31	24	22	21	21	21	22	25	30	37	46	56	69	84	101	120	138
Kabel nr. 3	107	79	56	40	28	19	13	10	9	9	9	9	10	12	16	21	28	37	47	58	71	86	100
Kabel nr. 4	79	46	21	11	9	9	9	9	9	9	9	9	9	11	13	16	20	25	31	38	45	53	62
Kabel nr. 6	173	143	116	94	75	60	47	37	30	24	22	21	22	27	34	44	56	72	90	111	135	162	188
Kabel nr. 7	144	115	88	66	51	39	31	24	22	21	21	21	22	25	30	38	47	59	73	88	106	126	146
Kabel nr. 8	115	82	54	36	25	17	12	10	9	9	9	9	10	12	16	22	29	38	48	60	74	89	104
Kabel nr. 9	87	51	21	10	9	9	9	9	9	9	9	9	9	11	13	16	20	25	31	38	45	53	62
Kabel nr. 10		15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	19	34	55						



SNITT A-A
1:20



SNITT B-B
1:20

ANMERKNINGER:

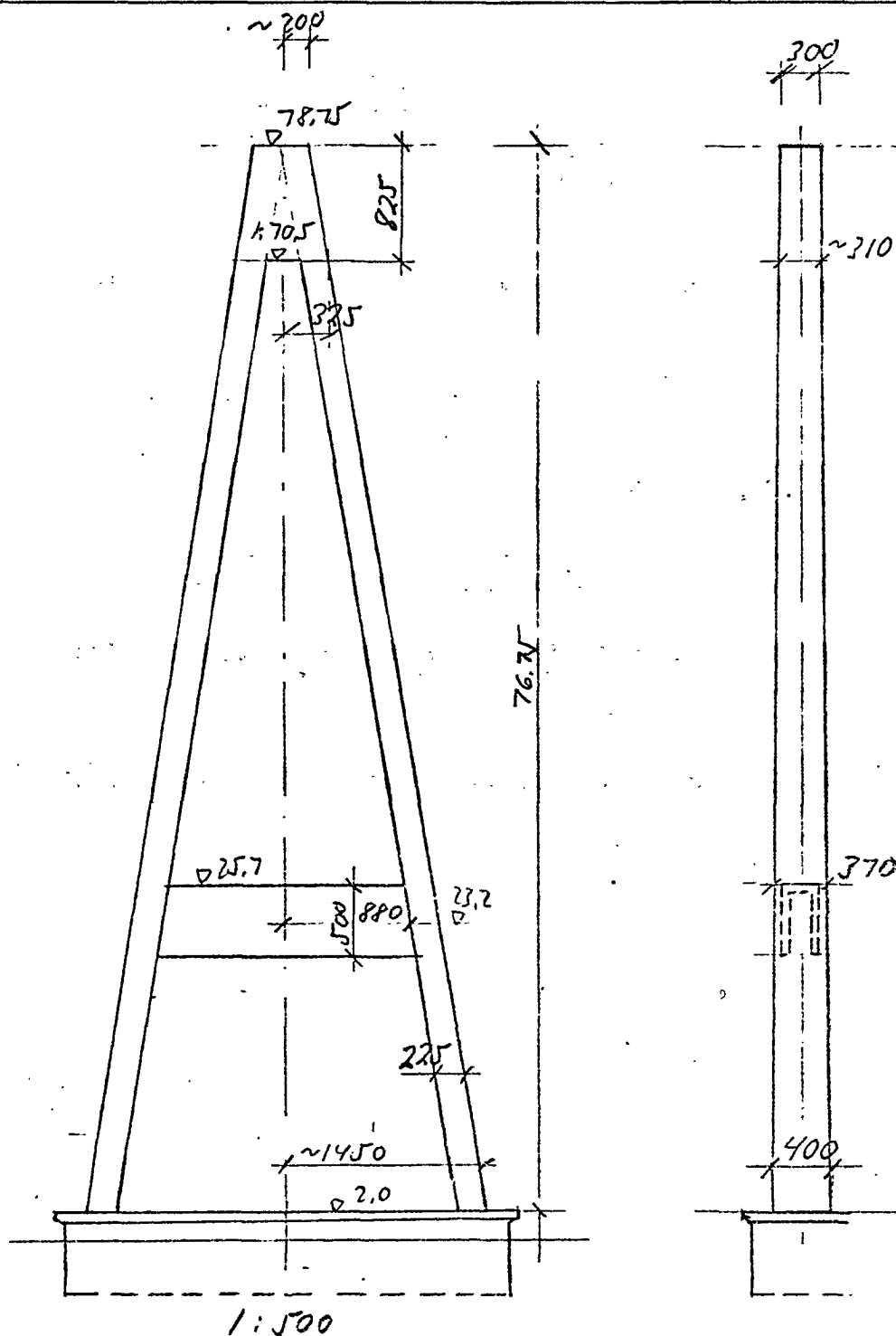
Mål i cm.
Kontrollklasse Utvidet kontroll etter NS 3474.
Kabelhøyder er regnet fra underkant bunnplate til senterlinje kabel.
 Bev. forankring, type R 142.
 Skjøtkobling, type SS 142.
 Bueanker, type Fb 142.
 Det leveres 2 stk. av hver av kablene 1, 2, 3 og 4. og 1 stk. av hver av kablene 6, 7, 8, 9 og 10.

HENVISNINGER:

Nr.	Forandring	Dato	Sign.	Kontr.
STRØMSTEINBRUA STAVANGER				Dato 2.6.76.
BRUBANE, STØPEAVSNITT 11. SPENNARMERING I DRAGERE.				Tegn. P. Iversen Kontr.
Professor dr. Arne Selberg NTH Trondheim Sivilingeniør Johs. Holt Kr. Augustsgt. 6, Oslo 1. Tlf. 33 39 26 - 33 15 12				Målestokk 1:20, 1:25, 1:50 Tegning nr. 7208 B008

VEDLEGG B

Opprinnelige beregninger



Tårnben er massive til 3,5m over sokkel
Forøvrig er tårnbenene hule.

Vekter av tårn + fundament Østre halvdel

Fundament:

$$G_A = 20 \cdot 8,0 \cdot 6,75 \cdot \overset{\text{Kneddykt.}}{(2,4 - 1,0)} = 151 \text{ Mp}$$

$$G_E = 20 \cdot 13,25 \cdot 5,25 \cdot \overset{x_n}{1,4} + 20 \cdot 13,25 \cdot 5,25 \cdot \overset{x}{2,4} = 529 \text{ Mp} \quad \underline{680 \text{ Mp}}$$

Søyleben:

Nedre 3,5m : $2,25 \cdot 4,0 \cdot 3,5 \cdot 2,5 = 79 \text{ Mp}$

Til ok rigel $(3,85 \cdot 2,25 - 2,5 \cdot 1,05) \cdot 20,2 \cdot 2,5 = 305 \text{ Mp}$

Til ut tårntopp $(3,4 \cdot 2,25 - 2,2 \cdot 1,05) \cdot 44,8 \cdot 2,5 = 598 \text{ Mp} \quad \underline{982 \text{ Mp}}$

(K.L. Σ 450)

$$-12,5 \cdot \frac{2,12}{76,75} + 14,5 - 2,25 = 8,8 \text{ m}$$

Rigel : $(5,0 \cdot 2,5 - 4,4 \cdot 1,3) \cdot 8,8 \cdot 2,5 = 149 \text{ Mp}$

Tårntopp: Medregner bare som vindflate, dvs. forskallet men ikke utstøpt

(?)

Samlet vekt halve tårn $G_{\text{tot}} = \underline{1811 \text{ Mp}}$

Stabiliserende moment

Vetting mot
 Grasholmen:
 $151 \cdot 11 + 529 \cdot 6,1$
 $+ 1125 \cdot 9,0$
 $= 15000 > 11701$

Regnet om 0 på k-4,0, 0,2m fra kant

$$M_{\text{st.}} = 151 \cdot (4 - 0,2) = 574 \text{ Mpm}$$

$$529 \cdot 8,7 = 4602 \text{ "}$$

$$(982 + 149) \cdot 5,8 = 6560 \text{ "}$$

$$\underline{11736 \text{ Mpm}}$$

Regner betong-
 spenning
 80 kg/cm^2

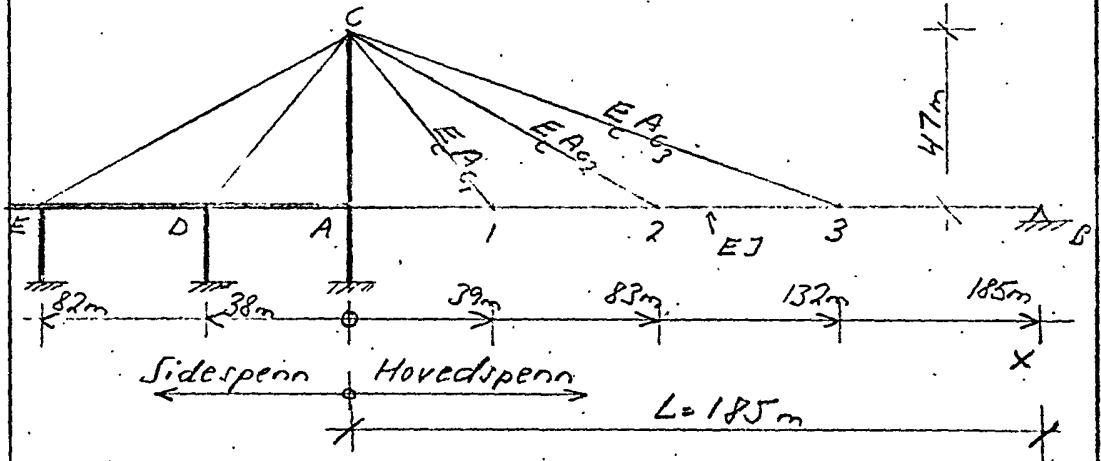
Nødv. trykksone ved $\sigma = 800 \text{ Mp/m}^2$ $A = 5,5 \text{ m} \cdot x$

Konstruksjon av
 fjell?
 $\sigma_{\text{maks}} = 20 \text{ kg/cm}^2$
 geol. rapport

$$x = \frac{G}{\sigma \cdot 5,5} = \frac{1811}{800 \cdot 5,5} = 0,41 \text{ m} \quad \text{d: som antatt}$$

$$e_G = \frac{11736}{1811} = 6,48 \text{ m}$$

Fare for knekning av tårn langs bru.

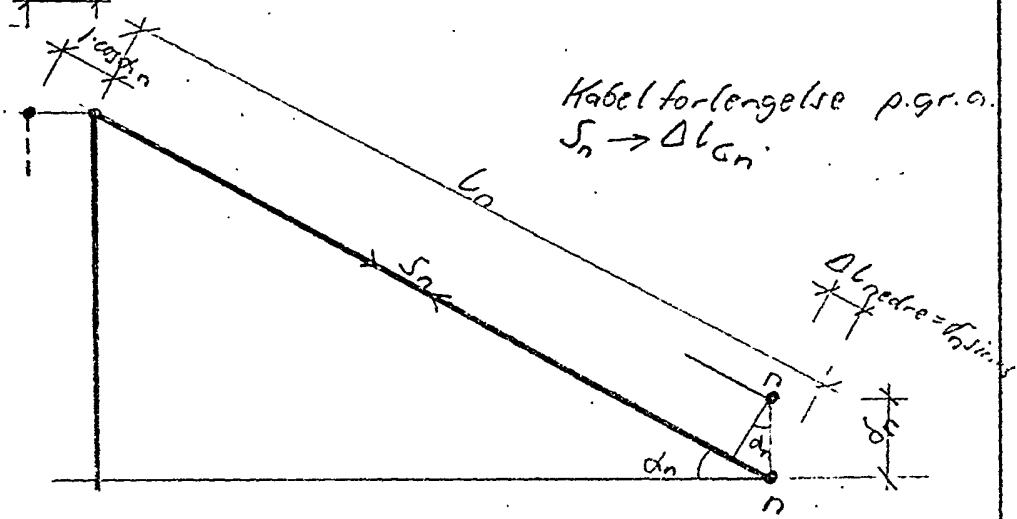


ute samsvingning
 ved rett belastning
 i E tårn?
 Bevegelsen i tårn
 p.g.a. Pmax
 i nærheten av
 PE

a) Utknekningsform der tårntopp beveger seg mot sidespenn

Denne tårnbevegelse vil gi tilleggskrefter i skråkabler mot hovedspenn og disse er igjen avhengig av bøyestivheten av brubane A-B. Tilleggskreftene søker å motvirke tårnbevegelsen. Samtidig avlastes bakkablene og dette vil også motvirke tårnbevegelsen.

$\Delta h_{\text{tårn}} = 0,01 \text{ m}$



Kabelforlengelse p.g.a. $S_n \rightarrow \Delta L_n$

$\Delta L_{\text{netto}} = L_n \sin^2 \alpha_n$

For alle 3 kablene gjelder ved tårntopp

$$S_n \frac{\sin \alpha_n}{\cos^2 \alpha_n} + \Delta L_n \frac{1}{\cos \alpha_n} = 0,01 \text{ (m)} \quad (1)$$

Neglisjerer forkortelse av brubanen
 k.p.r. AS
 Swinans Bæren

Regneparametre

Stag 1 indre stag: $x = 39m$

$$\alpha_1 = 50,374^\circ \quad l_1 = 61,9m$$

$$A_{c1} = 0,0084m^2 \quad E_c = 1,65 \cdot 10^8 \text{ KN/m}^2$$

Kfr. Selberg
Juli 1975
s. 10

Stag 2 midtre stag: $x = 83m$

$$\alpha_2 = 29,805^\circ \quad l_2 = 96,8m$$

$$A_{c2} = 0,0167m^2 \quad E_c = 1,65 \cdot 10^8 \text{ KN/m}^2$$

Stag 3 ytre stag: $x = 132m$

$$\alpha_3 = 19,716^\circ \quad l_3 = 141,3m$$

$$A_{c3} = 0,0167m^2 \quad E_c = 1,65 \cdot 10^8 \text{ KN/m}^2$$

Brubane

$$J_x = 0,25m^4 \quad \text{halve brutvernsnittet.}$$

$$E = 21 \cdot 10^8 \text{ KN/m}^2$$

$$L = 185m$$

A.S. beregn
juli 75 s. 7

Kontroll av grunndata EDB-kjøringer i bru

Stivheter

Tårnben

Ved fot massivt nedre 2m

Regner iullt

$$J = 4,0 \cdot \frac{2,25^3}{12} - 2,49 \cdot \frac{1,05^3}{12} = \underline{3,57 m^4}$$

$$A = 4,0 \cdot 2,25 - 2,49 \cdot 1,05 = \underline{6,4 m^2}$$

Ved risel

$$J = 3,69 \cdot \frac{2,25^3}{12} - 2,49 \cdot \frac{1,05^3}{12} = \underline{3,26 m^4}$$

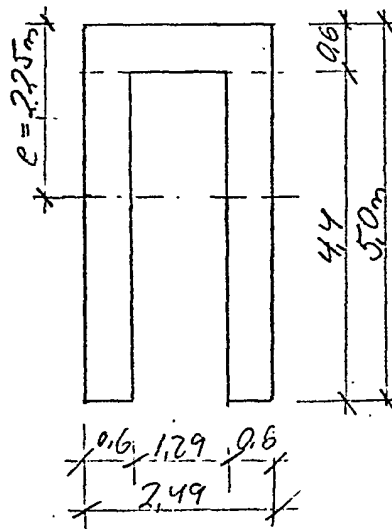
$$A = 3,69 \cdot 2,25 - 2,49 \cdot 1,05 = \underline{5,7 m^2}$$

Ved tårntopp

$$J = \sim 3,05 \cdot \frac{2,25^3}{12} - 1,95 \cdot \frac{1,05^3}{12} = \underline{2,7 m^4}$$

$$A \sim 3,05 \cdot 2,25 - 1,95 \cdot 1,05 = \underline{4,8 m^2}$$

Rigel



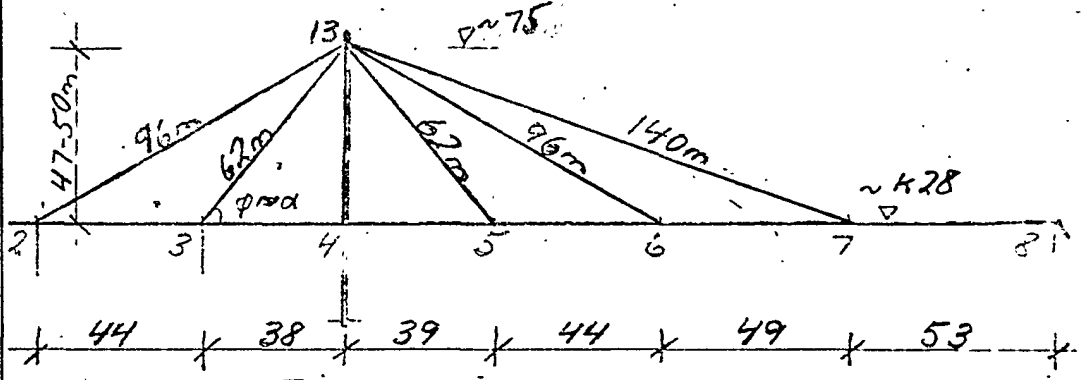
$$A = 2,49 \cdot 0,6 + 4,4 \cdot 1,2 = \underline{6,77 m^2}$$

$$e = \frac{2,49 \cdot 0,6 \cdot 0,3 + 4,4 \cdot 1,2 \cdot 2,8}{6,77} = \underline{2,25 m}$$

$$J = \frac{2,49 \cdot 0,6^3}{12} + \frac{1,2 \cdot 4,4^3}{12} + 2,49 \cdot 0,6 (2,25 - 0,3)^2 + 4,4 \cdot 1,2 (2,8 - 2,25)^2 = \underline{15,8 m^4}$$

$$I = 5,75$$

$$J = \frac{15,8}{1,75} = \underline{9,0 m^4}$$



Virkning fra bakkabler

$$V_{3(13)g} \sim 223 \cdot \frac{39}{38} = 229 \text{ Mp}$$

$$V_{2(13)g} \sim 276 \cdot \frac{82}{82} + 347 \cdot \frac{132}{47} \cdot \frac{49}{82} = 862 \text{ Mp}$$

Kabelvekt

ca 4000 m á 29 kg/cm = 116 Mp

Regner at hele kabelvekten belaster tårn.

Samlet tårn topplast fra egenvekt inkl. kabler

$$P_{4g} = 223 + 276 + 347 + 229 + 862 + 116 = 2053 \text{ Mp}$$

EDB-beregn. kjørt for $P_4 = 100 \text{ Mp}$.

Mult. faktor $K_{4g} = 20,5$

b) Nyttelast Strip-step 2 13.5.75 gir

for halve brua tårnlast $\frac{1}{2} P_{4p} = 565 \text{ Mp}$

$$P_{4p} = 2 \cdot 565 = 1130 \text{ Mp} \quad K_{4p} = 11,3$$

Samlet tårnlast $P_{4g} = 2053 + 1130 = 3183 \text{ Mp}$
 $K_{4g} = 31,8$

Her vi kjørte
 der man
 ikke har
 nok last seg helt
 over?
 Kan gjøre
 overlast beregn.?

Okt. 75. 44
 gir

$$P_{4p} = 609,2 = 1218 \text{ Mp}$$

$$P_{4g} = 3271 \text{ Mp}$$

Betongunderstøp for færtlagere

Pr halvdel overføres fra kabler

Kfr. KL 162.76

Kfr. S. A 77

$N_g = 1200 \text{ Mp}$

$N_p = 546 \text{ Mp}$

$N_{\text{maks}} \approx 1750 \text{ Mp}$

Stag 2 $S_{2g} = 946 \text{ Mp}$ $N_{2g} = 943 \cdot \frac{50}{95} = 496 \text{ Mp}$

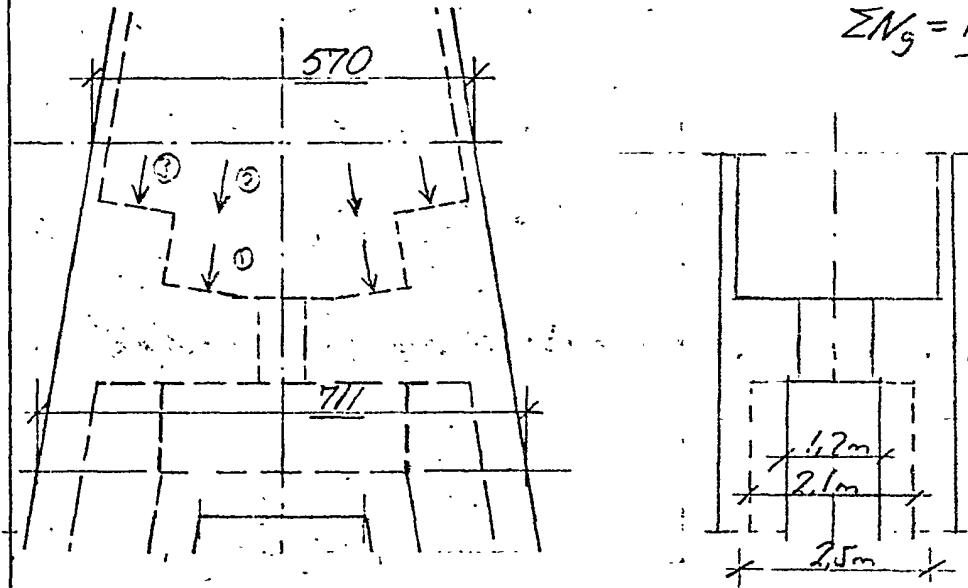
Stag 3 $S_{3g} = 267 \text{ Mp}$ $N_{3g} = 267 \cdot \frac{48}{61} = 210$

Stag 5 $S_{5g} = 164 \text{ Mp}$ $N_{5g} = 164 \cdot \frac{47}{61} = 126$

Stag 6 $S_{6g} = 326 \text{ Mp}$ $N_{6g} = 326 \cdot \frac{47}{95} = 161$

Stag 7 $S_{7g} = 618 \text{ Mp}$ $N_{7g} = 618 \cdot \frac{47}{140} = 207$

$\Sigma N_g = 1200 \text{ Mp}$



Regner nyttelast fordelt med vertikalt 100 Mp pr. stag.

Vertikalkrefter pr. lagerdel blir da

Stag 3+5 $N_{g1} = 1,2(210+126) + 1,6 \cdot 100 \cdot 2 = 723 \text{ Mp}$ Del. 1

Stag $\frac{2}{2} + 6$ $N_{g2} = 1,2(\frac{496}{2} + 161) + 1,6 \cdot 100 \cdot 2 = 811 \text{ Mp}$ Del. 2

Stag $\frac{2}{2} + 7$ $N_{g3} = 1,2(\frac{496}{2} + 207) + 1,6 \cdot 100 \cdot 2 = 866 \text{ Mp}$ Del. 3

Såmlet last på del 1+2 : 1534 Mp

" " " 3 : 866 Mp

Kontroll deformasjoner kårnben

Variasjon i J_y

$$J_{70} = 3,11 \frac{2,25^3}{12} - 2,1 \cdot \frac{1,05^3}{12} = 2,75 \text{ m}^4$$

$$J_{55} = 3,30 \cdot \quad = 2,93 \text{ m}^4$$

$$J_{40} = 3,50 \cdot \quad = 3,12 \text{ m}^4$$

$$J_{20} = 3,76 \cdot \quad = 3,37 \text{ m}^4$$

$$J_{20} = 4,0 \cdot \frac{2,25^3}{12} - 0,2 = 3,60 \text{ m}^4$$

Vektvariasjon

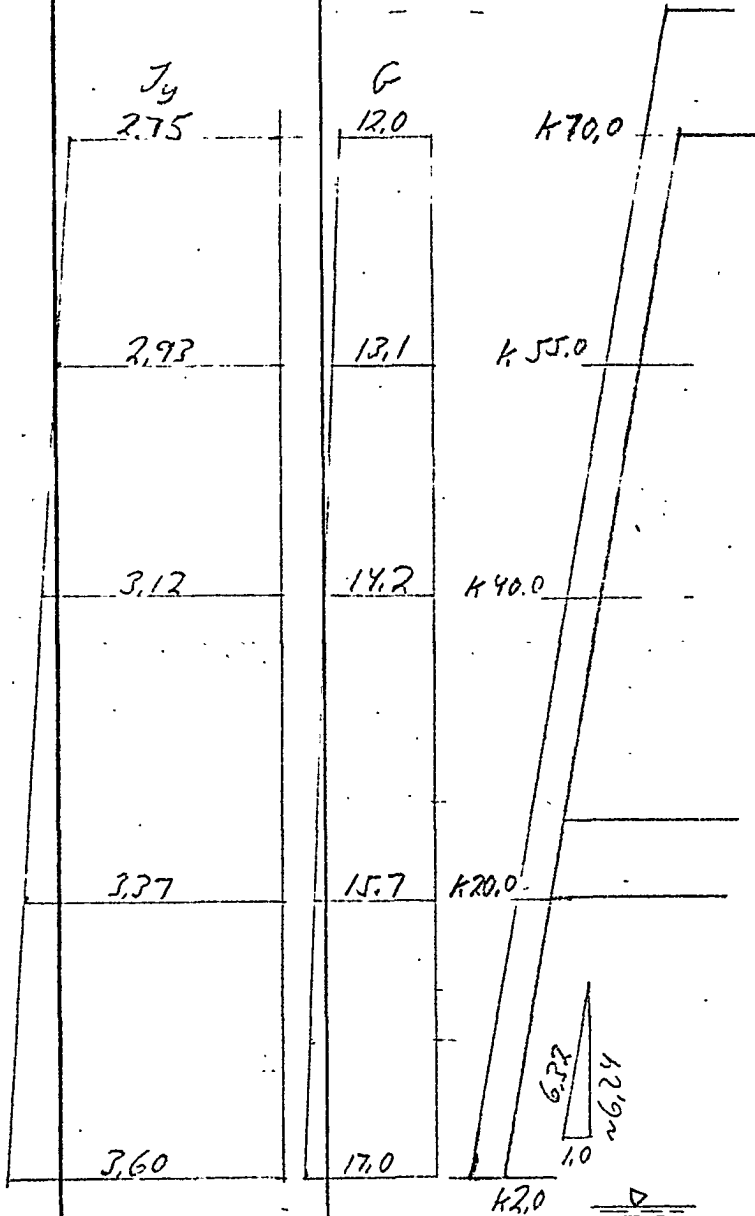
$$G_{70} = (3,11 \cdot 2,25 - 2,1 \cdot 1,05) \cdot 2,5 = 12,0 \text{ MP/m}$$

$$G_{20} = (4 \cdot 2,25 - 2,1 \cdot 1,05) \cdot 2,5 = 17,0 \text{ MP/m}$$

$$G_{55} = 12,0 + 1,1 = 13,1 \text{ MP/m}$$

$$G_{40} = 12,0 + 2,2 = 14,2 \text{ MP/m}$$

$$G_{20} = 12,0 + 3,7 = 15,7 \text{ MP/m}$$



1. Støpeetappe

Det støpes til ca. k 26,5 $J_{midl} = 3,45 \text{ m}^4$

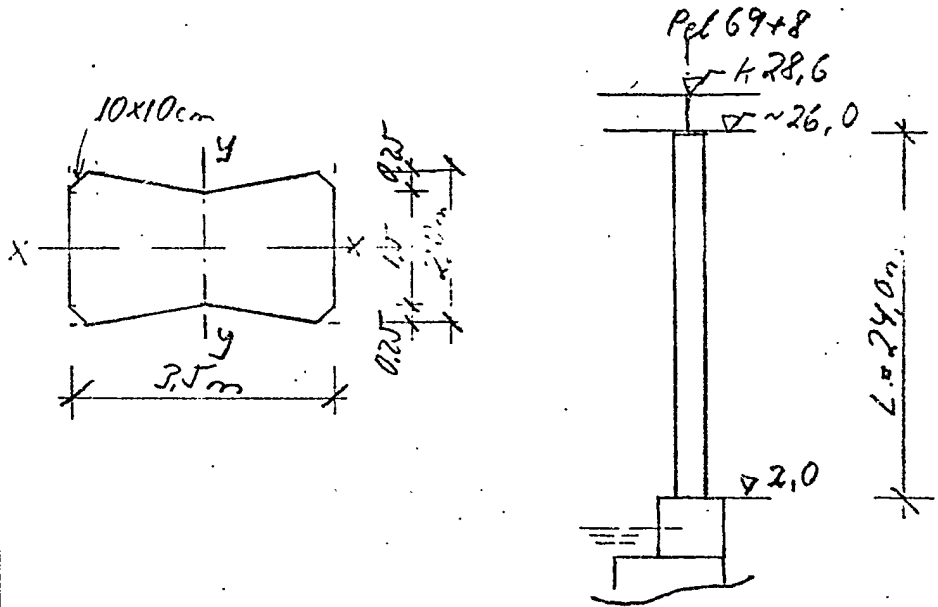
Last \perp kårnben $\sim 16,2 \cdot \frac{1}{6,32} = 2,55 \text{ MP/m}$

Deformasjon

$$k 26,5: \Delta y_{365} = \frac{0,125 \cdot 2,55 \cdot 2,45^4}{E \cdot 3,45} = \frac{1}{E} \cdot 33289$$

$E = 1 \cdot 10^6 \text{ MP/m}^2$ gir $\Delta y_{365} = 0,0332 \text{ m}$ $\Delta: 33,2 \text{ mm}$
 $E = 2 \cdot 10^6$ gir $16,6 \text{ mm}$
 $E = 3 \cdot 10^6$ gir 11 mm

Dimensjonering av søyle



Regner $h_{midl} = 1,8\text{ m}$ $b = 3,5\text{ m}$

$J_x = \frac{1}{12} \cdot 3,5 \cdot 1,8^3 = 1,70\text{ m}^4$ $J_y = \frac{1}{12} \cdot 1,75 \cdot 3,5^3 = 6,25\text{ m}^4$

= 1Mp

Horisontalkraft 10 kN i søyletopp i brua
 lengderetning gir utbøyning i tårntopp

$\Delta y = \frac{Pl^3}{3EJ_x}$

C35
 NS3473 3.3.1

Korttidslast $E_c = 5000 \sqrt{f_{ck}} \text{ N/mm}^2 = 5000 \sqrt{35}$
 $= 29580 \text{ N/mm}^2 = 2,95 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2$

Gjelder for brems. og temperatur

Langtidslast Regner $E = 1 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2$

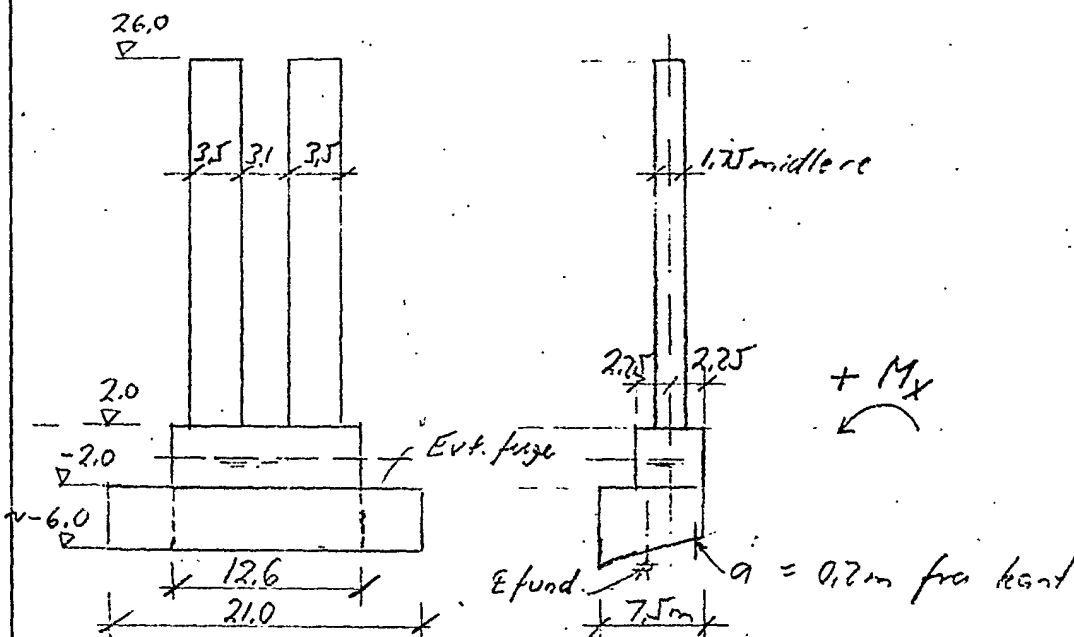
$\Delta y_{korttid} = \frac{10000 \cdot 24^3 \cdot 10^9}{3 \cdot 2,95 \cdot 10^4 \cdot 1,7 \cdot 10^{12}} = 0,919 \text{ mm}$

10mm forskyvning tilsvare $\frac{10 \cdot 10}{0,919} = 109 \text{ kN}$
 korttidslast

$\Delta y_{langtid} = 0,919 \cdot \frac{2,95}{1,0} = 2,71 \text{ mm}$

10mm forskyvning - tilsvare $\frac{10 \cdot 10}{2,71} = 37 \text{ kN}$
 langtidslast

Stabilitet i bugetiden



Vekter

2 søyler $2 \cdot 3,5 \cdot 1,75 \cdot 24 \cdot 2,5 = 735 \text{ Mp}$
 Fundament over vann $4,5 \cdot 12,6 \cdot 2 \cdot 2,4 = 272 \text{ ''}$
 Fundament under vann $4,5 \cdot 12,6 \cdot 2(24-1) = 159 \text{ ''}$
 $7,5 \cdot 21,0 \cdot 4 \cdot 1,4 = 882 \text{ ''}$
 $G_{\text{Tot}} = 2048 \text{ Mp}^*)$

Stabiliserende moment

Regnet om a, 0,25m fra kant

$M_{st} = 735 \cdot (2,25 - 0,25) = 1470 \text{ Mpm}$
 $(272 + 159) \cdot 2,0 = 862 \text{ ''}$
 $882 \cdot (3,75 - 0,25) = 3087 \text{ ''}$
5419 Mpm

Nødv. trykksone med $\sigma_{T,II} = 200 \text{ Mp/m}^2$ (geol. rapport)
 $x = \frac{2048}{21 \cdot 200} = 0,49 \text{ m}$ (s: 2 · 0,25)

*) Uten sideutkrageringer fæst
 $G_{red} = 735 + 272 + 159 + 7,5 \cdot 12,6 \cdot 4 \cdot 1,4 = 1675 \text{ Mp}$
 $M_{stred} = 1470 + 862 + 529 \cdot 3,5 = 4184 \text{ Mpm}$

Kfr. J.S.
 J. 7. 76

Montert tverrsnitt uten ekstra forsterkning

Interpolert
 og nyregnet
 enkelte
 seksjoner

Kfr. tegn
 7208/SKC20A

El.nr	A ₂ m ²	J _x m ⁴	W ₀ m ³	W _U m ³	Lengde
0					1,08 — 51+3m
1	0,741	0,773	0,867	0,530	2,52
2-1	0,520	0,566	0,591	0,407	1,8
2-2	0,502	0,557	0,587	0,398	4,2
3	0,494	~0,544	~0,582	0,384	9,0
4	0,491	0,541	0,579	0,382	9,0
5-1	0,499	0,554	0,584	0,396	7,0
5-2	0,561	0,600	0,698	0,400	2,0
6-1	0,703	0,772	0,735	0,589	2,4
6-2	0,621	0,714	0,606	0,609	2,6 — 55+2m
7	0,499	0,554	0,584	0,396	9,0
8	0,491	0,541	0,579	0,382	9,0
9	0,499	0,554	0,584	0,396	9,0
10	0,499	0,554	0,584	0,396	9,0
11-1	0,612	0,675	0,730	0,473	1,8
11-2	0,712	0,740	0,892	0,484	3,6 — 59+6m
11-3	0,630	0,684	0,734	0,483	3,1
12-1	0,520	0,566	0,591	0,407	3,0
12-2	0,502	0,557	0,587	0,398	5,5
13	"	"	"	"	9,0
14	0,494	0,544	0,582	0,384	9,0
15	0,494	0,544	0,582	0,384	9,0
16-1	0,502	0,557	0,587	0,398	2,0
16-2	0,52	0,566	0,591	0,407	2,0
16-3	0,600	0,628	0,725	0,423	2,0
17-1	0,722	0,740	0,902	0,483	4,0 +0,4m — 64+5m
17-2	0,639	0,685	0,737	0,477	4,0
18-1	0,559	0,612	0,602	0,459	2,0
18-2	0,541	0,604	0,597	0,451	2,0
18-3	0,523	0,596	0,592	0,443	4,0
19-21	0,494	0,554	0,582	0,384	27,0
22	0,491	0,541	0,579	0,382	9,0
23-1	0,491	0,541	0,579	0,382	1,4
23-2	0,509	0,550	0,583	0,391	4,0

Overrikt kversnitt

Et.nr	Topplate	Bunnpl.	Gangb. MP	Bunnpl. MP	Steg
1	20-12	20-10-10	200.11	200.11	20
2-1	12-8	20-8-8	140.9	200.11	16
2-2	"	"	"	"	12
3	"	"	140.9	200.9	"
4	"	"	140.7	"	"
5-1	12-8	"	"	200.11	"
5-2	16-12	20-8-8	140.7	"	"
6-1	20-20	20-10-8	140.9	"	20
6-2	16-12	"	"	"	20
7	12-8	20-8-8	140.7	"	12
8	"	"	"	200.9	"
9	"	"	"	200.11	"
10	12-8	20-8-8	140.7	"	"
11-1	16-12	20-10-10	140.9	220.11	16
11-2	20-20	"	"	"	20
11-3	16-12	20-10-10	140.9	"	20
12-1	12-8	20-8-8	"	200.11	16
x - 12-2	"	"	"	"	12
13	"	"	"	"	"
14	"	"	"	200.9	"
15	"	"	"	"	"
16-1	12-8	"	"	200.11	"
16-2	12-8/16-12	"	"	"	16
16-3	16-12	20-8-8	"	"	20
17-1	20-20	20-10-8	"	"	24
17-2	16-12	20-10-8	"	"	24
18-1	12-8	20-10-8	"	"	20
18-2	"	"	"	"	16
18-3	"	"	"	"	12
19-21	"	20-8-8	140.9	200.9	"
22	"	"	140.7	"	"
23-1	"	"	"	"	"
23-2	"	"	"	"	16

7208 Bybrua

Ajourføring beregninger

Side F3
 Dato 24.7.79
 Sign. FH

Vekter hengespenn

7208/54C20A gir samlet stålvekt
 ca 1068 t

Skruer, lasker
 etc. er
 med

Vekt oppgaver fra E Rund 20.2.78 angir

Totalvekt 1148 t

Stål akse 10 og 11 9,6 t

Rekkverk 33,1 t

Tårnlagre 34,8 t 77,5 t

Før skru
 vektvekt

1070,5 t

Beholder vekter fra 54C20A

Tillegg

Rekkverk $\frac{33,1}{185} \sim 0,15 \text{ t/m}$

Skrapeseler

684 m² 1mm 12,5 kg/m² 8,55 t = 0,05 t/m

5,4 m/m

Øket stålvekt 0,20 t/m

Asfalt

Kjørebane Betong + Mastix 0,5 cm
 Tetning 2,0 cm
 Slitelag 4,0 cm
6,5 cm

6,5 cm á 2,0 130 kg/m²

Regner B = 10,0 m ∴ 1,3 t/m

Fortau 2,5 cm á 2,0 = 50 kg/m²

Regner B = 5,5 m ∴ 0,275 t/m

~ 1,6 t/m

Vektfordeling Langt Grubanen

	El.nr	Lengde	Stålkant t	t/m	Asfalt + div t/m	Sum t/m	
4	0	1,08	t	t/m			
	1	2,52	22,9	9,1	1,8	10,9	
	2-1 } 2-2 }	6,0	30,6	5,1		6,9	
		3	9,0	45,2	5,0		6,8
	4	9,0	45,2	5,0		6,8	
	5-1 } 5-2 }	9,0	47,5	5,3		7,1	
		6-1	2,4	22,5	9,4		11,2
	5	6-2	2,6	24,3	9,4		11,2
		7	9,0	46,6	5,2		7,0
		8	9,0	45,2	5,0		6,8
9		9,0	46,5	5,2		7,0	
10		9,0	47,4	5,2		7,1	
11-1 } 11-2 }		5,4	54,0	10,0		11,8	
		11-3	3,1	31,0	10,0		11,8
		12-1 } 12-2 }	8,5	45,6	5,4		7,2
6		13	9,0	46,4	5,2		7,0
		14	9,0	45,2	5,0		6,8
	15	9,0	45,5	5,1		6,9	
	16-1 } 16-2 }	6,0	33,7	5,6		7,4	
		16-3					
		17-1*)	4,4	46,1	10,5		12,3
	17-2*)	3,6	37,7	10,5		12,3	
	18-1 } 18-2 } 18-3 }	8,0	43,8	5,5		7,3	
		19	9,0	45,2	5,0		6,8
		20	9,0	45,2	5,0		6,8
21		9,0	45,2	5,0		6,8	
22		9,0	45,3	5,0		6,8	
23-1 } 23-2 }		5,4	34,1	6,3		8,1	

40cm avviking fra tidl. inn- deling

Tilleggsberegning.

P.g.a. montasjeforhold er stålvekt pr. m
 sket for totalt 44 til 46 Mpm generelt
 og p.g.a. undervurdering av tverrbærere (kabler)
 går disse opp fra 10 - 15 - 18. Mp pr. side
 til 12,5 - 20 - 25. Mp pr. side for
 pktene 5 - 6 - 7.

Vi får da:

	V ₅	V ₆	V ₇
Egenvekt $2,3/2,2 \cdot (76/100/129) =$	79	105	135
Tilleggsvekt v. tverrb.	13	20	25
Vertikalreaksjon i Mp	92	125	160

Vi hadde før 86 115 147

Økning i Mp 6 10 13
 Økning i % 7 9 9

H:

Dette gir for stag 5	$H = 92/1,20108 =$	77 Mp
— " — 6	$H = 125/0,58627 =$	221 Mp
— " — 7	$H = 160/0,35606 =$	449 Mp
<u>Totalt H =</u>		<u>747 Mp</u>

K:

Dette gir for stag 5	$K = 92/0,76854 =$	120 Mp
6	$K = 125/0,49277 =$	254 Mp
7	$K = 160/0,33543 =$	477 Mp

På bakkablene får andel av H:

Stag 2 = $0,8303 \cdot 747 = 620$ Mp
 Stag 3 = $0,1697 \cdot 747 = 127$ Mp

K:

Stag 2 $620/0,85408 = 726$ Mp
 Stag 3 $127/0,61799 = 206$ Mp

Vi hadde før på stag 2 669 Mp, økning 57 Mp = 9%
 9%, på stag 3 før 189 Mp, økning 17 Mp = 9%

300

X-C/

480

7+

470

60

+ 8

440

6+

400

5+

40

500

230

4+

250

80

3+

50

2+

20

1+

30

35

50

60

X

X

X

X

X

||
||
||

||
||
||

|| || ||

|| || ||

C

C

X

X

X

X

X

X

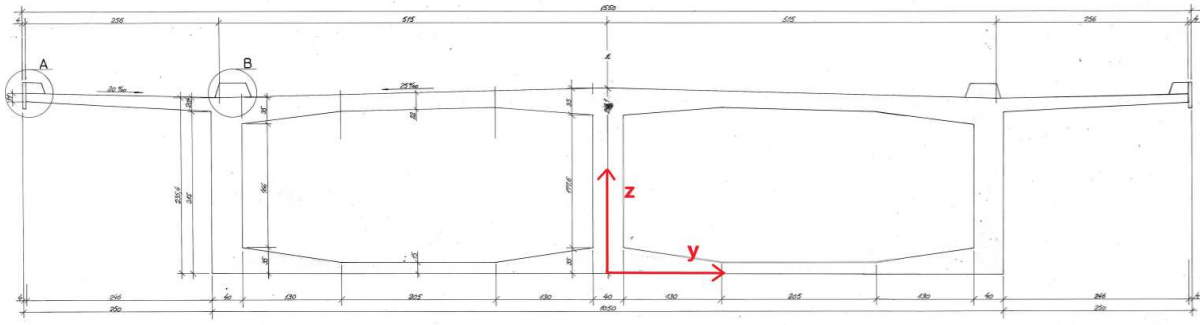
X

X

VEDLEGG C

Beregninger i Mathcad

Mechanical properties of concrete bridge deck



The cross section is divided into segments of rectangles and triangles for the calculation of second moment of area.

The cross section is symmetric along the z-axis.

Segment 1

$$z_1 := 0.35 + 1.776 + 0.35 = 2.476$$

$$y_1 := 0.2$$

$$A_1 := z_1 \cdot y_1 = 0.4952$$

Height/z-component of the segment [m]

Width/y-component of the segment [m]

Area of the segment [m²]

$$z_{c1} := \frac{z_1}{2} = 1.238$$

$$y_{c1} := \frac{y_1}{2} = 0.1$$

Area center of the segment (y,z), relative to global reference point [m]

Segment 2

$$z_2 := 0.15$$

$$y_2 := 1.3$$

$$A_2 := z_2 \cdot y_2 = 0.195$$

$$z_{c2} := \frac{z_2}{2} = 0.075$$

$$y_{c2} := y_1 + \frac{y_2}{2} = 0.85$$

Segment 3

$$z_3 := 0.2$$

$$y_3 := 1.3$$

$$A_3 := z_3 \cdot \frac{y_3}{2} = 0.13$$

$$z_{c3} := z_2 + z_3 \cdot \left(\frac{1}{3}\right) = 0.2167$$

$$y_{c3} := y_1 + y_3 \cdot \left(\frac{1}{3}\right) = 0.6333$$

Segment 4

$$z_4 := 0.15$$

$$y_4 := 2.05$$

$$A_4 := z_4 \cdot y_4 = 0.3075$$

$$z_{c4} := \frac{z_4}{2} = 0.075$$

$$y_{c4} := y_1 + y_2 + \frac{y_4}{2} = 2.525$$

Segment 5

$$z_5 := 0.15$$

$$y_5 := 1.3$$

$$A_5 := z_5 \cdot y_5 = 0.195$$

$$z_{c5} := \frac{z_5}{2} = 0.075$$

$$y_{c5} := y_1 + y_2 + y_4 + \frac{y_5}{2} = 4.2$$

Segment 6

$$z_6 := 0.2$$

$$y_6 := 1.3$$

$$A_6 := z_6 \cdot \frac{y_6}{2} = 0.13$$

$$z_{c6} := z_5 + z_6 \cdot \left(\frac{1}{3}\right) = 0.2167$$

$$y_{c6} := y_1 + y_2 + y_4 + y_6 \cdot \left(\frac{2}{3}\right) = 4.4167$$

Segment 7

$$z_7 := 2.354$$

$$y_7 := 0.4$$

$$A_7 := z_7 \cdot y_7 = 0.9416$$

$$z_{c7} := \frac{z_7}{2} = 1.177$$

$$y_{c7} := y_1 + y_2 + y_4 + y_5 + \frac{y_7}{2} = 5.05$$

Segment 8

$$z_8 := 0.0325$$

$$y_8 := 1.3$$

$$A_8 := z_8 \cdot \frac{y_8}{2} = 0.0211$$

$$z_{c8} := z_1 - z_8 \cdot \left(\frac{2}{3}\right) = 2.4543$$

$$y_{c8} := y_1 + y_8 \cdot \left(\frac{1}{3}\right) = 0.6333$$

Segment 9

$$z_9 := 0.22$$

$$y_9 := 1.3$$

$$A_9 := z_9 \cdot y_9 = 0.286$$

$$z_{c9} := z_1 - z_8 - \frac{z_9}{2} = 2.3335$$

$$y_{c9} := y_1 + \frac{y_9}{2} = 0.85$$

Segment 10

$$z_{10} := 0.0975$$

$$y_{10} := 1.3$$

$$A_{10} := z_{10} \cdot \frac{y_{10}}{2} = 0.0634$$

$$z_{c10} := z_1 - z_8 - z_9 - z_{10} \cdot \left(\frac{1}{3}\right) = 2.191$$

$$y_{c10} := y_1 + y_{10} \cdot \left(\frac{1}{3}\right) = 0.6333$$

Segment 11

$$z_{11} := 0.05125$$

$$y_{11} := 2.05$$

$$A_{11} := z_{11} \cdot \frac{y_{11}}{2} = 0.0525$$

$$z_{c11} := z_1 - z_8 - z_9 - z_{11} \cdot \left(\frac{1}{3}\right) = 2.2064$$

$$y_{c11} := y_1 + y_9 + y_{11} \cdot \left(\frac{2}{3}\right) = 2.8667$$

Segment 12

$$z_{12} := 0.16875$$

$$y_{12} := 2.05$$

$$A_{12} := z_{12} \cdot y_{12} = 0.3459$$

$$z_{c12} := z_1 - z_8 - z_9 + \frac{z_{12}}{2} = 2.3079$$

$$y_{c12} := y_1 + y_9 + \frac{y_{12}}{2} = 2.525$$

Segment 13

$$z_{13} := 0.05125$$

$$y_{13} := 2.05$$

$$A_{13} := z_{13} \cdot \frac{y_{13}}{2} = 0.0525$$

$$z_{c13} := z_1 - z_8 - z_{13} \cdot \left(\frac{2}{3}\right) = 2.4093$$

$$y_{c13} := y_1 + y_9 + y_{13} \cdot \left(\frac{1}{3}\right) = 2.1833$$

Segment 14

$$z_{14} := 0.0325$$

$$y_{14} := 1.3$$

$$A_{14} := z_{14} \cdot \frac{y_{14}}{2} = 0.0211$$

$$z_{c14} := z_1 - z_8 - z_{13} - z_{14} \cdot \left(\frac{2}{3}\right) = 2.3706$$

$$y_{c14} := y_1 + y_9 + y_{12} + y_{14} \cdot \left(\frac{1}{3}\right) = 3.9833$$

Segment 15

$$z_{15} := 0.1875$$

$$y_{15} := 1.3$$

$$A_{15} := z_{15} \cdot y_{15} = 0.2438$$

$$z_{c15} := z_1 - z_8 - z_{13} - z_{14} - \frac{z_{15}}{2} = 2.266$$

$$y_{c15} := y_1 + y_9 + y_{12} + \frac{y_{15}}{2} = 4.2$$

Segment 16

$$z_{16} := 0.1625$$

$$y_{16} := 1.3$$

$$A_{16} := z_{16} \cdot \frac{y_{16}}{2} = 0.1056$$

$$z_{c16} := z_1 - z_8 - z_{13} - z_{14} - z_{15} - z_{16} \cdot \left(\frac{1}{3}\right) = 2.1181$$

$$z_{c17} := z_7 + z_{17} \cdot \left(\frac{1}{3}\right) = 2.3704$$

$$y_{c16} := y_1 + y_9 + y_{12} + y_{16} \cdot \left(\frac{2}{3}\right) = 4.4167$$

$$y_{c17} := y_1 + y_2 + y_4 + y_5 + y_7 + y_{17} \cdot \left(\frac{2}{3}\right) = 6.89$$

Segment 17

$$z_{17} := 0.0492$$

$$y_{17} := 2.46$$

$$A_{17} := z_{17} \cdot \frac{y_{17}}{2} = 0.0605$$

Segment 18

$$z_{18} := 0.0608$$

$$y_{18} := 2.46$$

$$A_{18} := z_{18} \cdot y_{18} = 0.1496$$

$$z_{c18} := z_7 - \frac{z_{18}}{2} = 2.3236$$

$$y_{c18} := y_1 + y_2 + y_4 + y_5 + y_7 + \frac{y_{18}}{2} = 6.48$$

Segment 19

$$z_{19} := 0.1432$$

$$y_{19} := 2.46$$

$$A_{19} := z_{19} \cdot \frac{y_{19}}{2} = 0.1761$$

$$z_{c19} := z_7 - z_{18} - z_{19} \cdot \left(\frac{1}{3}\right) = 2.2455$$

$$y_{c19} := y_1 + y_2 + y_4 + y_5 + y_7 + y_{19} \cdot \left(\frac{1}{3}\right) = 6.07$$

Segment 20

$$z_{20} := 0.2$$

$$y_{20} := 0.05$$

$$A_{20} := z_{20} \cdot \frac{y_{20}}{2} = 0.005$$

$$z_{c20} := z_7 + z_{20} \cdot \left(\frac{1}{3}\right) = 2.4207$$

$$y_{c20} := 5.15 + y_{20} \cdot \left(\frac{1}{3}\right) = 5.1667$$

Segment 21

$$z_{21} := 0.2$$

$$y_{21} := 0.35$$

$$A_{21} := z_{21} \cdot y_{21} = 0.07$$

$$z_{c21} := z_7 + \frac{z_{21}}{2} = 2.454$$

$$y_{c21} := 5.15 - \frac{y_{21}}{2} = 4.975$$

Segment 22

$$z_{22} := 0.2$$

$$y_{22} := 0.07$$

$$A_{22} := z_{22} \cdot \frac{y_{22}}{2} = 0.007$$

$$z_{c22} := z_7 + z_{22} \cdot \left(\frac{1}{3}\right) = 2.4207$$

$$y_{c22} := 5.15 - y_{21} - y_{22} \cdot \left(\frac{1}{3}\right) = 4.7767$$

Segment 23

$$z_{23} := 0.15$$

$$y_{23} := 0.21$$

$$A_{23} := z_{23} \cdot y_{23} = 0.0315$$

$$z_{c23} := z_7 + z_{17} + \frac{z_{23}}{2} = 2.4782$$

$$y_{c23} := 5.15 + 2.56 - \frac{y_{23}}{2} = 7.605$$

Segment 24

$$z_{24} := 0.15$$

$$y_{24} := 0.05$$

$$A_{24} := z_{24} \cdot \frac{y_{24}}{2} = 0.0038$$

$$z_{c24} := z_7 + z_{17} + z_{24} \cdot \left(\frac{1}{3}\right) = 2.4532$$

$$y_{c24} := 5.15 + 2.56 - y_{23} - y_{24} \cdot \left(\frac{1}{3}\right) = 7.4833$$

Segment 25

$$z_{25} := 0.35$$

$$y_{25} := 0.04$$

$$A_{25} := z_{25} \cdot y_{25} = 0.014$$

$$z_{c25} := z_7 + z_{17} + z_{23} - \frac{z_{25}}{2} = 2.3782$$

$$y_{c25} := 5.15 + 2.56 + \frac{y_{25}}{2} = 7.73$$

Area center of the cross section

$$\Sigma z_i A_i := 2 \cdot (z_{c1} \cdot A_1 + z_{c2} \cdot A_2 + z_{c3} \cdot A_3 + z_{c4} \cdot A_4 + z_{c5} \cdot A_5 + z_{c6} \cdot A_6 + z_{c7} \cdot A_7 + z_{c8} \cdot A_8 + z_{c9} \cdot A_9)$$

$$\Sigma y_i A_i := 0$$

$$\Sigma A_i := 2 \cdot (A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6 + A_7 + A_8 + A_9 + A_{10} + A_{11} + A_{12} + A_{13} + A_{14} + A_{15} + A_{16} + A_{17} + A_{18} + A_{19} + A_{20} + A_{21} + A_{22} + A_{23} + A_{24} + A_{25})$$

$$A := \Sigma A_i = 8.2075$$

Overall area of the cross section [m²]

$$z_c := \frac{\Sigma z_i A_i}{\Sigma A_i} = 1.4043$$

Area center of the cross section, relative to global reference point [m]

$$y_c := \frac{\Sigma y_i A_i}{\Sigma A_i} = 0$$

Second moment of area I_y

Rectangles (segment 1,2,4,5,7,9,12,15,18,21,23,25):

$$I_{y_1} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot y_1 \cdot (z_1)^3 + (z_c1 - z_c)^2 \cdot A_1 = 0.2667$$

$$I_{y_2} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot y_2 \cdot (z_2)^3 + (z_c2 - z_c)^2 \cdot A_2 = 0.3449$$

$$I_{y_4} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot y_4 \cdot (z_4)^3 + (z_c4 - z_c)^2 \cdot A_4 = 0.5439$$

$$I_{y_5} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot y_5 \cdot (z_5)^3 + (z_c5 - z_c)^2 \cdot A_5 = 0.3449$$

$$I_{y_7} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot y_7 \cdot (z_7)^3 + (z_c7 - z_c)^2 \cdot A_7 = 0.4835$$

$$I_{y_9} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot y_9 \cdot (z_9)^3 + (z_c9 - z_c)^2 \cdot A_9 = 0.2481$$

$$I_{y_12} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot y_12 \cdot (z_12)^3 + (z_c12 - z_c)^2 \cdot A_12 = 0.2833$$

$$I_{y_15} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot y_15 \cdot (z_15)^3 + (z_c15 - z_c)^2 \cdot A_15 = 0.1817$$

$$I_{y_18} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot y_18 \cdot (z_18)^3 + (z_c18 - z_c)^2 \cdot A_18 = 0.1264$$

$$I_{y_21} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot y_21 \cdot (z_21)^3 + (z_c21 - z_c)^2 \cdot A_21 = 0.0774$$

$$I_{y_23} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot y_23 \cdot (z_23)^3 + (z_c23 - z_c)^2 \cdot A_23 = 0.0364$$

$$I_{y_25} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot y_25 \cdot (z_25)^3 + (z_c25 - z_c)^2 \cdot A_25 = 0.0134$$

Triangles (segment 3,6,8,10,11,13,14,16,17,19,20,22,24):

$$I_{y_3} := \left(\frac{1}{36}\right) \cdot y_3 \cdot (z_3)^3 + (z_c3 - z_c)^2 \cdot A_3 = 0.1836$$

$$I_{y_6} := \left(\frac{1}{36}\right) \cdot y_6 \cdot (z_6)^3 + (z_c6 - z_c)^2 \cdot A_6 = 0.1836$$

$$I_{y_8} := \left(\frac{1}{36}\right) \cdot y_8 \cdot (z_8)^3 + (z_c8 - z_c)^2 \cdot A_8 = 0.0233$$

$$I_{y_10} := \left(\frac{1}{36}\right) \cdot y_10 \cdot (z_10)^3 + (z_c10 - z_c)^2 \cdot A_10 = 0.0393$$

$$I_{y_11} := \left(\frac{1}{36}\right) \cdot y_11 \cdot (z_11)^3 + (z_c11 - z_c)^2 \cdot A_11 = 0.0338$$

$$I_{y_13} := \left(\frac{1}{36}\right) \cdot y_13 \cdot (z_13)^3 + (z_c13 - z_c)^2 \cdot A_13 = 0.0531$$

$$I_{y_14} := \left(\frac{1}{36}\right) \cdot y_14 \cdot (z_14)^3 + (z_c14 - z_c)^2 \cdot A_14 = 0.0197$$

$$I_{y_16} := \left(\frac{1}{36}\right) \cdot y_16 \cdot (z_16)^3 + (z_c16 - z_c)^2 \cdot A_16 = 0.054$$

$$Iy_{17} := \left(\frac{1}{36}\right) \cdot y_{17} \cdot (z_{17})^3 + (z_{c17} - z_c)^2 \cdot A_{17} = 0.0565$$

$$Iy_{19} := \left(\frac{1}{36}\right) \cdot y_{19} \cdot (z_{19})^3 + (z_{c19} - z_c)^2 \cdot A_{19} = 0.1248$$

$$Iy_{20} := \left(\frac{1}{36}\right) \cdot y_{20} \cdot (z_{20})^3 + (z_{c20} - z_c)^2 \cdot A_{20} = 0.0052$$

$$Iy_{22} := \left(\frac{1}{36}\right) \cdot y_{22} \cdot (z_{22})^3 + (z_{c22} - z_c)^2 \cdot A_{22} = 0.0072$$

$$Iy_{24} := \left(\frac{1}{36}\right) \cdot y_{24} \cdot (z_{24})^3 + (z_{c24} - z_c)^2 \cdot A_{24} = 0.0041$$

Overall second moment of area Iy of the cross section:

$$Iy := 2 \cdot (Iy_1 + Iy_2 + Iy_3 + Iy_4 + Iy_5 + Iy_6 + Iy_7 + Iy_8 + Iy_9 + Iy_{10} + Iy_{11} + Iy_{12} + Iy_{13} + Iy_{14} + Iy_{15} + Iy_{16} + Iy_{17} + Iy_{18} + Iy_{19} + Iy_{20} + Iy_{21} + Iy_{22} + Iy_{23} + Iy_{24} + Iy_{25})$$

$$Iy = 7.4778 \quad [m^4]$$

Second moment of area Iz

Rectangles (segment 1,2,4,5,7,9,12,15,18,21,23,25):

$$Iz_1 := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot z_1 \cdot (y_1)^3 + (y_{c1} - y_c)^2 \cdot A_1 = 0.0066$$

$$Iz_2 := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot z_2 \cdot (y_2)^3 + (y_{c2} - y_c)^2 \cdot A_2 = 0.1684$$

$$Iz_4 := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot z_4 \cdot (y_4)^3 + (y_{c4} - y_c)^2 \cdot A_4 = 2.0682$$

$$Iz_5 := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot z_5 \cdot (y_5)^3 + (y_{c5} - y_c)^2 \cdot A_5 = 3.4673$$

$$Iz_7 := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot z_7 \cdot (y_7)^3 + (y_{c7} - y_c)^2 \cdot A_7 = 24.0257$$

$$Iz_9 := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot z_9 \cdot (y_9)^3 + (y_{c9} - y_c)^2 \cdot A_9 = 0.2469$$

$$Iz_{12} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot z_{12} \cdot (y_{12})^3 + (y_{c12} - y_c)^2 \cdot A_{12} = 2.3267$$

$$Iz_{15} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot z_{15} \cdot (y_{15})^3 + (y_{c15} - y_c)^2 \cdot A_{15} = 4.3341$$

$$Iz_{18} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot z_{18} \cdot (y_{18})^3 + (y_{c18} - y_c)^2 \cdot A_{18} = 6.3558$$

$$Iz_{21} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot z_{21} \cdot (y_{21})^3 + (y_{c21} - y_c)^2 \cdot A_{21} = 1.7333$$

$$Iz_{23} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot z_{23} \cdot (y_{23})^3 + (y_{c23} - y_c)^2 \cdot A_{23} = 1.822$$

$$Iz_{25} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot z_{25} \cdot (y_{25})^3 + (y_{c25} - y_c)^2 \cdot A_{25} = 0.8365$$

Triangles (segment 3,6,8,10,11,13,14,16,17,19,20,22,24):

$$Iz_3 := \left(\frac{1}{36}\right) \cdot z_3 \cdot (y_3)^3 + (y_{c3} - y_c)^2 \cdot A_3 = 0.0644$$

$$Iz_6 := \left(\frac{1}{36}\right) \cdot z_6 \cdot (y_6)^3 + (y_{c6} - y_c)^2 \cdot A_6 = 2.5481$$

$$Iz_8 := \left(\frac{1}{36}\right) \cdot z_8 \cdot (y_8)^3 + (y_{c8} - y_c)^2 \cdot A_8 = 0.0105$$

$$Iz_{10} := \left(\frac{1}{36}\right) \cdot z_{10} \cdot (y_{10})^3 + (y_{c10} - y_c)^2 \cdot A_{10} = 0.0314$$

$$Iz_{11} := \left(\frac{1}{36}\right) \cdot z_{11} \cdot (y_{11})^3 + (y_{c11} - y_c)^2 \cdot A_{11} = 0.444$$

$$Iz_{13} := \left(\frac{1}{36}\right) \cdot z_{13} \cdot (y_{13})^3 + (y_{c13} - y_c)^2 \cdot A_{13} = 0.2627$$

$$Iz_{14} := \left(\frac{1}{36}\right) \cdot z_{14} \cdot (y_{14})^3 + (y_{c14} - y_c)^2 \cdot A_{14} = 0.3372$$

$$Iz_{16} := \left(\frac{1}{36}\right) \cdot z_{16} \cdot (y_{16})^3 + (y_{c16} - y_c)^2 \cdot A_{16} = 2.0703$$

$$Iz_{17} := \left(\frac{1}{36}\right) \cdot z_{17} \cdot (y_{17})^3 + (y_{c17} - y_c)^2 \cdot A_{17} = 2.8932$$

$$Iz_{19} := \left(\frac{1}{36}\right) \cdot z_{19} \cdot (y_{19})^3 + (y_{c19} - y_c)^2 \cdot A_{19} = 6.5489$$

$$Iz_{20} := \left(\frac{1}{36}\right) \cdot z_{20} \cdot (y_{20})^3 + (y_{c20} - y_c)^2 \cdot A_{20} = 0.1335$$

$$Iz_{22} := \left(\frac{1}{36}\right) \cdot z_{22} \cdot (y_{22})^3 + (y_{c22} - y_c)^2 \cdot A_{22} = 0.1597$$

$$Iz_{24} := \left(\frac{1}{36}\right) \cdot z_{24} \cdot (y_{24})^3 + (y_{c24} - y_c)^2 \cdot A_{24} = 0.21$$

Overall second moment of area Iz of the cross section:

$$Iz := 2 \cdot (Iz_1 + Iz_2 + Iz_3 + Iz_4 + Iz_5 + Iz_6 + Iz_7 + Iz_8 + Iz_9 + Iz_{10} + Iz_{11} + Iz_{12} + Iz_{13} + Iz_{14} + Iz_{15} + Iz_{16} + Iz_{17} + Iz_{18} + Iz_{19} + Iz_{20} + Iz_{21} + Iz_{22} + Iz_{23} + Iz_{24})$$

$$Iz = 126.2103 \quad [m^4]$$

Torsional constant

Assuming a rectangular two-cell hollow section

(Formula from "Torsion in Structures: An Engineering Approach")

$t_b := 0.2$ Thickness of width wall

$t_h := 0.4$ Thickness of height wall

$b := (0.4 + 1.3 + 2.05 + 1.3 + 0.4) - t_h = 5.05$ Width for one cell

$h := (0.35 + 1.776 + 0.35) - t_b = 2.276$ Height for one cell

$$\eta_{11} := t_b \cdot (b + b) + t_h \cdot (h + h) = 3.8408$$

$$\eta_{12} := t_h \cdot h = 0.9104$$

$$\eta_{22} := t_b \cdot (b + b) + t_h \cdot (h + h) = 3.8408$$

$$A_1 := b \cdot h = 11.4938$$

$$A_2 := b \cdot h = 11.4938$$

$$J := 4 \cdot \frac{(A_1^2 \cdot \eta_{22} + 2 \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot \eta_{12} + A_2^2 \cdot \eta_{11})}{(\eta_{11} \cdot \eta_{22} - \eta_{12}^2)} = 360.6537 \quad [\text{m}^4]$$

Effective density of the concrete deck

$\rho_{concrete} := 2500$ Density of the material [kg/m³]

$L_{total} := 120.0368$ The total length of the concrete deck, from the Abaqus-model [m]

$A = 8.2075$ Area of the concrete deck [m²]

Extra mass from asphalt (estimate from original calculations):

$m_{extra} := 1800$ [kg/m]

*Asfalt
+div
-1/m
1,8*

$$\rho' := \rho_{concrete} + \frac{L_{total} \cdot m_{extra}}{L_{total} \cdot A} = 2.7193 \cdot 10^3 \quad [\text{kg/m}^3]$$

Total mass of the concrete deck:

$$m := \rho_{concrete} \cdot L_{total} \cdot A = 2.463 \cdot 10^6 \quad [\text{kg}]$$

Mass moment of inertia

Uniform material density for the whole cross section, thus:

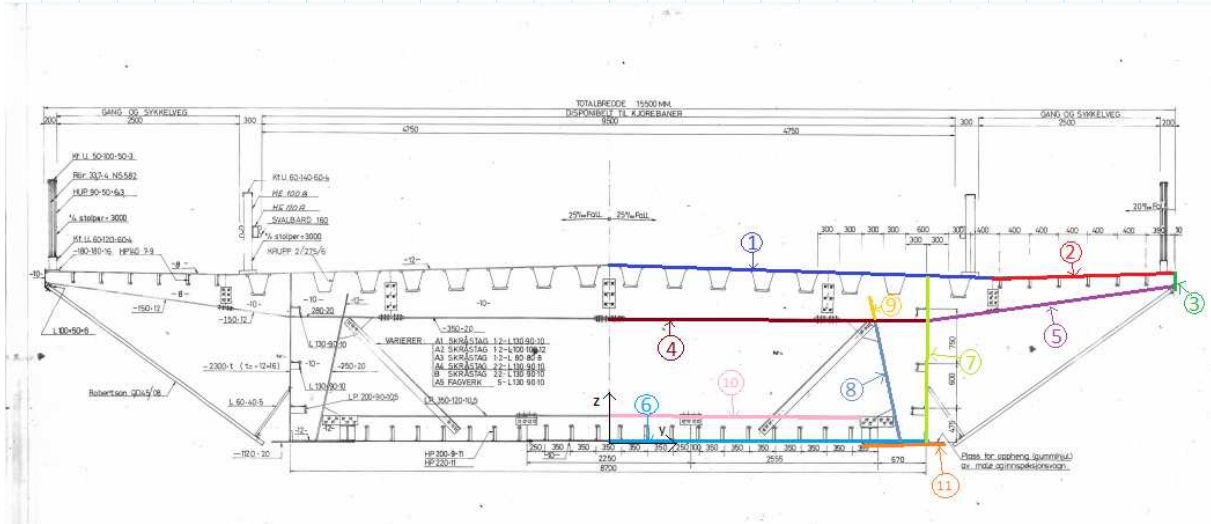
$$Imy := \rho' \cdot Iy = 2.0335 \cdot 10^4 \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{m}]$$

$$Imz := \rho' \cdot Iz = 3.432 \cdot 10^5 \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{m}]$$

$$Imx := \rho' \cdot (Iy + Iz) = 3.6354 \cdot 10^5 \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{m}]$$

Mechanical properties of steel deck

Cross section:



- $H := 2450$ Height of the deck [mm], from origin (0,0) to top of segment 1
- $H_4 := 1650$ Height [mm], from origin (0,0) to top of segment 4
- $H_{10} := 350$ Height [mm], from origin (0,0) to top of segment 10

Plate thicknesses are estimated from data of the mounted deck sections

In this calculation, the plate thicknesses are generally assumed to be extruded inside of the deck from the lines

Segment 1

$$\begin{aligned}d_1 &:= 12.9 && \text{Plate thickness [mm]} \\ \alpha_1 &:= \text{atan}(0.025) = 0.025 && \text{Angle of inclination of line segment with respect to horizontal line [rad]} \\ \Delta y_1 &:= 5250 && \text{Segment lengths with respect to y and z [mm]} \\ \Delta z_1 &:= \Delta y_1 \cdot \tan(\alpha_1) = 131.25 \\ \\ L_1 &:= \sqrt{((\Delta y_1)^2 + (\Delta z_1)^2)} = 5.2516 \cdot 10^3 && \text{Length of line segment [mm]} \\ \\ y_{1'} &:= \frac{(\Delta y_1)}{2} = 2.625 \cdot 10^3 && \text{Coordinates of midpoint of each line segment with} \\ &&& \text{respect to global reference point [mm]} \\ z_{1'} &:= H - \frac{(\Delta z_1)}{2} = 2.3844 \cdot 10^3 \\ \\ A_1 &:= L_1 \cdot d_1 = 6.7746 \cdot 10^4 && \text{Area of plate segment [mm}^2\text{]} \end{aligned}$$

Segment 2

$$\begin{aligned}d_2 &:= 9.1 \\ \alpha_2 &:= \text{atan}(0.020) = 0.02 \\ \Delta y_2 &:= 2500 \\ \Delta z_2 &:= \Delta y_2 \cdot \tan(\alpha_2) = 50 \\ \\ L_2 &:= \sqrt{((\Delta y_2)^2 + (\Delta z_2)^2)} = 2.5005 \cdot 10^3 \\ \\ y_{2'} &:= (\Delta y_1) + \frac{(\Delta y_2)}{2} = 6.5 \cdot 10^3 \\ z_{2'} &:= H - (\Delta z_1) + \frac{(\Delta z_2)}{2} = 2.3438 \cdot 10^3 \\ \\ A_2 &:= L_2 \cdot d_2 = 2.2755 \cdot 10^4 \end{aligned}$$

Segment 3

$$\begin{aligned}d_3 &:= 10 \\ \alpha_3 &:= 90 \cdot \frac{\pi}{180} = 1.5708 \\ \Delta y_3 &:= 0 \\ \Delta z_3 &:= 200 \\ \\ L_3 &:= \sqrt{((\Delta y_3)^2 + (\Delta z_3)^2)} = 200 \\ \\ y_{3'} &:= (\Delta y_1) + (\Delta y_2) + \frac{(\Delta y_3)}{2} = 7.75 \cdot 10^3 \\ z_{3'} &:= H - (\Delta z_1) + (\Delta z_2) - \frac{(\Delta z_3)}{2} = 2.2688 \cdot 10^3 \\ \\ A_3 &:= L_3 \cdot d_3 = 2 \cdot 10^3 \end{aligned}$$

Segment 4

$$d_4 := 20$$

$$\alpha_4 := 0 = 0$$

$$\Delta y_4 := 4350$$

$$\Delta z_4 := \Delta y_4 \cdot \tan(\alpha_4) = 0$$

$$L_4 := \sqrt{((\Delta y_4)^2 + (\Delta z_4)^2)} = 4.35 \cdot 10^3$$

$$y_{4'} := \frac{(\Delta y_4)}{2} = 2.175 \cdot 10^3$$

$$z_{4'} := H_4 = 1.65 \cdot 10^3$$

$$A_4 := L_4 \cdot d_4 = 8.7 \cdot 10^4$$

Segment 5

$$d_5 := 12$$

$$\Delta y_5 := ((\Delta y_1) + (\Delta y_2) + (\Delta y_3)) - \Delta y_4 = 3.4 \cdot 10^3$$

$$\Delta z_5 := (H - (\Delta z_1) + (\Delta z_2) - (\Delta z_3)) - H_4 = 518.75$$

$$\alpha_5 := \text{atan}\left(\frac{\Delta z_5}{\Delta y_5}\right) = 0.1514$$

$$L_5 := \sqrt{((\Delta y_5)^2 + (\Delta z_5)^2)} = 3.4393 \cdot 10^3$$

$$y_{5'} := (\Delta y_4) + \frac{(\Delta y_5)}{2} = 6.05 \cdot 10^3$$

$$z_{5'} := H_4 + \frac{(\Delta z_5)}{2} = 1.9094 \cdot 10^3$$

$$A_5 := L_5 \cdot d_5 = 4.1272 \cdot 10^4$$

Segment 6

$$d_6 := 8.2$$

$$\alpha_6 := 0 = 0$$

$$\Delta y_6 := \Delta y_4 = 4.35 \cdot 10^3$$

$$\Delta z_6 := \Delta y_6 \cdot \tan(\alpha_4) = 0$$

$$L_6 := \sqrt{((\Delta y_6)^2 + (\Delta z_6)^2)} = 4.35 \cdot 10^3$$

$$y_{6'} := \frac{(\Delta y_6)}{2} = 2.175 \cdot 10^3$$

$$z_{6'} := \frac{(\Delta z_6)}{2} = 0$$

$$A_6 := L_6 \cdot d_6 = 3.567 \cdot 10^4$$

Segment 7

$$d_7 := 13.6$$

$$\alpha_7 := 90 \cdot \frac{\pi}{180} = 1.5708$$

$$\Delta y_7 := 0 = 0$$

$$\Delta z_7 := H - \Delta y_6 \cdot \tan(\alpha_1) = 2.3413 \cdot 10^3$$

$$L_7 := \sqrt{((\Delta y_7)^2 + (\Delta z_7)^2)} = 2.3413 \cdot 10^3$$

$$y_{7'} := (\Delta y_6) + \frac{(\Delta y_7)}{2} = 4.35 \cdot 10^3$$

$$z_{7'} := \frac{(\Delta z_7)}{2} = 1.1706 \cdot 10^3$$

$$A_7 := L_7 \cdot d_7 = 3.1841 \cdot 10^4$$

Segment 8

$$d_8 := 20$$

$$\Delta y_8 := 700 - 350 = 350$$

$$\Delta z_8 := H_4 = 1.65 \cdot 10^3$$

$$\alpha_8 := \text{atan}\left(\frac{\Delta z_8}{\Delta y_8}\right) = 1.3618$$

$$L_8 := \sqrt{((\Delta y_8)^2 + (\Delta z_8)^2)} = 1.6867 \cdot 10^3$$

$$y_{8'} := \Delta y_6 - 350 - \frac{\Delta y_8}{2} = 3.825 \cdot 10^3$$

$$z_{8'} := \frac{(\Delta z_8)}{2} = 825$$

$$A_8 := L_8 \cdot d_8 = 3.3734 \cdot 10^4$$

Segment 9

$$d_9 := 12$$

$$\alpha_9 := \alpha_8 = 1.3618$$

$$L_9 := 300 = 300$$

$$\Delta y_9 := L_9 \cdot \cos(\alpha_9) = 62.2513$$

$$\Delta z_9 := L_9 \cdot \sin(\alpha_9) = 293.4702$$

$$y_{9'} := \Delta y_6 - 350 - \Delta y_8 - \frac{(\Delta y_9)}{2} = 3.475 \cdot 10^3$$

$$z_{9'} := H_4 + \frac{(\Delta z_9)}{2} = 1.7967 \cdot 10^3$$

$$A_9 := L_9 \cdot d_9 = 3.6 \cdot 10^3$$

Segment 10

$$d_{10} := 10.5$$

$$\alpha_{10} := 0 = 0$$

$$\Delta y_{10} := 3500 = 3.5 \cdot 10^3$$

$$\Delta z_{10} := 0 = 0$$

$$L_{10} := \sqrt{((\Delta y_{10})^2 + (\Delta z_{10})^2)} = 3.5 \cdot 10^3$$

$$y_{10}' := \frac{(\Delta y_{10})}{2} = 1.75 \cdot 10^3$$

$$z_{10}' := H_{10} = 350$$

$$A_{10} := L_{10} \cdot d_{10} = 3.675 \cdot 10^4$$

Segment 11

$$d_{11} := 20$$

$$\alpha_{11} := 0 = 0$$

$$\Delta y_{11} := 1120 = 1.12 \cdot 10^3$$

$$\Delta z_{11} := 0 = 0$$

$$L_{11} := \sqrt{((\Delta y_{11})^2 + (\Delta z_{11})^2)} = 1.12 \cdot 10^3$$

$$y_{11}' := \Delta y_6 - 670 - 190 + \frac{\Delta y_{11}}{2} = 4.05 \cdot 10^3$$

$$z_{11}' := 0 = 0$$

$$A_{11} := L_{11} \cdot d_{11} = 2.24 \cdot 10^4$$

Calculating the area center of the plates

Adjusting the midpoint coordinates of each segment by its extruded thickness from line

Segment 1

$$z_{_1} := z_{_1'} - \frac{d_{_1}}{2} \cdot \cos(\alpha_{_1}) = 2.3779 \cdot 10^3 \quad [\text{mm}]$$

$$y_{_1} := y_{_1'} - \frac{d_{_1}}{2} \cdot \sin(\alpha_{_1}) = 2.6248 \cdot 10^3 \quad [\text{mm}]$$

Segment 2

$$z_{_2} := z_{_2'} - \frac{d_{_2}}{2} \cdot \cos(\alpha_{_2}) = 2.3392 \cdot 10^3$$

$$y_{_2} := y_{_2'} + \frac{d_{_2}}{2} \cdot \sin(\alpha_{_2}) = 6.5001 \cdot 10^3$$

Segment 3

$$z_{_3} := z_{_3'} = 2.2688 \cdot 10^3$$

$$y_{_3} := y_{_3'} - \frac{d_{_3}}{2} \cdot \sin(\alpha_{_3}) = 7.745 \cdot 10^3$$

Segment 4

$$z_{_4} := z_{_4'} - \frac{d_{_4}}{2} \cdot \cos(\alpha_{_4}) = 1.64 \cdot 10^3$$

$$y_{_4} := y_{_4'} - \frac{d_{_4}}{2} \cdot \sin(\alpha_{_4}) = 2.175 \cdot 10^3$$

Segment 5

$$z_{_5} := z_{_5'} - \frac{d_{_5}}{2} \cdot \cos(\alpha_{_5}) = 1.9034 \cdot 10^3$$

$$y_{_5} := y_{_5'} + \frac{d_{_5}}{2} \cdot \sin(\alpha_{_5}) = 6.0509 \cdot 10^3$$

Segment 6

$$z_{_6} := z_{_6'} + \frac{d_{_6}}{2} \cdot \cos(\alpha_{_6}) = 4.1$$

$$y_{_6} := y_{_6'} = 2.175 \cdot 10^3$$

Segment 7

$$z_{_7} := z_{_7'} = 1.1706 \cdot 10^3$$

$$y_{_7} := y_{_7'} - \frac{d_{_7}}{2} \cdot \sin(\alpha_{_7}) = 4.3432 \cdot 10^3$$

Segment 8

$$z_8 := z_{8'} + \frac{d_8}{2} \cdot \cos(\alpha_8) = 827.075$$

$$y_8 := y_{8'} + \frac{d_8}{2} \cdot \sin(\alpha_8) = 3.8348 \cdot 10^3$$

Segment 9

$$z_9 := z_{9'} + \frac{d_9}{2} \cdot \cos(\alpha_9) = 1.798 \cdot 10^3$$

$$y_9 := y_{9'} + \frac{d_9}{2} \cdot \sin(\alpha_9) = 3.4809 \cdot 10^3$$

Segment 10

$$z_{10} := z_{10'} - \frac{d_{10}}{2} \cdot \cos(\alpha_{10}) = 344.75$$

$$y_{10} := y_{10'} = 1.75 \cdot 10^3$$

Segment 11

$$z_{11} := z_{11'} - \frac{d_{11}}{2} \cdot \cos(\alpha_{10}) = -10$$

$$y_{11} := y_{11'} = 4.05 \cdot 10^3$$

Effective factors of segments:

Some segments are not plates that go along the entire bridge deck length. Therefore, effective factors are utilized to calculate the area and stiffness contributions of each segment for the average cross section of the bridge deck.

A factor of 1 means the segment is assumed to go through the entire bridge deck.

$$\Delta := \frac{1}{3000} \quad \text{Inverted distance between the "beam" elements}$$

$$\gamma_1 := 1$$

$$\gamma_2 := 1$$

$$\gamma_3 := 1$$

$$\gamma_4 := 340 \cdot \Delta = 0.1133$$

$$\gamma_5 := 150 \cdot \Delta = 0.05$$

$$\gamma_6 := 1$$

$$\gamma_7 := 1$$

$$\gamma_8 := 250 \cdot \Delta = 0.0833$$

$$\gamma_9 := 150 \cdot \Delta = 0.05$$

$$\gamma_{10} := 350 \cdot \Delta = 0.1167$$

$$\gamma_{11} := 1$$

Area center of the plates:

$$\Sigma z_i A_i \text{ plates} := 2 \cdot (z_1 \cdot A_1 \cdot \gamma_1 + z_2 \cdot A_2 \cdot \gamma_2 + z_3 \cdot A_3 \cdot \gamma_3 + z_4 \cdot A_4 \cdot \gamma_4 + z_5 \cdot A_5 \cdot \gamma_5 + z_6 \cdot A_6 \cdot \gamma_6 + z_7 \cdot A_7 \cdot \gamma_7 + z_8 \cdot A_8 \cdot \gamma_8 + z_9 \cdot A_9 \cdot \gamma_9)$$

$$A_{\text{plates}} := 2 \cdot (A_1 \cdot \gamma_1 + A_2 \cdot \gamma_2 + A_3 \cdot \gamma_3 + A_4 \cdot \gamma_4 + A_5 \cdot \gamma_5 + A_6 \cdot \gamma_6 + A_7 \cdot \gamma_7 + A_8 \cdot \gamma_8 + A_9 \cdot \gamma_9)$$

$$A_{\text{plates}} = 4.0323 \cdot 10^5 \quad [\text{mm}^2]$$

$$A_{\text{plates}} \cdot 10^{-6} = 0.4032 \quad [\text{m}^2]$$

$$z_{\text{plates}} := \frac{\Sigma z_i A_i \text{ plates}}{A_{\text{plates}}} = 1.3902 \cdot 10^3 \quad [\text{mm}]$$

$$y_{\text{plates}} := 0 \quad [\text{mm}]$$

Calculating the 2nd moment of area of the deck

Segment 1

$$I'_{y_1} := \left(\frac{1}{12} \right) \cdot L_1 \cdot (d_1)^3 = 9.3947 \cdot 10^5 \quad [\text{mm}^4]$$

$$I'_{z_1} := \left(\frac{1}{12} \right) \cdot d_1 \cdot (L_1)^3 = 1.557 \cdot 10^{11} \quad [\text{mm}^4]$$

Rotate and translate with respect to c.g. of the plates:

$$I_{y_1} := 2 \cdot \left(I'_{y_1} \cdot (\cos(\alpha_1))^2 + I'_{z_1} \cdot (\sin(\alpha_1))^2 + A_1 \cdot (z_1 - z_{\text{plates}})^2 \right) = 1.3239 \cdot 10^{11} \quad [\text{mm}^4]$$

$$I_{z_1} := 2 \cdot \left(I'_{y_1} \cdot (\sin(\alpha_1))^2 + I'_{z_1} \cdot (\cos(\alpha_1))^2 + A_1 \cdot (y_1 - y_{\text{plates}})^2 \right) = 1.2447 \cdot 10^{12} \quad [\text{mm}^4]$$

Segment 2

$$I'_{y_2} := \left(\frac{1}{12} \right) \cdot L_2 \cdot (d_2)^3 = 1.5703 \cdot 10^5$$

$$I'_{z_2} := \left(\frac{1}{12} \right) \cdot d_2 \cdot (L_2)^3 = 1.1856 \cdot 10^{10}$$

Rotate and translate with respect to c.g. of the plates:

$$I_{y_2} := 2 \cdot \left(I'_{y_2} \cdot (\cos(\alpha_2))^2 + I'_{z_2} \cdot (\sin(\alpha_2))^2 + A_2 \cdot (z_2 - z_{\text{plates}})^2 \right) = 4.0996 \cdot 10^{10}$$

$$I_{z_2} := 2 \cdot \left(I'_{y_2} \cdot (\sin(\alpha_2))^2 + I'_{z_2} \cdot (\cos(\alpha_2))^2 + A_2 \cdot (y_2 - y_{\text{plates}})^2 \right) = 1.9465 \cdot 10^{12}$$

Segment 3

$$I'_{y_3} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot L_3 \cdot (d_3)^3 = 1.6667 \cdot 10^4$$

$$I'_{z_3} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot d_3 \cdot (L_3)^3 = 6.6667 \cdot 10^6$$

Rotate and translate with respect to c.g. of the plates:

$$I_{y_3} := 2 \cdot \left(I'_{y_3} \cdot (\cos(\alpha_3))^2 + I'_{z_3} \cdot (\sin(\alpha_3))^2 + A_3 \cdot (z_3 - z_{plates})^2 \right) = 3.1008 \cdot 10^9$$

$$I_{z_3} := 2 \cdot \left(I'_{y_3} \cdot (\sin(\alpha_3))^2 + I'_{z_3} \cdot (\cos(\alpha_3))^2 + A_3 \cdot (y_3 - y_{plates})^2 \right) = 2.3994 \cdot 10^{11}$$

Segment 4

$$I'_{y_4} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot L_4 \cdot (d_4)^3 = 2.9 \cdot 10^6$$

$$I'_{z_4} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot d_4 \cdot (L_4)^3 = 1.3719 \cdot 10^{11}$$

Rotate and translate with respect to c.g. of the plates:

$$I_{y_4} := 2 \cdot \left(I'_{y_4} \cdot (\cos(\alpha_4))^2 + I'_{z_4} \cdot (\sin(\alpha_4))^2 + A_4 \cdot (z_4 - z_{plates})^2 \right) = 1.0864 \cdot 10^{10}$$

$$I_{z_4} := 2 \cdot \left(I'_{y_4} \cdot (\sin(\alpha_4))^2 + I'_{z_4} \cdot (\cos(\alpha_4))^2 + A_4 \cdot (y_4 - y_{plates})^2 \right) = 1.0975 \cdot 10^{12}$$

Segment 5

$$I'_{y_5} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot L_5 \cdot (d_5)^3 = 4.9527 \cdot 10^5$$

$$I'_{z_5} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot d_5 \cdot (L_5)^3 = 4.0684 \cdot 10^{10}$$

Rotate and translate with respect to c.g. of the plates:

$$I_{y_5} := 2 \cdot \left(I'_{y_5} \cdot (\cos(\alpha_5))^2 + I'_{z_5} \cdot (\sin(\alpha_5))^2 + A_5 \cdot (z_5 - z_{plates})^2 \right) = 2.3597 \cdot 10^{10}$$

$$I_{z_5} := 2 \cdot \left(I'_{y_5} \cdot (\sin(\alpha_5))^2 + I'_{z_5} \cdot (\cos(\alpha_5))^2 + A_5 \cdot (y_5 - y_{plates})^2 \right) = 3.1017 \cdot 10^{12}$$

Segment 6

$$I'_{y_6} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot L_6 \cdot (d_6)^3 = 1.9987 \cdot 10^5$$

$$I'_{z_6} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot d_6 \cdot (L_6)^3 = 5.6247 \cdot 10^{10}$$

Rotate and translate with respect to c.g. of the plates:

$$I_{y_6} := 2 \cdot \left(I'_{y_6} \cdot (\cos(\alpha_6))^2 + I'_{z_6} \cdot (\sin(\alpha_6))^2 + A_6 \cdot (z_6 - z_{plates})^2 \right) = 1.3706 \cdot 10^{11}$$

$$I_{z_6} := 2 \cdot \left(I'_{y_6} \cdot (\sin(\alpha_6))^2 + I'_{z_6} \cdot (\cos(\alpha_6))^2 + A_6 \cdot (y_6 - y_{plates})^2 \right) = 4.4998 \cdot 10^{11}$$

Segment 7

$$I'y_7 := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot L_7 \cdot (d_7)^3 = 4.9078 \cdot 10^5$$

$$I'z_7 := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot d_7 \cdot (L_7)^3 = 1.4545 \cdot 10^{10}$$

Rotate and translate with respect to c.g. of the plates:

$$Iy_7 := 2 \cdot \left(I'y_7 \cdot (\cos(\alpha_7))^2 + I'z_7 \cdot (\sin(\alpha_7))^2 + A_7 \cdot (z_7 - z_{plates})^2 \right) = 3.2159 \cdot 10^{10}$$

$$Iz_7 := 2 \cdot \left(I'y_7 \cdot (\sin(\alpha_7))^2 + I'z_7 \cdot (\cos(\alpha_7))^2 + A_7 \cdot (y_7 - y_{plates})^2 \right) = 1.2013 \cdot 10^{12}$$

Segment 8

$$I'y_8 := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot L_8 \cdot (d_8)^3 = 1.1245 \cdot 10^6$$

$$I'z_8 := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot d_8 \cdot (L_8)^3 = 7.9978 \cdot 10^9$$

Rotate and translate with respect to c.g. of the plates:

$$Iy_8 := 2 \cdot \left(I'y_8 \cdot (\cos(\alpha_8))^2 + I'z_8 \cdot (\sin(\alpha_8))^2 + A_8 \cdot (z_8 - z_{plates})^2 \right) = 3.6701 \cdot 10^{10}$$

$$Iz_8 := 2 \cdot \left(I'y_8 \cdot (\sin(\alpha_8))^2 + I'z_8 \cdot (\cos(\alpha_8))^2 + A_8 \cdot (y_8 - y_{plates})^2 \right) = 9.9285 \cdot 10^{11}$$

Segment 9

$$I'y_9 := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot L_9 \cdot (d_9)^3 = 4.32 \cdot 10^4$$

$$I'z_9 := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot d_9 \cdot (L_9)^3 = 2.7 \cdot 10^7$$

Rotate and translate with respect to c.g. of the plates:

$$Iy_9 := 2 \cdot \left(I'y_9 \cdot (\cos(\alpha_9))^2 + I'z_9 \cdot (\sin(\alpha_9))^2 + A_9 \cdot (z_9 - z_{plates})^2 \right) = 1.249 \cdot 10^9$$

$$Iz_9 := 2 \cdot \left(I'y_9 \cdot (\sin(\alpha_9))^2 + I'z_9 \cdot (\cos(\alpha_9))^2 + A_9 \cdot (y_9 - y_{plates})^2 \right) = 8.7241 \cdot 10^{10}$$

Segment 10

$$I'y_{10} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot L_{10} \cdot (d_{10})^3 = 3.3764 \cdot 10^5$$

$$I'z_{10} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot d_{10} \cdot (L_{10})^3 = 3.7516 \cdot 10^{10}$$

Rotate and translate with respect to c.g. of the plates:

$$Iy_{10} := 2 \cdot \left(I'y_{10} \cdot (\cos(\alpha_{10}))^2 + I'z_{10} \cdot (\sin(\alpha_{10}))^2 + A_{10} \cdot (z_{10} - z_{plates})^2 \right) = 8.0332 \cdot 10^{10}$$

$$Iz_{10} := 2 \cdot \left(I'y_{10} \cdot (\sin(\alpha_{10}))^2 + I'z_{10} \cdot (\cos(\alpha_{10}))^2 + A_{10} \cdot (y_{10} - y_{plates})^2 \right) = 3.0013 \cdot 10^{11}$$

Segment 11

$$I'y_{11} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot L_{11} \cdot (d_{11})^3 = 7.4667 \cdot 10^5$$

$$I'z_{11} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot d_{11} \cdot (L_{11})^3 = 2.3415 \cdot 10^9$$

Rotate and translate with respect to c.g. of the plates:

$$Iy_{11} := 2 \cdot \left(I'y_{11} \cdot (\cos(\alpha_{11}))^2 + I'z_{11} \cdot (\sin(\alpha_{11}))^2 + A_{11} \cdot (z_{11} - z_{plates})^2 \right) = 8.7833 \cdot 10^{10}$$

$$Iz_{11} := 2 \cdot \left(I'y_{11} \cdot (\sin(\alpha_{11}))^2 + I'z_{11} \cdot (\cos(\alpha_{11}))^2 + A_{11} \cdot (y_{11} - y_{plates})^2 \right) = 7.3952 \cdot 10^{11}$$

Total moment of inertia of the plates:

$$Iy_{plates} := Iy_1 \cdot \gamma_1 + Iy_2 \cdot \gamma_2 + Iy_3 \cdot \gamma_3 + Iy_4 \cdot \gamma_4 + Iy_5 \cdot \gamma_5 + Iy_6 \cdot \gamma_6 + Iy_7 \cdot \gamma_7 + Iy_8 \cdot \gamma_8 + Iy_9 \cdot \gamma_9$$

$$Iz_{plates} := Iz_1 \cdot \gamma_1 + Iz_2 \cdot \gamma_2 + Iz_3 \cdot \gamma_3 + Iz_4 \cdot \gamma_4 + Iz_5 \cdot \gamma_5 + Iz_6 \cdot \gamma_6 + Iz_7 \cdot \gamma_7 + Iz_8 \cdot \gamma_8 + Iz_9 \cdot \gamma_9$$

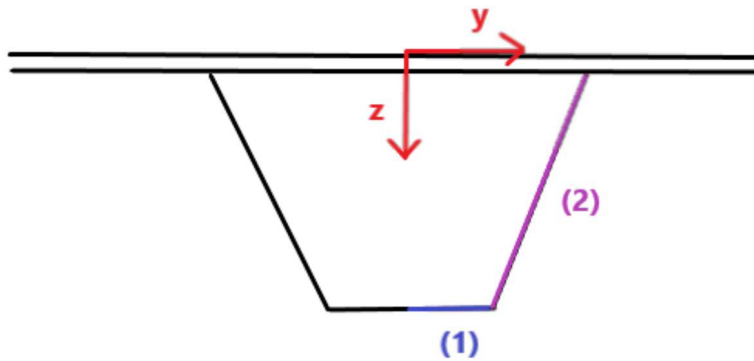
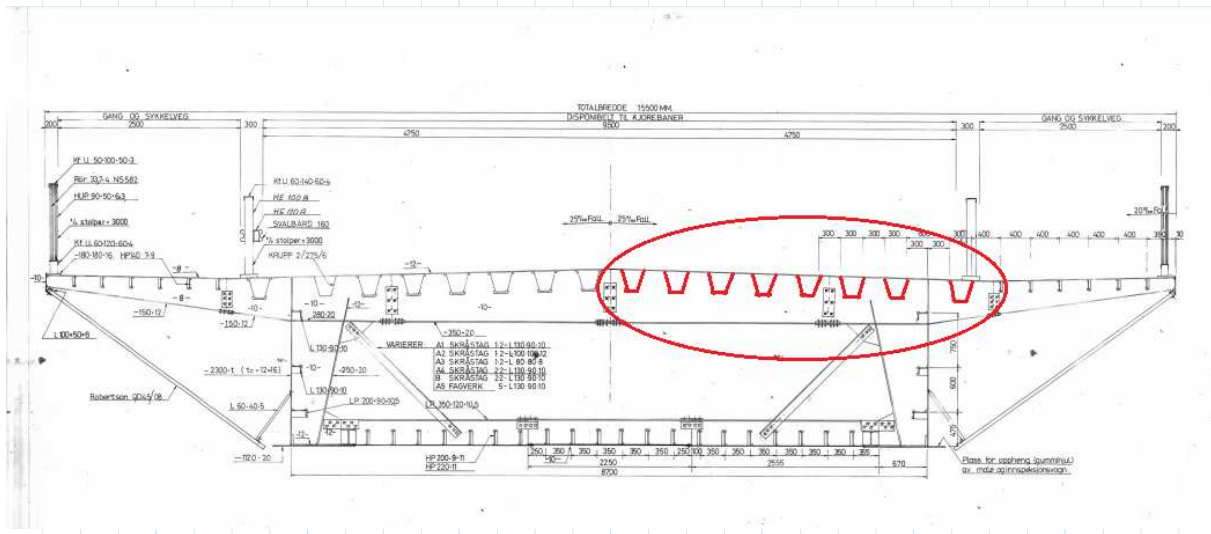
$$Iy_{plates} = 4.4844 \cdot 10^{11} \quad [\text{mm}^4]$$

$$Iz_{plates} = 6.2235 \cdot 10^{12} \quad [\text{mm}^4]$$

$$Iy_{plates} \cdot 10^{-12} = 0.4484 \quad [\text{m}^4]$$

$$Iz_{plates} \cdot 10^{-12} = 6.2235 \quad [\text{m}^4]$$

Krupp stiffeners 2/275/6 at the top:



$d_{krupp} := 6$ Thickness of plates in the krupp stiffener [mm]

Krupp segment 1

$\Delta y_{krupp_1} := \frac{135}{2} = 67.5$ Segment lengths with respect to y and z [mm]

$\Delta z_{krupp_1} := 0$

$L_{krupp_1} := \frac{135}{2}$ Length of line segment [mm]

$\alpha_{krupp_1} := 0$ Angle of inclination of line segment with respect to horizontal line [rad]

$A_{krupp_1} := L_{krupp_1} \cdot d_{krupp} = 405$ Area of krupp plate segment [mm²]

$y_{krupp_1}' := \frac{(\Delta y_{krupp_1})}{2} = 33.75$ Coordinates of midpoint of line segment with respect to reference point [mm]

$z_{krupp_1}' := d_1 + 275 = 287.9$

Krupp segment 2

$$\Delta y_{krupp_2} := \frac{(300 - 135)}{2} = 82.5$$

$$\Delta z_{krupp_2} := 275$$

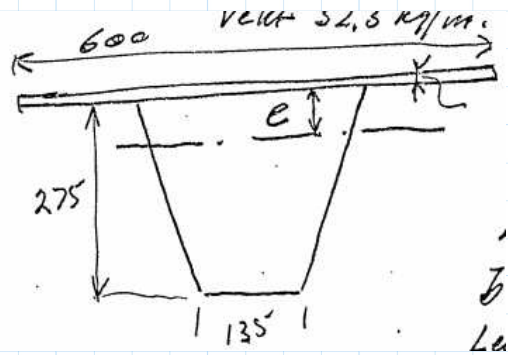
$$L_{krupp_2} := \sqrt{\Delta z_{krupp_2}^2 + \Delta y_{krupp_2}^2} = 287.1084$$

$$\alpha_{krupp_2} := \text{atan}\left(\frac{\Delta z_{krupp_2}}{\Delta y_{krupp_2}}\right) = 1.2793$$

$$A_{krupp_2} := L_{krupp_2} \cdot d_{krupp} = 1.7227 \cdot 10^3$$

$$y_{krupp_2'} := (\Delta y_{krupp_1}) + \frac{(\Delta y_{krupp_2})}{2} = 108.75$$

$$z_{krupp_2'} := d_1 + \frac{(\Delta z_{krupp_2})}{2} = 150.4$$



Calculating the local area center of the krupp stiffener:

Adjusting the midpoint coordinates of each segment by its extruded thickness from line

Krupp segment 1

$$y_{krupp_1} := y_{krupp_1'} = 33.75 \quad [\text{mm}]$$

$$z_{krupp_1} := z_{krupp_1'} - \frac{(d_{krupp})}{2} = 284.9 \quad [\text{mm}]$$

Krupp segment 2

$$y_{krupp_2} := y_{krupp_2'} - \frac{d_{krupp}}{2} \cdot \sin(\alpha_{krupp_2}) = 105.8765$$

$$z_{krupp_2} := z_{krupp_2'} - \frac{d_{krupp}}{2} \cdot \cos(\alpha_{krupp_2}) = 149.538$$

Area center of the krupp stiffener with respect to reference point:

$$\Sigma z_i A_{ikrupp} := 2 \cdot (z_{krupp_1} \cdot A_{krupp_1} + z_{krupp_2} \cdot A_{krupp_2}) = 7.4597 \cdot 10^5$$

$$A_{krupp} := 2 \cdot (A_{krupp_1} + A_{krupp_2}) = 4.2553 \cdot 10^3 \quad [\text{mm}^2]$$

$$z_{krupp} := \frac{\Sigma z_i A_{ikrupp}}{A_{krupp}} = 175.3042 \quad [\text{mm}]$$

$$y_{krupp} := 0 \quad [\text{mm}]$$

Second moment of area of krupp stiffener

Krupp segment 1

$$I'y_{krupp1} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot Lkrupp_1 \cdot (d_{krupp})^3 = 1.215 \cdot 10^3 \quad [\text{mm}^4]$$

$$I'z_{krupp1} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot d_{krupp} \cdot (Lkrupp_1)^3 = 1.5377 \cdot 10^5 \quad [\text{mm}^4]$$

Rotate and translate with respect to local area center

$$Iy_{krupp1} := 2 \cdot \left(I'y_{krupp1} \cdot (\cos(\alpha_{krupp_1}))^2 + I'z_{krupp1} \cdot (\sin(\alpha_{krupp_1}))^2 + Akrupp_1 \cdot (z_{krupp_1} - z_{krupp}) \right)$$

$$Iz_{krupp1} := 2 \cdot \left(I'y_{krupp1} \cdot (\sin(\alpha_{krupp_1}))^2 + I'z_{krupp1} \cdot (\cos(\alpha_{krupp_1}))^2 + Akrupp_1 \cdot (y_{krupp_1} - y_{krupp}) \right)$$

Krupp segment 2

$$I'y_{krupp2} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot Lkrupp_2 \cdot (d_{krupp})^3 = 5.168 \cdot 10^3$$

$$I'z_{krupp2} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot d_{krupp} \cdot (Lkrupp_2)^3 = 1.1833 \cdot 10^7$$

Rotate and translate with respect to local area center

$$Iy_{krupp2} := 2 \cdot \left(I'y_{krupp2} \cdot (\cos(\alpha_{krupp_2}))^2 + I'z_{krupp2} \cdot (\sin(\alpha_{krupp_2}))^2 + Akrupp_2 \cdot (z_{krupp_2} - z_{krupp}) \right)$$

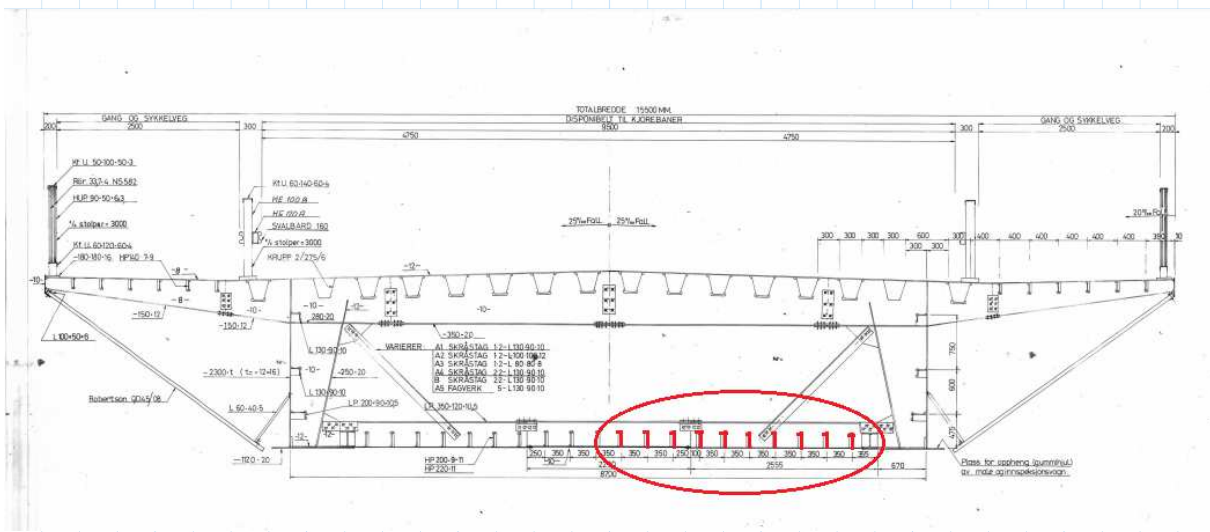
$$Iz_{krupp2} := 2 \cdot \left(I'y_{krupp2} \cdot (\sin(\alpha_{krupp_2}))^2 + I'z_{krupp2} \cdot (\cos(\alpha_{krupp_2}))^2 + Akrupp_2 \cdot (y_{krupp_2} - y_{krupp}) \right)$$

Second moment of area of one krupp stiffener (local area center):

$$Iy_{krupp} := Iy_{krupp1} + Iy_{krupp2} = 3.3732 \cdot 10^7 \quad [\text{mm}^4]$$

$$Iz_{krupp} := Iz_{krupp1} + Iz_{krupp2} = 4.1815 \cdot 10^7 \quad [\text{mm}^4]$$

HP200-stiffeners at the bottom:



$$h_{HPb} := 200$$

Height of stiffener [mm]

$$b_{HPb} := 50$$

Width of stiffener [mm]

$$t_{HPb} := 10.1$$

Thickness of stiffener [mm]

Stiffener segment 1

$$L_{HPb1} := b_{HPb} = 50$$

Segment length [mm]

$$A_{HPb1} := L_{HPb1} \cdot t_{HPb} = 505$$

Segment area [mm²]

$$\alpha_{HPb1} := 0$$

Segment angle [rad]

Stiffener segment 2

$$L_{HPb2} := h_{HPb} - t_{HPb} = 189.9$$

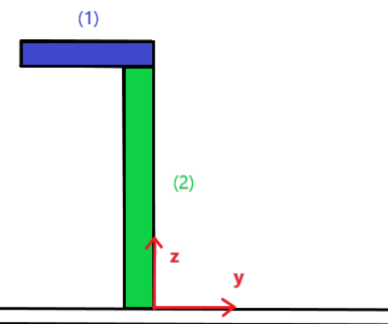
Segment length [mm]

$$A_{HPb2} := L_{HPb2} \cdot t_{HPb} = 1.918 \cdot 10^3$$

Segment area [mm²]

$$\alpha_{HPb2} := \frac{\pi}{2} = 1.5708$$

Segment angle [rad]



Calculating the area center of the stiffener:

Stiffener segment 1

$$z_{HPb1} := h_{HPb} - \frac{(t_{HPb})}{2} = 194.95$$

Coordinates of midpoint of line segment with respect to reference point [mm]

$$y_{HPb1} := \frac{-(b_{HPb})}{2} = -25$$

Stiffener segment 2

$$z_{HPb2} := \frac{(L_{HPb2})}{2} = 94.95$$

$$y_{HPb2} := \frac{-(t_{HPb})}{2} = -5.05$$

Area center of the HP stiffener:

$$\Sigma z_{iA_{iHPb}} := (z_{HPb1} \cdot A_{HPb1} + z_{HPb2} \cdot A_{HPb2}) = 2.8056 \cdot 10^5$$

$$\Sigma y_{iA_{iHPb}} := (y_{HPb1} \cdot A_{HPb1} + y_{HPb2} \cdot A_{HPb2}) = -2.2311 \cdot 10^4$$

$$A_{HPb} := A_{HPb1} + A_{HPb2} = 2.423 \cdot 10^3 \quad \text{Area of stiffener [mm}^2\text{]}$$

$$z_{HPb} := \frac{\Sigma z_{iA_{iHPb}}}{A_{HPb}} = 115.792 \quad [\text{mm}]$$

$$y_{HPb} := \frac{\Sigma y_{iA_{iHPb}}}{A_{HPb}} = -9.208 \quad [\text{mm}]$$

Second moment of area of the stiffener

Stiffener segment 1

$$I'_{y_{HPb1}} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot L_{HPb1} \cdot (t_{HPb})^3 = 4.2929 \cdot 10^3$$

$$I'_{z_{HPb1}} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot t_{HPb} \cdot (L_{HPb1})^3 = 1.0521 \cdot 10^5$$

Rotate and translate with respect to local area center

$$I_{y_{HPb1}} := \left(I'_{y_{HPb1}} \cdot (\cos(\alpha_{HPb1}))^2 + I'_{z_{HPb1}} \cdot (\sin(\alpha_{HPb1}))^2 + A_{HPb1} \cdot (z_{HPb1} - z_{HPb})^2\right) = 3.1686 \cdot 10^6$$

$$I_{z_{HPb1}} := \left(I'_{y_{HPb1}} \cdot (\sin(\alpha_{HPb1}))^2 + I'_{z_{HPb1}} \cdot (\cos(\alpha_{HPb1}))^2 + A_{HPb1} \cdot (y_{HPb1} - y_{HPb})^2\right) = 2.3115 \cdot 10^5$$

Stiffener segment 2

$$I'_{y_{HPb2}} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot L_{HPb2} \cdot (t_{HPb})^3 = 1.6305 \cdot 10^4$$

$$I'_{z_{HPb2}} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot t_{HPb} \cdot (L_{HPb2})^3 = 5.7639 \cdot 10^6$$

Rotate and translate with respect to local area center

$$I_{y_{HPb2}} := \left(I'_{y_{HPb2}} \cdot (\cos(\alpha_{HPb2}))^2 + I'_{z_{HPb2}} \cdot (\sin(\alpha_{HPb2}))^2 + A_{HPb2} \cdot (z_{HPb2} - z_{HPb})^2\right) = 6.597 \cdot 10^6$$

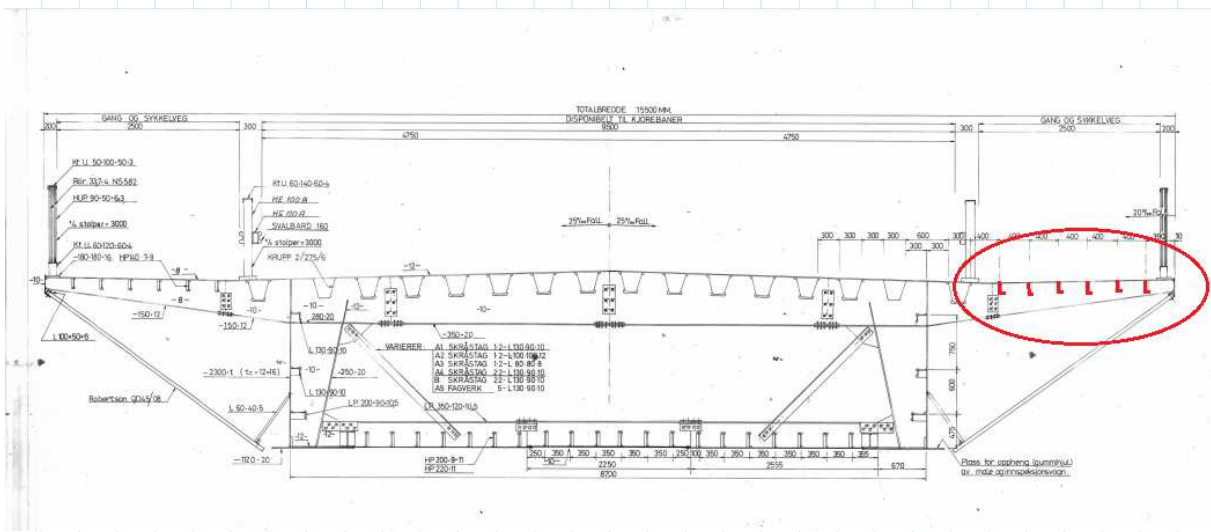
$$I_{z_{HPb2}} := \left(I'_{y_{HPb2}} \cdot (\sin(\alpha_{HPb2}))^2 + I'_{z_{HPb2}} \cdot (\cos(\alpha_{HPb2}))^2 + A_{HPb2} \cdot (y_{HPb2} - y_{HPb})^2\right) = 4.9464 \cdot 10^4$$

Second moment of area of one HP200 stiffener (local area center):

$$I_{y_{HPb}} := I_{y_{HPb1}} + I_{y_{HPb2}} = 9.7657 \cdot 10^6 \quad [\text{mm}^4]$$

$$I_{z_{HPb}} := I_{z_{HPb1}} + I_{z_{HPb2}} = 2.8061 \cdot 10^5 \quad [\text{mm}^4]$$

HP140-stiffeners at the top (attached to segment 2):



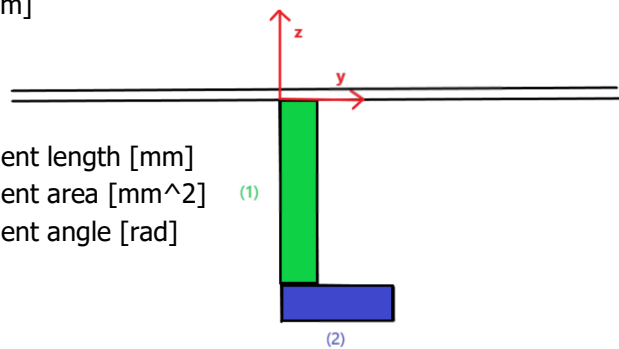
$h_{HPt} := 140$ Height of stiffener [mm]
 $b_{HPt} := 50$ Width of stiffener [mm]
 $t_{HPt} := 8.3$ Thickness of stiffener [mm]

Stiffener segment 1

$L_{HPt1} := h_{HPt} - t_{HPt} = 131.7$ Segment length [mm]
 $A_{HPt1} := L_{HPt1} \cdot t_{HPt} = 1.0931 \cdot 10^3$ Segment area [mm²]
 $\alpha_{HPt1} := \frac{\pi}{2}$ Segment angle [rad]

Stiffener segment 2

$L_{HPt2} := b_{HPt} = 50$
 $A_{HPt2} := L_{HPt2} \cdot t_{HPt} = 415$
 $\alpha_{HPt2} := 0 = 0$



Calculating the area center of the profile:

Stiffener segment 1

$z_{HPt1} := \frac{-(L_{HPt1})}{2} = -65.85$ Coordinates of midpoint of line segment with respect to reference point [mm]
 $y_{HPt1} := \frac{(t_{HPt})}{2} = 4.15$

Stiffener segment 2

$z_{HPt2} := -(h_{HPt}) + \frac{(t_{HPt})}{2} = -135.85$
 $y_{HPt2} := \frac{(b_{HPt})}{2} = 25$

Area center of the HP stiffener:

$$\Sigma z_{iA_{iHPt}} := (z_{HPt1} \cdot A_{HPt1} + z_{HPt2} \cdot A_{HPt2}) = -1.2836 \cdot 10^5$$

$$\Sigma y_{iA_{iHPt}} := (y_{HPt1} \cdot A_{HPt1} + y_{HPt2} \cdot A_{HPt2}) = 1.4911 \cdot 10^4$$

$$A_{HPt} := A_{HPt1} + A_{HPt2} = 1.5081 \cdot 10^3 \quad \text{Area of stiffener [mm}^2\text{]}$$

$$z_{HPt} := \frac{\Sigma z_{iA_{iHPt}}}{A_{HPt}} = -85.1125 \quad [\text{mm}]$$

$$y_{HPt} := \frac{\Sigma y_{iA_{iHPt}}}{A_{HPt}} = 9.8875 \quad [\text{mm}]$$

Second moment of area of stiffener

Stiffener segment 1

$$I'_{y_{HPt1}} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot L_{HPt1} \cdot (t_{HPt})^3 = 6.2754 \cdot 10^3$$

$$I'_{z_{HPt1}} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot t_{HPt} \cdot (L_{HPt1})^3 = 1.58 \cdot 10^6$$

Rotate and translate with respect to local area center

$$I_{y_{HPt1}} := \left(I'_{y_{HPt1}} \cdot (\cos(\alpha_{HPt1}))^2 + I'_{z_{HPt1}} \cdot (\sin(\alpha_{HPt1}))^2 + A_{HPt1} \cdot (z_{HPt1} - z_{HPt})^2 \right) = 1.9856 \cdot 10^6$$

$$I_{z_{HPt1}} := \left(I'_{y_{HPt1}} \cdot (\sin(\alpha_{HPt1}))^2 + I'_{z_{HPt1}} \cdot (\cos(\alpha_{HPt1}))^2 + A_{HPt1} \cdot (y_{HPt1} - y_{HPt})^2 \right) = 4.2259 \cdot 10^4$$

Stiffener segment 2

$$I'_{y_{HPt2}} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot L_{HPt2} \cdot (t_{HPt})^3 = 2.3824 \cdot 10^3$$

$$I'_{z_{HPt2}} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot t_{HPt} \cdot (L_{HPt2})^3 = 8.6458 \cdot 10^4$$

Rotate and translate with respect to local area center

$$I_{y_{HPt2}} := \left(I'_{y_{HPt2}} \cdot (\cos(\alpha_{HPt2}))^2 + I'_{z_{HPt2}} \cdot (\sin(\alpha_{HPt2}))^2 + A_{HPt2} \cdot (z_{HPt2} - z_{HPt})^2 \right) = 1.0707 \cdot 10^6$$

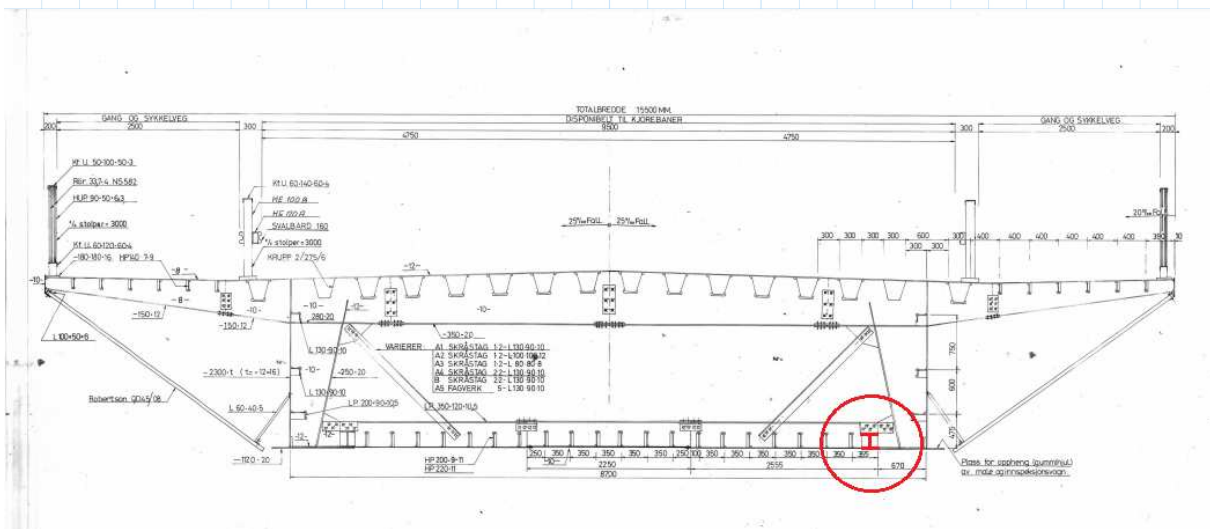
$$I_{z_{HPt2}} := \left(I'_{y_{HPt2}} \cdot (\sin(\alpha_{HPt2}))^2 + I'_{z_{HPt2}} \cdot (\cos(\alpha_{HPt2}))^2 + A_{HPt2} \cdot (y_{HPt2} - y_{HPt})^2 \right) = 1.8124 \cdot 10^5$$

Second moment of area of one HP140 stiffener (local area center):

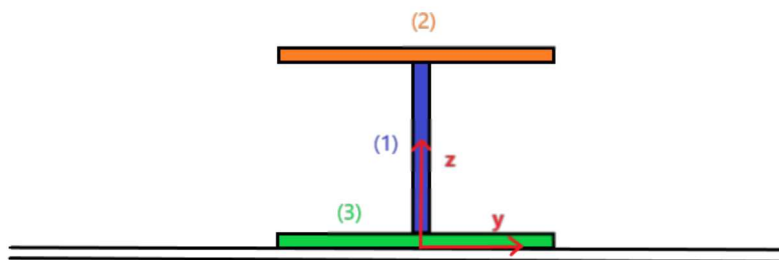
$$I_{y_{HPt}} := I_{y_{HPt1}} + I_{y_{HPt2}} = 3.0563 \cdot 10^6 \quad [\text{mm}^4]$$

$$I_{z_{HPt}} := I_{z_{HPt1}} + I_{z_{HPt2}} = 2.235 \cdot 10^5 \quad [\text{mm}^4]$$

Wide Flange Beam stiffener (attached to segment 6):



$h_{WFB} := 200$	Height of the beam [mm]
$b_{WFB} := 190$	Width of the beam [mm]
$t_{wWFB} := 10$	Thickness of the beam web [mm]
$t_{fWFB} := 10$	Thickness of the beam flange [mm]



Stiffener segment 1

$L_{WFB1} := h_{WFB} - 2 \cdot t_{fWFB} = 180$	Segment length [mm]
$A_{WFB1} := L_{WFB1} \cdot t_{wWFB} = 1.8 \cdot 10^3$	Segment area [mm ²]
$\alpha_{WFB1} := \frac{\pi}{2}$	Segment angle [rad]

Stiffener segment 2

$L_{WFB2} := b_{WFB} = 190$	
$A_{WFB2} := L_{WFB2} \cdot t_{fWFB} = 1.9 \cdot 10^3$	
$\alpha_{WFB2} := 0 = 0$	

Stiffener segment 3

$L_{WFB3} := b_{WFB} = 190$	
$A_{WFB3} := L_{WFB3} \cdot t_{fWFB} = 1.9 \cdot 10^3$	
$\alpha_{WFB3} := 0 = 0$	

Calculating the area center of the beam stiffener:

Stiffener segment 1

$$z_{WFB1} := t_{fWFB} + \frac{L_{WFB1}}{2} = 100 \quad \text{Coordinates of midpoint of line segment with respect to reference point [mm]}$$

$$y_{WFB1} := 0 = 0$$

Stiffener segment 2

$$z_{WFB2} := h_{WFB} - \frac{t_{fWFB}}{2} = 195$$

$$y_{WFB2} := 0 = 0$$

Stiffener segment 3

$$z_{WFB3} := \frac{t_{fWFB}}{2} = 5$$

$$y_{WFB3} := 0 = 0$$

Area center of the beam stiffener:

Double symmetric cross section:

$$z_{WFB} := \frac{h_{WFB}}{2} = 100 \quad [\text{mm}]$$

$$y_{WFB} := 0 \quad [\text{mm}]$$

$$A_{WFB} := A_{WFB1} + A_{WFB2} + A_{WFB3} = 5.6 \cdot 10^3 \quad \text{Area of the beam stiffener [mm}^2\text{]}$$

Second moment of area of the beam stiffener

Stiffener segment 1

$$I'_{y_WFB1} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot L_WFB1 \cdot (t_wWFB)^3 = 1.5 \cdot 10^4$$

$$I'_{z_WFB1} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot t_wWFB \cdot (L_WFB1)^3 = 4.86 \cdot 10^6$$

Rotate and translate with respect to local area center

$$I_{y_WFB1} := \left(I'_{y_WFB1} \cdot (\cos(\alpha_WFB1))^2 + I'_{z_WFB1} \cdot (\sin(\alpha_WFB1))^2 + A_WFB1 \cdot (z_WFB1 - z_WFB)^2 \right) = 4.86 \cdot 10^6$$

$$I_{z_WFB1} := \left(I'_{y_WFB1} \cdot (\sin(\alpha_WFB1))^2 + I'_{z_WFB1} \cdot (\cos(\alpha_WFB1))^2 + A_WFB1 \cdot (y_WFB1 - y_WFB)^2 \right) = 1.5 \cdot 10^4$$

Stiffener segment 2

$$I'_{y_WFB2} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot L_WFB2 \cdot (t_fWFB)^3 = 1.5833 \cdot 10^4$$

$$I'_{z_WFB2} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot t_fWFB \cdot (L_WFB2)^3 = 5.7158 \cdot 10^6$$

Rotate and translate with respect to local area center

$$I_{y_WFB2} := \left(I'_{y_WFB2} \cdot (\cos(\alpha_WFB2))^2 + I'_{z_WFB2} \cdot (\sin(\alpha_WFB2))^2 + A_WFB2 \cdot (z_WFB2 - z_WFB)^2 \right) = 1.7163 \cdot 10^7$$

$$I_{z_WFB2} := \left(I'_{y_WFB2} \cdot (\sin(\alpha_WFB2))^2 + I'_{z_WFB2} \cdot (\cos(\alpha_WFB2))^2 + A_WFB2 \cdot (y_WFB2 - y_WFB)^2 \right) = 5.7158 \cdot 10^6$$

Stiffener segment 3

$$I'_{y_WFB3} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot L_WFB3 \cdot (t_fWFB)^3 = 1.5833 \cdot 10^4$$

$$I'_{z_WFB3} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot t_fWFB \cdot (L_WFB3)^3 = 5.7158 \cdot 10^6$$

Rotate and translate with respect to local area center

$$I_{y_WFB3} := \left(I'_{y_WFB3} \cdot (\cos(\alpha_WFB3))^2 + I'_{z_WFB3} \cdot (\sin(\alpha_WFB3))^2 + A_WFB3 \cdot (z_WFB3 - z_WFB)^2 \right) = 1.7163 \cdot 10^7$$

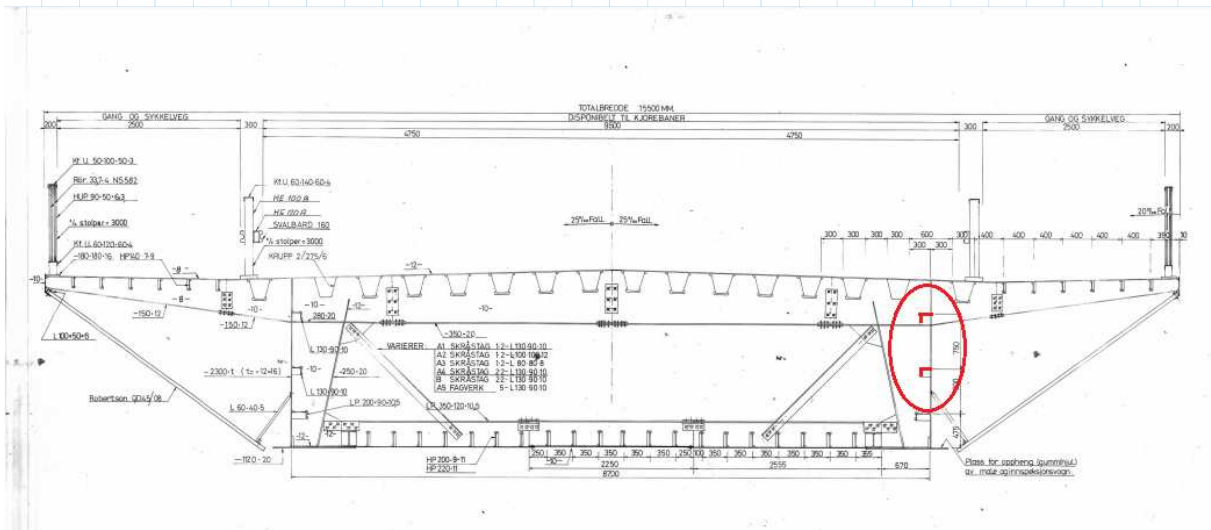
$$I_{z_WFB3} := \left(I'_{y_WFB3} \cdot (\sin(\alpha_WFB3))^2 + I'_{z_WFB3} \cdot (\cos(\alpha_WFB3))^2 + A_WFB3 \cdot (y_WFB3 - y_WFB)^2 \right) = 5.7158 \cdot 10^6$$

Second moment of area of one beam stiffener (local area center):

$$I_{y_WFB} := I_{y_WFB1} + I_{y_WFB2} + I_{y_WFB3} = 3.9187 \cdot 10^7 \quad [\text{mm}^4]$$

$$I_{z_WFB} := I_{z_WFB1} + I_{z_WFB2} + I_{z_WFB3} = 1.1447 \cdot 10^7 \quad [\text{mm}^4]$$

L130-stiffeners attached to segment 7:



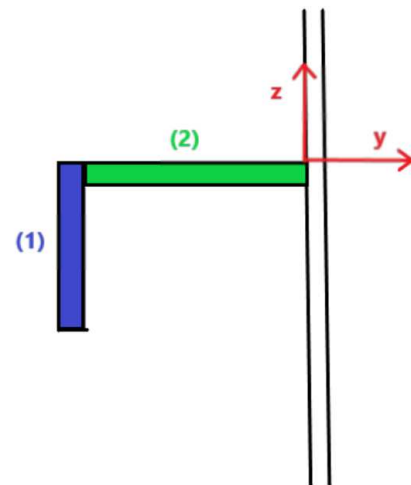
$h_{L130} := 130$ Height of stiffener [mm]
 $b_{L130} := 90$ Width of stiffener [mm]
 $t_{L130} := 10$ Thickness of stiffener [mm]

Stiffener segment 1

$L_{L1301} := b_{L130} = 90$ Segment length [mm]
 $A_{L1301} := L_{L1301} \cdot t_{L130} = 900$ Segment area [mm²]
 $\alpha_{L1301} := \frac{\pi}{2}$ Segment angle [rad]

Stiffener segment 2

$L_{L1302} := h_{L130} - t_{L130} = 120$
 $A_{L1302} := L_{L1302} \cdot t_{L130} = 1.2 \cdot 10^3$
 $\alpha_{L1302} := 0$



Calculating the area center of the profile:

Stiffener segment 1

$z_{L1301} := -\left(\frac{L_{L1301}}{2}\right) = -45$ Coordinates of midpoint of line segment with respect to reference point [mm]
 $y_{L1301} := -h_{L130} + \frac{(t_{L130})}{2} = -125$

Stiffener segment 2

$z_{L1302} := -\frac{(t_{L130})}{2} = -5$
 $y_{L1302} := \frac{-(L_{L1302})}{2} = -60$

Area center of the stiffener:

$$\Sigma z_i A_i L130 := (z_{L1301} \cdot A_{L1301} + z_{L1302} \cdot A_{L1302}) = -4.65 \cdot 10^4$$

$$\Sigma y_i A_i L130 := (y_{L1301} \cdot A_{L1301} + y_{L1302} \cdot A_{L1302}) = -1.845 \cdot 10^5$$

$$A_{L130} := A_{L1301} + A_{L1302} = 2.1 \cdot 10^3 \quad \text{Area of the stiffener [mm}^2\text{]}$$

$$z_{L130} := \frac{\Sigma z_i A_i L130}{A_{L130}} = -22.1429 \quad \text{[mm]}$$

$$y_{L130} := \frac{\Sigma y_i A_i L130}{A_{L130}} = -87.8571 \quad \text{[mm]}$$

Second moment of area of the stiffener

Stiffener segment 1

$$I'_{y_{L1301}} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot L_{L1301} \cdot (t_{L130})^3 = 7.5 \cdot 10^3$$

$$I'_{z_{L1301}} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot t_{L130} \cdot (L_{L1301})^3 = 6.075 \cdot 10^5$$

Rotate and translate with respect to local area center

$$I_{y_{L1301}} := \left(I'_{y_{L1301}} \cdot (\cos(\alpha_{L1301}))^2 + I'_{z_{L1301}} \cdot (\sin(\alpha_{L1301}))^2 + A_{L1301} \cdot (z_{L1301} - z_{L130})^2 \right) = 1.077$$

$$I_{z_{L1301}} := \left(I'_{y_{L1301}} \cdot (\sin(\alpha_{L1301}))^2 + I'_{z_{L1301}} \cdot (\cos(\alpha_{L1301}))^2 + A_{L1301} \cdot (y_{L1301} - y_{L130})^2 \right) = 1.249$$

Stiffener segment 2

$$I'_{y_{L1302}} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot L_{L1302} \cdot (t_{L130})^3 = 1 \cdot 10^4$$

$$I'_{z_{L1302}} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot t_{L130} \cdot (L_{L1302})^3 = 1.44 \cdot 10^6$$

Rotate and translate with respect to local area center

$$I_{y_{L1302}} := \left(I'_{y_{L1302}} \cdot (\cos(\alpha_{L1302}))^2 + I'_{z_{L1302}} \cdot (\sin(\alpha_{L1302}))^2 + A_{L1302} \cdot (z_{L1302} - z_{L130})^2 \right) = 3.626$$

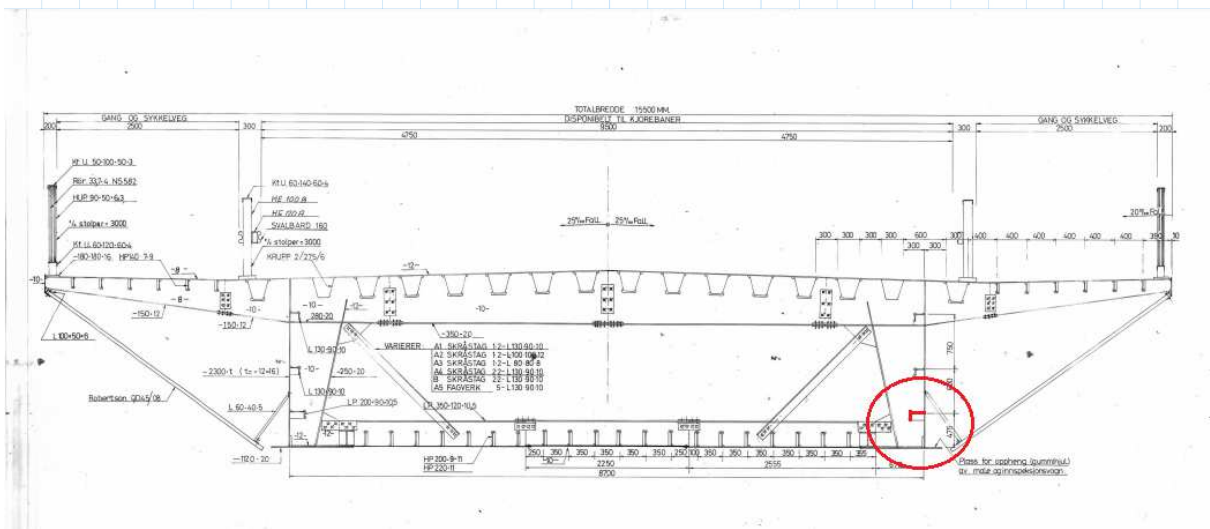
$$I_{z_{L1302}} := \left(I'_{y_{L1302}} \cdot (\sin(\alpha_{L1302}))^2 + I'_{z_{L1302}} \cdot (\cos(\alpha_{L1302}))^2 + A_{L1302} \cdot (y_{L1302} - y_{L130})^2 \right) = 2.371$$

Second moment of area of one L130 stiffener (local area center):

$$I_{y_{L130}} := I_{y_{L1301}} + I_{y_{L1302}} = 1.4404 \cdot 10^6 \quad \text{[mm}^4\text{]}$$

$$I_{z_{L130}} := I_{z_{L1301}} + I_{z_{L1302}} = 3.6204 \cdot 10^6 \quad \text{[mm}^4\text{]}$$

LP200-stiffener attached to segment 7:



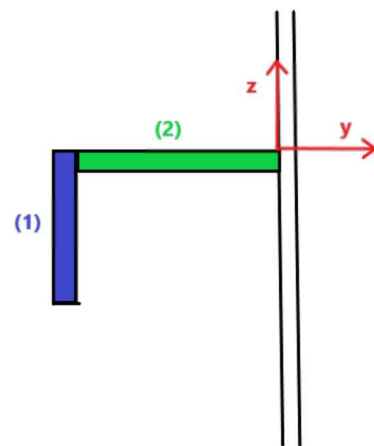
$h_{LP200} := 200$ Height of stiffener [mm]
 $b_{LP200} := 90$ Width of stiffener [mm]
 $t_{LP200} := 10.5$ Thickness of stiffener [mm]

Stiffener segment 1

$L_{LP2001} := b_{LP200} = 90$ Segment length [mm]
 $A_{LP2001} := L_{LP2001} \cdot t_{LP200} = 945$ Segment area [mm²]
 $\alpha_{LP2001} := \frac{\pi}{2}$ Segment angle [rad]

Stiffener segment 2

$L_{LP2002} := h_{LP200} - t_{LP200} = 189.5$
 $A_{LP2002} := L_{LP2002} \cdot t_{LP200} = 1.9898 \cdot 10^3$
 $\alpha_{LP2002} := 0$



Calculating the area center of the profile:

Stiffener segment 1

$z_{LP2001} := -\left(\frac{L_{LP2001}}{2}\right) = -45$ Coordinates of midpoint of line segment with respect to reference point [mm]
 $y_{LP2001} := -h_{LP200} + \frac{(t_{LP200})}{2} = -194.75$

Stiffener segment 2

$z_{LP2002} := -\frac{(t_{LP200})}{2} = -5.25$
 $y_{LP2002} := \frac{-(L_{LP2002})}{2} = -94.75$

Area center of the stiffener:

$$\Sigma z_{iA_{iLP200}} := (z_{LP2001} \cdot A_{LP2001} + z_{LP2002} \cdot A_{LP2002}) = -5.2971 \cdot 10^4$$
$$\Sigma y_{iA_{iLP200}} := (y_{LP2001} \cdot A_{LP2001} + y_{LP2002} \cdot A_{LP2002}) = -3.7257 \cdot 10^5$$

$$A_{LP200} := A_{LP2001} + A_{LP2002} = 2.9348 \cdot 10^3 \quad \text{Area of the stiffener [mm}^2\text{]}$$

$$z_{LP200} := \frac{\Sigma z_{iA_{iLP200}}}{A_{LP200}} = -18.0496 \quad [\text{mm}]$$

$$y_{LP200} := \frac{\Sigma y_{iA_{iLP200}}}{A_{LP200}} = -126.9504 \quad [\text{mm}]$$

Second moment of area of the stiffener

Stiffener segment 1

$$I'_{y_{LP2001}} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot L_{LP2001} \cdot (t_{LP200})^3 = 8.6822 \cdot 10^3$$

$$I'_{z_{LP2001}} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot t_{LP200} \cdot (L_{LP2001})^3 = 6.3788 \cdot 10^5$$

Rotate and translate with respect to local area center

$$I_{y_{LP2001}} := \left(I'_{y_{LP2001}} \cdot (\cos(\alpha_{LP2001}))^2 + I'_{z_{LP2001}} \cdot (\sin(\alpha_{LP2001}))^2 + A_{LP2001} \cdot (z_{LP2001} - z_{LP200})^2 \right) = 1.324$$
$$I_{z_{LP2001}} := \left(I'_{y_{LP2001}} \cdot (\sin(\alpha_{LP2001}))^2 + I'_{z_{LP2001}} \cdot (\cos(\alpha_{LP2001}))^2 + A_{LP2001} \cdot (y_{LP2001} - y_{LP200})^2 \right) = 4.352$$

Stiffener segment 2

$$I'_{y_{LP2002}} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot L_{LP2002} \cdot (t_{LP200})^3 = 1.8281 \cdot 10^4$$

$$I'_{z_{LP2002}} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot t_{LP200} \cdot (L_{LP2002})^3 = 5.9544 \cdot 10^6$$

Rotate and translate with respect to local area center

$$I_{y_{LP2002}} := \left(I'_{y_{LP2002}} \cdot (\cos(\alpha_{LP2002}))^2 + I'_{z_{LP2002}} \cdot (\sin(\alpha_{LP2002}))^2 + A_{LP2002} \cdot (z_{LP2002} - z_{LP200})^2 \right) = 3.442$$
$$I_{z_{LP2002}} := \left(I'_{y_{LP2002}} \cdot (\sin(\alpha_{LP2002}))^2 + I'_{z_{LP2002}} \cdot (\cos(\alpha_{LP2002}))^2 + A_{LP2002} \cdot (y_{LP2002} - y_{LP200})^2 \right) = 8.017$$

Second moment of area of one LP200 stiffener (local area center):

$$I_{y_{LP200}} := I_{y_{LP2001}} + I_{y_{LP2002}} = 1.6685 \cdot 10^6 \quad [\text{mm}^4]$$

$$I_{z_{LP200}} := I_{z_{LP2001}} + I_{z_{LP2002}} = 1.237 \cdot 10^7 \quad [\text{mm}^4]$$

Calculating the area center of all stiffeners with respect to the global reference point (0,0)

Krupp stiffeners:

Stiffener 1

$$y'_{stiff1} := 300 \quad \text{Spacing adjustment between stiffeners [mm]}$$

Coordinates of area center for the stiffener with respect to global reference point [mm]:

$$z_{stiff1} := H - y'_{stiff1} \cdot \sin(\alpha_1) - z_{krupp} \cdot \cos(\alpha_1) = 2.2673 \cdot 10^3$$

$$y_{stiff1} := y'_{stiff1} - z_{krupp} \cdot \sin(\alpha_1) = 295.6188$$

Stiffener 2

$$y'_{stiff2} := 300 + 600 = 900$$

$$z_{stiff2} := H - y'_{stiff2} \cdot \sin(\alpha_1) - z_{krupp} \cdot \cos(\alpha_1) = 2.2523 \cdot 10^3$$

$$y_{stiff2} := y'_{stiff2} - z_{krupp} \cdot \sin(\alpha_1) = 895.6188$$

Stiffener 3

$$y'_{stiff3} := 300 + 600 \cdot 2 = 1.5 \cdot 10^3$$

$$z_{stiff3} := H - y'_{stiff3} \cdot \sin(\alpha_1) - z_{krupp} \cdot \cos(\alpha_1) = 2.2373 \cdot 10^3$$

$$y_{stiff3} := y'_{stiff3} - z_{krupp} \cdot \sin(\alpha_1) = 1.4956 \cdot 10^3$$

Stiffener 4

$$y'_{stiff4} := 300 + 600 \cdot 3 = 2.1 \cdot 10^3$$

$$z_{stiff4} := H - y'_{stiff4} \cdot \sin(\alpha_1) - z_{krupp} \cdot \cos(\alpha_1) = 2.2223 \cdot 10^3$$

$$y_{stiff4} := y'_{stiff4} - z_{krupp} \cdot \sin(\alpha_1) = 2.0956 \cdot 10^3$$

Stiffener 5

$$y'_{stiff5} := 300 + 600 \cdot 4 = 2.7 \cdot 10^3$$

$$z_{stiff5} := H - y'_{stiff5} \cdot \sin(\alpha_1) - z_{krupp} \cdot \cos(\alpha_1) = 2.2073 \cdot 10^3$$

$$y_{stiff5} := y'_{stiff5} - z_{krupp} \cdot \sin(\alpha_1) = 2.6956 \cdot 10^3$$

Stiffener 6

$$y'_{stiff6} := 300 + 600 \cdot 5 = 3.3 \cdot 10^3$$

$$z_{stiff6} := H - y'_{stiff6} \cdot \sin(\alpha_1) - z_{krupp} \cdot \cos(\alpha_1) = 2.1923 \cdot 10^3$$

$$y_{stiff6} := y'_{stiff6} - z_{krupp} \cdot \sin(\alpha_1) = 3.2956 \cdot 10^3$$

Stiffener 7

$$y'_{stiff7} := 300 + 600 \cdot 6 = 3.9 \cdot 10^3$$

$$z_{stiff7} := H - y'_{stiff7} \cdot \sin(\alpha_1) - z_{krupp} \cdot \cos(\alpha_1) = 2.1773 \cdot 10^3$$

$$y_{stiff7} := y'_{stiff7} - z_{krupp} \cdot \sin(\alpha_1) = 3.8956 \cdot 10^3$$

Stiffener 8

$$y'_{stiff8} := 300 + 600 \cdot 6 + 900 = 4.8 \cdot 10^3$$

$$z_{stiff8} := H - y'_{stiff8} \cdot \sin(\alpha_1) - z_{krupp} \cdot \cos(\alpha_1) = 2.1548 \cdot 10^3$$

$$y_{stiff8} := y'_{stiff8} - z_{krupp} \cdot \sin(\alpha_1) = 4.7956 \cdot 10^3$$

HP200 stiffeners:

Stiffener 9

$$y'_{stiff9} := 175 = 175$$

$$z_{stiff9} := z_{HPb} + d_6 = 123.992$$

$$y_{stiff9} := y'_{stiff9} + y_{HPb} = 165.792$$

Stiffener 10

$$y'_{stiff10} := 175 + 350 = 525$$

$$z_{stiff10} := z_{HPb} + d_6 = 123.992$$

$$y_{stiff10} := y'_{stiff10} + y_{HPb} = 515.792$$

Stiffener 11

$$y'_{stiff11} := 175 + 350 \cdot 2 = 875$$

$$z_{stiff11} := z_{HPb} + d_6 = 123.992$$

$$y_{stiff11} := y'_{stiff11} + y_{HPb} = 865.792$$

Stiffener 12

$$y'_{stiff12} := 175 + 350 \cdot 3 = 1.225 \cdot 10^3$$

$$z_{stiff12} := z_{HPb} + d_6 = 123.992$$

$$y_{stiff12} := y'_{stiff12} + y_{HPb} = 1.2158 \cdot 10^3$$

Stiffener 13

$$y'_{stiff13} := 175 + 350 \cdot 4 = 1.575 \cdot 10^3$$

$$z_{stiff13} := z_{HPb} + d_6 = 123.992$$

$$y_{stiff13} := y'_{stiff13} + y_{HPb} = 1.5658 \cdot 10^3$$

Stiffener 14

$$y'_{stiff14} := 175 + 350 \cdot 5 = 1.925 \cdot 10^3$$

$$z_{stiff14} := z_{HPb} + d_6 = 123.992$$

$$y_{stiff14} := y'_{stiff14} + y_{HPb} = 1.9158 \cdot 10^3$$

Stiffener 15

$$y'_{stiff15} := 175 + 350 \cdot 6 = 2.275 \cdot 10^3$$

$$z_{stiff15} := z_{HPb} + d_6 = 123.992$$

$$y_{stiff15} := y'_{stiff15} + y_{HPb} = 2.2658 \cdot 10^3$$

Stiffener 16

$$y'_{stiff16} := 175 + 350 \cdot 7 = 2.625 \cdot 10^3$$

$$z_{stiff16} := z_{HPb} + d_6 = 123.992$$

$$y_{stiff16} := y'_{stiff16} + y_{HPb} = 2.6158 \cdot 10^3$$

Stiffener 17

$$y'_{stiff17} := 175 + 350 \cdot 8 = 2.975 \cdot 10^3$$

$$z_{stiff17} := z_{HPb} + d_6 = 123.992$$

$$y_{stiff17} := y'_{stiff17} + y_{HPb} = 2.9658 \cdot 10^3$$

Stiffener 18

$$y'_{stiff18} := 175 + 350 \cdot 9 = 3.325 \cdot 10^3$$

$$z_{stiff18} := z_{HPb} + d_6 = 123.992$$

$$y_{stiff18} := y'_{stiff18} + y_{HPb} = 3.3158 \cdot 10^3$$

HP140 stiffeners:**Stiffener 19**

$$y'_{stiff19} := 400$$

$$z_{stiff19} := (H - \Delta z_1 + \Delta z_2 - d_2 \cdot \cos(\alpha_2)) - y'_{stiff19} \cdot \sin(\alpha_2) + z_{HPt} \cdot \cos(\alpha_2) = 2.2666 \cdot 10^3$$

$$y_{stiff19} := (\Delta y_1 + \Delta y_2) - y'_{stiff19} + y_{HPt} - z_{HPt} \cdot \sin(\alpha_2) = 7.3616 \cdot 10^3$$

Stiffener 20

$$y'_{stiff20} := 400 \cdot 2$$

$$z_{stiff20} := (H - \Delta z_1 + \Delta z_2 - d_2 \cdot \cos(\alpha_2)) - y'_{stiff20} \cdot \sin(\alpha_2) + z_{HPt} \cdot \cos(\alpha_2) = 2.2586 \cdot 10^3$$

$$y_{stiff20} := (\Delta y_1 + \Delta y_2) - y'_{stiff20} + y_{HPt} - z_{HPt} \cdot \sin(\alpha_2) = 6.9616 \cdot 10^3$$

Stiffener 21

$$y'_{stiff21} := 400 \cdot 3$$

$$z_{stiff21} := (H - \Delta z_1 + \Delta z_2 - d_2 \cdot \cos(\alpha_2)) - y'_{stiff21} \cdot \sin(\alpha_2) + z_{HPt} \cdot \cos(\alpha_2) = 2.2506 \cdot 10^3$$

$$y_{stiff21} := (\Delta y_1 + \Delta y_2) - y'_{stiff21} + y_{HPt} - z_{HPt} \cdot \sin(\alpha_2) = 6.5616 \cdot 10^3$$

Stiffener 22

$$y'_{stiff22} := 400 \cdot 4$$

$$z_{stiff22} := (H - \Delta z_1 + \Delta z_2 - d_2 \cdot \cos(\alpha_2)) - y'_{stiff22} \cdot \sin(\alpha_2) + z_{HPt} \cdot \cos(\alpha_2) = 2.2426 \cdot 10^3$$

$$y_{stiff22} := (\Delta y_1 + \Delta y_2) - y'_{stiff22} + y_{HPt} - z_{HPt} \cdot \sin(\alpha_2) = 6.1616 \cdot 10^3$$

Stiffener 23

$$y'_{stiff23} := 400 \cdot 5$$

$$z_{stiff23} := (H - \Delta z_1 + \Delta z_2 - d_2 \cdot \cos(\alpha_2)) - y'_{stiff23} \cdot \sin(\alpha_2) + z_{HPt} \cdot \cos(\alpha_2) = 2.2346 \cdot 10^3$$

$$y_{stiff23} := (\Delta y_1 + \Delta y_2) - y'_{stiff23} + y_{HPt} - z_{HPt} \cdot \sin(\alpha_2) = 5.7616 \cdot 10^3$$

Stiffener 24

$$y'_{stiff24} := 400 \cdot 6$$

$$z_{stiff24} := (H - \Delta z_1 + \Delta z_2 - d_2 \cdot \cos(\alpha_2)) - y'_{stiff24} \cdot \sin(\alpha_2) + z_{HPt} \cdot \cos(\alpha_2) = 2.2266 \cdot 10^3$$

$$y_{stiff24} := (\Delta y_1 + \Delta y_2) - y'_{stiff24} + y_{HPt} - z_{HPt} \cdot \sin(\alpha_2) = 5.3616 \cdot 10^3$$

Wide Flange Beam stiffener:

Stiffener 25

$$z_{stiff25} := z_{WFB} + d_6 = \frac{108.2}{b_{WFB}}$$
$$y_{stiff25} := \Delta y_6 - 670 - \frac{108.2}{2} = 3.585 \cdot 10^3$$

L130 stiffeners:

Stiffener 26

$$z'_{stiff26} := 475 + 600 = 1.075 \cdot 10^3$$

$$y'_{stiff26} := \Delta y_6 = 4.35 \cdot 10^3$$

$$z_{stiff26} := z'_{stiff26} + z_{L130} = 1.0529 \cdot 10^3$$

$$y_{stiff26} := y'_{stiff26} + y_{L130} = 4.2621 \cdot 10^3$$

Stiffener 27

$$z'_{stiff27} := 475 + 600 + 750 = 1.825 \cdot 10^3$$

$$y'_{stiff27} := \Delta y_6 = 4.35 \cdot 10^3$$

$$z_{stiff27} := z'_{stiff27} + z_{L130} = 1.8029 \cdot 10^3$$

$$y_{stiff27} := y'_{stiff27} + y_{L130} = 4.2621 \cdot 10^3$$

LP200 stiffeners:

Stiffener 28

$$z'_{stiff28} := 475 = 475$$

$$y'_{stiff28} := \Delta y_6 = 4.35 \cdot 10^3$$

$$z_{stiff28} := z'_{stiff28} + z_{LP200} = 456.9504$$

$$y_{stiff28} := y'_{stiff28} + y_{LP200} = 4.223 \cdot 10^3$$

Area center of all stiffeners, relative to global reference point:

$$\Sigma z_{iA_{istiff_krupp}} := 2 \cdot A_{krupp} \cdot (z_{stiff1} + z_{stiff2} + z_{stiff3} + z_{stiff4} + z_{stiff5} + z_{stiff6} + z_{stiff7} + z_{stiff8})$$

$$\Sigma z_{iA_{istiff_HPb}} := 2 \cdot A_{HPb} \cdot (z_{stiff9} + z_{stiff10} + z_{stiff11} + z_{stiff12} + z_{stiff13} + z_{stiff14} + z_{stiff15} + z_{stiff16})$$

$$\Sigma z_{iA_{istiff_HPt}} := 2 \cdot A_{HPt} \cdot (z_{stiff19} + z_{stiff20} + z_{stiff21} + z_{stiff22} + z_{stiff23} + z_{stiff24}) = 4.0657 \cdot 10^7$$

$$\Sigma z_{iA_{istiff_WFB}} := 2 \cdot A_{WFB} \cdot (z_{stiff25}) = 1.2118 \cdot 10^6$$

$$\Sigma z_{iA_{istiff_L130}} := 2 \cdot A_{L130} \cdot (z_{stiff26} + z_{stiff27}) = 1.1994 \cdot 10^7$$

$$\Sigma z_{iA_{istiff_LP200}} := 2 \cdot A_{LP200} \cdot (z_{stiff28}) = 2.6821 \cdot 10^6$$

$$\Sigma z_{iA_{istiff}} := \Sigma z_{iA_{istiff_krupp}} + \Sigma z_{iA_{istiff_HPb}} + \Sigma z_{iA_{istiff_HPt}} + \Sigma z_{iA_{istiff_WFB}} + \Sigma z_{iA_{istiff_L130}} + \Sigma z_{iA_{istiff_LP200}}$$

$$A_{stiff} := 2 \cdot (8 \cdot A_{krupp}) + 2 \cdot (10 \cdot A_{HPb}) + 2 \cdot (6 \cdot A_{HPt}) + 2 \cdot (A_{WFB}) + 2 \cdot (2 \cdot A_{L130}) + 2 \cdot (A_{LP200}) = 1.6011 \cdot 10^5$$

$$A_{stiff} = 1.6011 \cdot 10^5 \quad \text{Area of all stiffeners [mm}^2\text{]}$$

$$A_{stiff} \cdot 10^{-6} = 0.1601 \quad \text{[m}^2\text{]}$$

$$z_{stiff} := \frac{\Sigma z_{iA_{istiff}}}{A_{stiff}} = 1.3321 \cdot 10^3 \quad \text{[mm]}$$

$$y_{stiff} := 0 \quad \text{[mm]}$$

Second moment of area of all stiffeners relative to area center of all stiffeners:

Krupp stiffeners:

Stiffener 1

$$I_{y_stiff1} := 2 \cdot \left(I_{y_krupp} \cdot (\cos(\alpha_1))_2^2 + I_{z_krupp} \cdot (\sin(\alpha_1))_2^2 + A_{krupp} \cdot (z_stiff1 - z_stiff)^2 \right) = 7.5104 \cdot 10^9$$

$$I_{z_stiff1} := 2 \cdot \left(I_{y_krupp} \cdot (\sin(\alpha_1))_2^2 + I_{z_krupp} \cdot (\cos(\alpha_1))_2^2 + A_{krupp} \cdot (y_stiff1 - y_stiff)^2 \right) = 8.2737 \cdot 10^8$$

Stiffener 2

$$I_{y_stiff2} := 2 \cdot \left(I_{y_krupp} \cdot (\cos(\alpha_1))_2^2 + I_{z_krupp} \cdot (\sin(\alpha_1))_2^2 + A_{krupp} \cdot (z_stiff2 - z_stiff)^2 \right) = 7.2736 \cdot 10^9$$

$$I_{z_stiff2} := 2 \cdot \left(I_{y_krupp} \cdot (\sin(\alpha_1))_2^2 + I_{z_krupp} \cdot (\cos(\alpha_1))_2^2 + A_{krupp} \cdot (y_stiff2 - y_stiff)^2 \right) = 6.9103 \cdot 10^9$$

Stiffener 3

$$I_{y_stiff3} := 2 \cdot \left(I_{y_krupp} \cdot (\cos(\alpha_1))_2^2 + I_{z_krupp} \cdot (\sin(\alpha_1))_2^2 + A_{krupp} \cdot (z_stiff3 - z_stiff)^2 \right) = 7.0406 \cdot 10^9$$

$$I_{z_stiff3} := 2 \cdot \left(I_{y_krupp} \cdot (\sin(\alpha_1))_2^2 + I_{z_krupp} \cdot (\cos(\alpha_1))_2^2 + A_{krupp} \cdot (y_stiff3 - y_stiff)^2 \right) = 1.9121 \cdot 10^{10}$$

Stiffener 4

$$I_{y_stiff4} := 2 \cdot \left(I_{y_krupp} \cdot (\cos(\alpha_1))_2^2 + I_{z_krupp} \cdot (\sin(\alpha_1))_2^2 + A_{krupp} \cdot (z_stiff4 - z_stiff)^2 \right) = 6.8115 \cdot 10^9$$

$$I_{z_stiff4} := 2 \cdot \left(I_{y_krupp} \cdot (\sin(\alpha_1))_2^2 + I_{z_krupp} \cdot (\cos(\alpha_1))_2^2 + A_{krupp} \cdot (y_stiff4 - y_stiff)^2 \right) = 3.7459 \cdot 10^{10}$$

Stiffener 5

$$I_{y_stiff5} := 2 \cdot \left(I_{y_krupp} \cdot (\cos(\alpha_1))_2^2 + I_{z_krupp} \cdot (\sin(\alpha_1))_2^2 + A_{krupp} \cdot (z_stiff5 - z_stiff)^2 \right) = 6.5862 \cdot 10^9$$

$$I_{z_stiff5} := 2 \cdot \left(I_{y_krupp} \cdot (\sin(\alpha_1))_2^2 + I_{z_krupp} \cdot (\cos(\alpha_1))_2^2 + A_{krupp} \cdot (y_stiff5 - y_stiff)^2 \right) = 6.1925 \cdot 10^{10}$$

Stiffener 6

$$I_{y_stiff6} := 2 \cdot \left(I_{y_krupp} \cdot (\cos(\alpha_1))_2^2 + I_{z_krupp} \cdot (\sin(\alpha_1))_2^2 + A_{krupp} \cdot (z_stiff6 - z_stiff)^2 \right) = 6.3648 \cdot 10^9$$

$$I_{z_stiff6} := 2 \cdot \left(I_{y_krupp} \cdot (\sin(\alpha_1))_2^2 + I_{z_krupp} \cdot (\cos(\alpha_1))_2^2 + A_{krupp} \cdot (y_stiff6 - y_stiff)^2 \right) = 9.2518 \cdot 10^{10}$$

Stiffener 7

$$I_{y_stiff7} := 2 \cdot \left(I_{y_krupp} \cdot (\cos(\alpha_1))_2^2 + I_{z_krupp} \cdot (\sin(\alpha_1))_2^2 + A_{krupp} \cdot (z_stiff7 - z_stiff)^2 \right) = 6.1471 \cdot 10^9$$

$$I_{z_stiff7} := 2 \cdot \left(I_{y_krupp} \cdot (\sin(\alpha_1))_2^2 + I_{z_krupp} \cdot (\cos(\alpha_1))_2^2 + A_{krupp} \cdot (y_stiff7 - y_stiff)^2 \right) = 1.2924 \cdot 10^{11}$$

Stiffener 8

$$I_{y_stiff8} := 2 \cdot \left(I_{y_krupp} \cdot (\cos(\alpha_1))_2^2 + I_{z_krupp} \cdot (\sin(\alpha_1))_2^2 + A_{krupp} \cdot (z_stiff8 - z_stiff)^2 \right) = 5.8278 \cdot 10^9$$

$$I_{z_stiff8} := 2 \cdot \left(I_{y_krupp} \cdot (\sin(\alpha_1))_2^2 + I_{z_krupp} \cdot (\cos(\alpha_1))_2^2 + A_{krupp} \cdot (y_stiff8 - y_stiff)^2 \right) = 1.9581 \cdot 10^{11}$$

HP200 stiffeners:

Stiffener 9

$$I_{y_stiff9} := 2 \cdot \left(I_{y_HPb} \cdot (\cos(\alpha_6))_2^2 + I_{z_HPb} \cdot (\sin(\alpha_6))_2^2 + A_{HPb} \cdot (z_stiff9 - z_stiff)^2 \right) = 7.0922 \cdot 10^9$$

$$I_{z_stiff9} := 2 \cdot \left(I_{y_HPb} \cdot (\sin(\alpha_6))_2^2 + I_{z_HPb} \cdot (\cos(\alpha_6))_2^2 + A_{HPb} \cdot (y_stiff9 - y_stiff)^2 \right) = 1.3376 \cdot 10^8$$

Stiffener 10

$$I_{y_stiff10} := 2 \cdot \left(I_{y_HPb} \cdot (\cos(\alpha_6))_2^2 + I_{z_HPb} \cdot (\sin(\alpha_6))_2^2 + A_{HPb} \cdot (z_stiff10 - z_stiff)^2 \right) = 7.0922 \cdot 10^9$$

$$I_{z_stiff10} := 2 \cdot \left(I_{y_HPb} \cdot (\sin(\alpha_6))_2^2 + I_{z_HPb} \cdot (\cos(\alpha_6))_2^2 + A_{HPb} \cdot (y_stiff10 - y_stiff)^2 \right) = 1.2898 \cdot 10^9$$

Stiffener 11

$$I_{y_stiff11} := 2 \cdot \left(I_{y_HPb} \cdot (\cos(\alpha_6))^2 + I_{z_HPb} \cdot (\sin(\alpha_6))^2 + A_{HPb} \cdot (z_stiff11 - z_stiff)^2 \right) = 7.0922 \cdot 10^9$$

$$I_{z_stiff11} := 2 \cdot \left(I_{y_HPb} \cdot (\sin(\alpha_6))^2 + I_{z_HPb} \cdot (\cos(\alpha_6))^2 + A_{HPb} \cdot (y_stiff11 - y_stiff)^2 \right) = 3.6331 \cdot 10^9$$

Stiffener 12

$$I_{y_stiff12} := 2 \cdot \left(I_{y_HPb} \cdot (\cos(\alpha_6))^2 + I_{z_HPb} \cdot (\sin(\alpha_6))^2 + A_{HPb} \cdot (z_stiff12 - z_stiff)^2 \right) = 7.0922 \cdot 10^9$$

$$I_{z_stiff12} := 2 \cdot \left(I_{y_HPb} \cdot (\sin(\alpha_6))^2 + I_{z_HPb} \cdot (\cos(\alpha_6))^2 + A_{HPb} \cdot (y_stiff12 - y_stiff)^2 \right) = 7.1636 \cdot 10^9$$

Stiffener 13

$$I_{y_stiff13} := 2 \cdot \left(I_{y_HPb} \cdot (\cos(\alpha_6))^2 + I_{z_HPb} \cdot (\sin(\alpha_6))^2 + A_{HPb} \cdot (z_stiff13 - z_stiff)^2 \right) = 7.0922 \cdot 10^9$$

$$I_{z_stiff13} := 2 \cdot \left(I_{y_HPb} \cdot (\sin(\alpha_6))^2 + I_{z_HPb} \cdot (\cos(\alpha_6))^2 + A_{HPb} \cdot (y_stiff13 - y_stiff)^2 \right) = 1.1881 \cdot 10^{10}$$

Stiffener 14

$$I_{y_stiff14} := 2 \cdot \left(I_{y_HPb} \cdot (\cos(\alpha_6))^2 + I_{z_HPb} \cdot (\sin(\alpha_6))^2 + A_{HPb} \cdot (z_stiff14 - z_stiff)^2 \right) = 7.0922 \cdot 10^9$$

$$I_{z_stiff14} := 2 \cdot \left(I_{y_HPb} \cdot (\sin(\alpha_6))^2 + I_{z_HPb} \cdot (\cos(\alpha_6))^2 + A_{HPb} \cdot (y_stiff14 - y_stiff)^2 \right) = 1.7787 \cdot 10^{10}$$

Stiffener 15

$$I_{y_stiff15} := 2 \cdot \left(I_{y_HPb} \cdot (\cos(\alpha_6))^2 + I_{z_HPb} \cdot (\sin(\alpha_6))^2 + A_{HPb} \cdot (z_stiff15 - z_stiff)^2 \right) = 7.0922 \cdot 10^9$$

$$I_{z_stiff15} := 2 \cdot \left(I_{y_HPb} \cdot (\sin(\alpha_6))^2 + I_{z_HPb} \cdot (\cos(\alpha_6))^2 + A_{HPb} \cdot (y_stiff15 - y_stiff)^2 \right) = 2.4879 \cdot 10^{10}$$

Stiffener 16

$$I_{y_stiff16} := 2 \cdot \left(I_{y_HPb} \cdot (\cos(\alpha_6))^2 + I_{z_HPb} \cdot (\sin(\alpha_6))^2 + A_{HPb} \cdot (z_stiff16 - z_stiff)^2 \right) = 7.0922 \cdot 10^9$$

$$I_{z_stiff16} := 2 \cdot \left(I_{y_HPb} \cdot (\sin(\alpha_6))^2 + I_{z_HPb} \cdot (\cos(\alpha_6))^2 + A_{HPb} \cdot (y_stiff16 - y_stiff)^2 \right) = 3.3159 \cdot 10^{10}$$

Stiffener 17

$$I_{y_stiff17} := 2 \cdot \left(I_{y_HPb} \cdot (\cos(\alpha_6))^2 + I_{z_HPb} \cdot (\sin(\alpha_6))^2 + A_{HPb} \cdot (z_stiff17 - z_stiff)^2 \right) = 7.0922 \cdot 10^9$$

$$I_{z_stiff17} := 2 \cdot \left(I_{y_HPb} \cdot (\sin(\alpha_6))^2 + I_{z_HPb} \cdot (\cos(\alpha_6))^2 + A_{HPb} \cdot (y_stiff17 - y_stiff)^2 \right) = 4.2625 \cdot 10^{10}$$

Stiffener 18

$$I_{y_stiff18} := 2 \cdot \left(I_{y_HPb} \cdot (\cos(\alpha_6))^2 + I_{z_HPb} \cdot (\sin(\alpha_6))^2 + A_{HPb} \cdot (z_stiff18 - z_stiff)^2 \right) = 7.0922 \cdot 10^9$$

$$I_{z_stiff18} := 2 \cdot \left(I_{y_HPb} \cdot (\sin(\alpha_6))^2 + I_{z_HPb} \cdot (\cos(\alpha_6))^2 + A_{HPb} \cdot (y_stiff18 - y_stiff)^2 \right) = 5.328 \cdot 10^{10}$$

HP140 stiffeners:**Stiffener 19**

$$I_{y_stiff19} := 2 \cdot \left(I_{y_HPt} \cdot (\cos(\alpha_2))^2 + I_{z_HPt} \cdot (\sin(\alpha_2))^2 + A_{HPt} \cdot (z_stiff19 - z_stiff)^2 \right) = 2.64 \cdot 10^9$$

$$I_{z_stiff19} := 2 \cdot \left(I_{y_HPt} \cdot (\sin(\alpha_2))^2 + I_{z_HPt} \cdot (\cos(\alpha_2))^2 + A_{HPt} \cdot (y_stiff19 - y_stiff)^2 \right) = 1.6346 \cdot 10^{11}$$

Stiffener 20

$$I_{y_stiff20} := 2 \cdot \left(I_{y_HPt} \cdot (\cos(\alpha_2))^2 + I_{z_HPt} \cdot (\sin(\alpha_2))^2 + A_{HPt} \cdot (z_stiff20 - z_stiff)^2 \right) = 2.5951 \cdot 10^9$$

$$I_{z_stiff20} := 2 \cdot \left(I_{y_HPt} \cdot (\sin(\alpha_2))^2 + I_{z_HPt} \cdot (\cos(\alpha_2))^2 + A_{HPt} \cdot (y_stiff20 - y_stiff)^2 \right) = 1.4618 \cdot 10^{11}$$

Stiffener 21

$$I_{y_stiff21} := 2 \cdot \left(I_{y_HPt} \cdot (\cos(\alpha_2))^2 + I_{z_HPt} \cdot (\sin(\alpha_2))^2 + A_{HPt} \cdot (z_stiff21 - z_stiff)^2 \right) = 2.5506 \cdot 10^9$$

$$I_{z_stiff21} := 2 \cdot \left(I_{y_HPt} \cdot (\sin(\alpha_2))^2 + I_{z_HPt} \cdot (\cos(\alpha_2))^2 + A_{HPt} \cdot (y_stiff21 - y_stiff)^2 \right) = 1.2986 \cdot 10^{11}$$

Stiffener 22

$$I_{y_stiff22} := 2 \cdot \left(I_{y_HPt} \cdot (\cos(\alpha_2))^2 + I_{z_HPt} \cdot (\sin(\alpha_2))^2 + A_{HPt} \cdot (z_stiff22 - z_stiff)^2 \right) = 2.5065 \cdot 10^9$$

$$I_{z_stiff22} := 2 \cdot \left(I_{y_HPt} \cdot (\sin(\alpha_2))^2 + I_{z_HPt} \cdot (\cos(\alpha_2))^2 + A_{HPt} \cdot (y_stiff22 - y_stiff)^2 \right) = 1.1451 \cdot 10^{11}$$

Stiffener 23

$$I_{y_stiff23} := 2 \cdot \left(I_{y_HPt} \cdot (\cos(\alpha_2))^2 + I_{z_HPt} \cdot (\sin(\alpha_2))^2 + A_{HPt} \cdot (z_stiff23 - z_stiff)^2 \right) = 2.4627 \cdot 10^9$$

$$I_{z_stiff23} := 2 \cdot \left(I_{y_HPt} \cdot (\sin(\alpha_2))^2 + I_{z_HPt} \cdot (\cos(\alpha_2))^2 + A_{HPt} \cdot (y_stiff23 - y_stiff)^2 \right) = 1.0013 \cdot 10^{11}$$

Stiffener 24

$$I_{y_stiff24} := 2 \cdot \left(I_{y_HPt} \cdot (\cos(\alpha_2))^2 + I_{z_HPt} \cdot (\sin(\alpha_2))^2 + A_{HPt} \cdot (z_stiff24 - z_stiff)^2 \right) = 2.4194 \cdot 10^9$$

$$I_{z_stiff24} := 2 \cdot \left(I_{y_HPt} \cdot (\sin(\alpha_2))^2 + I_{z_HPt} \cdot (\cos(\alpha_2))^2 + A_{HPt} \cdot (y_stiff24 - y_stiff)^2 \right) = 8.6707 \cdot 10^{10}$$

Wide Flange Beam stiffener:**Stiffener 25**

$$I_{y_stiff25} := 2 \cdot \left(I_{y_WFB} \cdot (\cos(\alpha_6))^2 + I_{z_WFB} \cdot (\sin(\alpha_6))^2 + A_{WFB} \cdot (z_stiff25 - z_stiff)^2 \right) = 1.6855 \cdot 10^{10}$$

$$I_{z_stiff25} := 2 \cdot \left(I_{y_WFB} \cdot (\sin(\alpha_6))^2 + I_{z_WFB} \cdot (\cos(\alpha_6))^2 + A_{WFB} \cdot (y_stiff25 - y_stiff)^2 \right) = 1.4397 \cdot 10^{11}$$

L130 stiffeners:**Stiffener 26**

$$I_{y_stiff26} := 2 \cdot \left(I_{y_L130} \cdot (\cos(\alpha_6))^2 + I_{z_L130} \cdot (\sin(\alpha_6))^2 + A_{L130} \cdot (z_stiff26 - z_stiff)^2 \right) = 3.3034 \cdot 10^8$$

$$I_{z_stiff26} := 2 \cdot \left(I_{y_L130} \cdot (\sin(\alpha_6))^2 + I_{z_L130} \cdot (\cos(\alpha_6))^2 + A_{L130} \cdot (y_stiff26 - y_stiff)^2 \right) = 7.6304 \cdot 10^{10}$$

Stiffener 27

$$I_{y_stiff27} := 2 \cdot \left(I_{y_L130} \cdot (\cos(\alpha_6))^2 + I_{z_L130} \cdot (\sin(\alpha_6))^2 + A_{L130} \cdot (z_stiff27 - z_stiff)^2 \right) = 9.3372 \cdot 10^8$$

$$I_{z_stiff27} := 2 \cdot \left(I_{y_L130} \cdot (\sin(\alpha_6))^2 + I_{z_L130} \cdot (\cos(\alpha_6))^2 + A_{L130} \cdot (y_stiff27 - y_stiff)^2 \right) = 7.6304 \cdot 10^{10}$$

LP200 stiffener:**Stiffener 28**

$$I_{y_stiff28} := 2 \cdot \left(I_{y_LP200} \cdot (\cos(\alpha_6))^2 + I_{z_LP200} \cdot (\sin(\alpha_6))^2 + A_{LP200} \cdot (z_stiff28 - z_stiff)^2 \right) = 4.4985 \cdot 10^9$$

$$I_{z_stiff28} := 2 \cdot \left(I_{y_LP200} \cdot (\sin(\alpha_6))^2 + I_{z_LP200} \cdot (\cos(\alpha_6))^2 + A_{LP200} \cdot (y_stiff28 - y_stiff)^2 \right) = 1.047 \cdot 10^{11}$$

Second moment of area of all stiffeners (relative to area center of stiffeners):

$$I_{y_stiff} := I_{y_stiff1} + I_{y_stiff2} + I_{y_stiff3} + I_{y_stiff4} + I_{y_stiff5} + I_{y_stiff6} + I_{y_stiff7} + I_{y_stiff8} + I_{y_stiff9} + I_{y_stiff10}$$

$$I_{z_stiff} := I_{z_stiff1} + I_{z_stiff2} + I_{z_stiff3} + I_{z_stiff4} + I_{z_stiff5} + I_{z_stiff6} + I_{z_stiff7} + I_{z_stiff8} + I_{z_stiff9} + I_{z_stiff10}$$

$$I_{y_stiff} = 1.6228 \cdot 10^{11} \quad [\text{mm}^4]$$

$$I_{z_stiff} = 1.8818 \cdot 10^{12} \quad [\text{mm}^4]$$

$$I_{y_stiff} \cdot 10^{-12} = 0.1623 \quad [\text{m}^4]$$

$$I_{z_stiff} \cdot 10^{-12} = 1.8818 \quad [\text{m}^4]$$

Calculating the overall area center of the deck including stiffeners:

Total area of the deck:

$$A_{total} := A_{stiff} + A_{plates} = 5.6334 \cdot 10^5 \quad [\text{mm}^2]$$

$$A_{total} \cdot 10^{-6} = 0.5633 \quad [\text{m}^2]$$

Overall area center of the deck:

$$z_{total} := \frac{(A_{stiff} \cdot z_{stiff} + A_{plates} \cdot z_{plates})}{A_{total}} = 1.3737 \cdot 10^3 \quad [\text{mm}]$$

$$y_{total} := 0 \quad [\text{mm}]$$

$$z_{total} \cdot 10^{-3} = 1.3737 \quad [\text{m}]$$

$$y_{total} \cdot 10^{-3} = 0 \quad [\text{m}]$$

Overall second moment of area of the deck:

$$I_{y_total} := I_{y_plates} + A_{plates} \cdot (z_{plates} - z_{total})^2 + I_{y_stiff} + A_{stiff} \cdot (z_{stiff} - z_{total})^2 = 6.111 \cdot 10^{11}$$

$$I_{z_total} := I_{z_plates} + I_{z_stiff} = 8.1053 \cdot 10^{12}$$

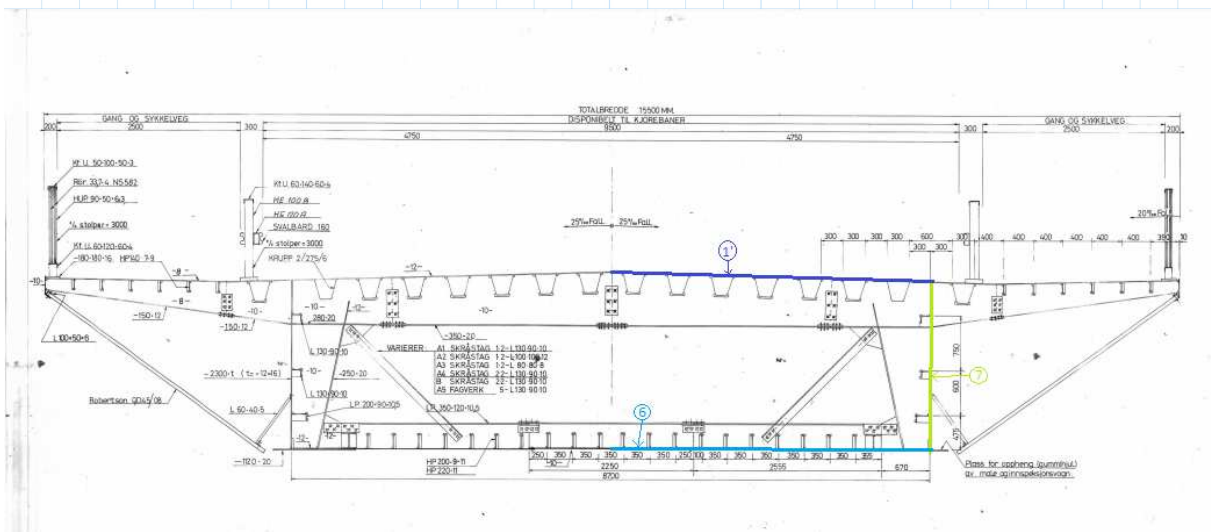
$$I_{y_total} = 6.111 \cdot 10^{11} \quad [\text{mm}^4]$$

$$I_{z_total} = 8.1053 \cdot 10^{12} \quad [\text{mm}^4]$$

$$I_{y_total} \cdot 10^{-12} = 0.6111 \quad [\text{m}^4]$$

$$I_{z_total} \cdot 10^{-12} = 8.1053 \quad [\text{m}^4]$$

Torsion constant:



$$L_{1'} := \sqrt{(H - \Delta z_7)^2 + (\Delta y_6)^2} = 4.3514 \cdot 10^3$$

$$A_{1'} := d_1 \cdot (L_{1'}) = 5.6133 \cdot 10^4$$

$$A'_{deck} := 2 \cdot (A_{1'} + A_7 + A_6) = 2.4729 \cdot 10^5$$

$$A' := 2 \cdot \left(H \cdot \Delta y_6 - \Delta y_6 \cdot \frac{(H - \Delta z_7)}{2} \right) = 2.0842 \cdot 10^7$$

$$\omega := A' - 0.5 \cdot A'_{deck} = 2.0718 \cdot 10^7$$

$$\delta := 2 \cdot \left(\frac{L_{1'}}{(d_1)} + \frac{L_7}{(d_7)} + \frac{L_6}{(d_6)} \right) = 2.0799 \cdot 10^3$$

$$J := 4 \cdot \frac{\omega^2}{\delta} = 8.2551 \cdot 10^{11} \quad [\text{mm}^4]$$

$$J \cdot 10^{-12} = 0.8255 \quad [\text{m}^4]$$

Effective density of the steel deck

$m_{total} := 1068 \cdot 10^3$ The total mass of the steel deck, estimate taken from original calculations [kg]

$L_{total} := 185.0073$ The total length of the steel deck, from the Abaqus model [m]

$A_{total} \cdot 10^{-6} = 0.5633$ Area of the cross section [m²]

Extra mass from asphalt (estimate from original calculations):

$m_{extra} := 1800$ [kg/m]

*Asfalt
+div
t/m
1,8*

$$\rho' := \frac{m_{total} + L_{total} \cdot m_{extra}}{L_{total} \cdot A_{total} \cdot 10^{-6}} = 1.3443 \cdot 10^4 \quad [\text{kg/m}^3]$$

Mass moment of inertia

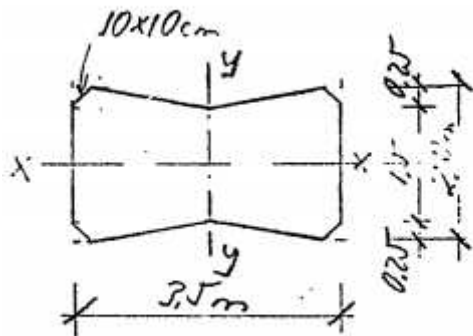
Uniform material density for the whole cross section, thus:

$$I_{my} := \rho' \cdot I_{y_total} \cdot 10^{-12} = 8.2148 \cdot 10^3 \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{m}]$$

$$I_{mz} := \rho' \cdot I_{z_total} \cdot 10^{-12} = 1.0896 \cdot 10^5 \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{m}]$$

$$I_{mx} := \rho' \cdot (I_{y_total} \cdot 10^{-12} + I_{z_total} \cdot 10^{-12}) = 1.1717 \cdot 10^5 \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{m}]$$

Mechanical properties of bridge columns



Regner $h_{\text{midl}} = 1,8\text{m}$ $b = 3,5\text{m}$

$$J_x = \frac{1}{12} \cdot 3,5 \cdot 1,8^3 = 1,70\text{m}^4 \quad J_y = \frac{1}{12} \cdot 1,8 \cdot 3,5^3 = 6,25\text{m}^4$$

The cross section is divided into segments of rectangles and triangles for the calculation of second moment of area.

The axis definitions are kept from the original calculations.

The cross section is symmetric along both axis.

Segment 1

$$x_1 := 1.75$$

Width/x-component of the segment [m]

$$y_1 := 1$$

Height/y-component of the segment [m]

$$A_1 := x_1 \cdot y_1 = 1.75$$

Area of the segment [m²]

$$x_{c1} := \frac{x_1}{2} = 0.875$$

Area center of the segment (x,y), relative to global reference point [m]

$$y_{c1} := \frac{y_1}{2} = 0.5$$

Segment 2

$$x_2 := 1.65$$

$$y_2 := 0.25$$

$$A_2 := x_2 \cdot \frac{y_2}{2} = 0.206$$

$$x_{c2} := \left(\frac{1}{3}\right) \cdot x_2 = 0.55$$

$$y_{c2} := y_1 - \left(\frac{1}{3}\right) \cdot y_2 = 0.917$$

Segment 3

$$x_3 := 0.1$$

$$y_3 := 0.1$$

$$A_3 := x_3 \cdot \frac{y_3}{2} = 0.005$$

$$x_{c3} := x_1 - \left(\frac{1}{3}\right) \cdot x_3 = 1.717$$

$$y_{c3} := y_1 - \left(\frac{1}{3}\right) \cdot y_3 = 0.967$$

Area center of the cross section:

$$\Sigma A_i := A_1 - A_2 - A_3 = 1.539 \quad \text{Area of one quadrant [m}^2\text{]}$$

$$x_c := 0 \quad \text{Area center of the cross section [m]}$$

$$y_c := 0$$

Calculating second moment of area (Ix,Iy):

Segment 1

$$Ix_1 := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot x_1 \cdot (y_1)^3 + (y_{c1} - y_c)^2 \cdot A_1 = 0.583$$

$$Iy_1 := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot y_1 \cdot (x_1)^3 + (x_{c1} - x_c)^2 \cdot A_1 = 1.786$$

Segment 2

$$Ix_2 := \left(\frac{1}{36}\right) \cdot x_2 \cdot (y_2)^3 + (y_{c2} - y_c)^2 \cdot A_2 = 0.174$$

$$Iy_2 := \left(\frac{1}{36}\right) \cdot y_2 \cdot (x_2)^3 + (x_{c2} - x_c)^2 \cdot A_2 = 0.094$$

Segment 3

$$Ix_3 := \left(\frac{1}{36}\right) \cdot x_3 \cdot (y_3)^3 + (y_{c3} - y_c)^2 \cdot A_3 = 0.005$$

$$Iy_3 := \left(\frac{1}{36}\right) \cdot y_3 \cdot (x_3)^3 + (x_{c3} - x_c)^2 \cdot A_3 = 0.015$$

Overall second moment of area (Ix,Iy) of the cross section:

$$Ix := 4 \cdot (Ix_1 - Ix_2 - Ix_3) = 1.619 \quad [\text{m}^4]$$

$$Iy := 4 \cdot (Iy_1 - Iy_2 - Iy_3) = 6.713 \quad [\text{m}^4]$$

$$A := 4 \cdot \Sigma A_i = 6.155 \quad \text{Overall area of the cross section [m}^2\text{]}$$

Torsion constant:

Assuming a rectangular section

(Formula from Roark's Formulas for Stress and Strain)

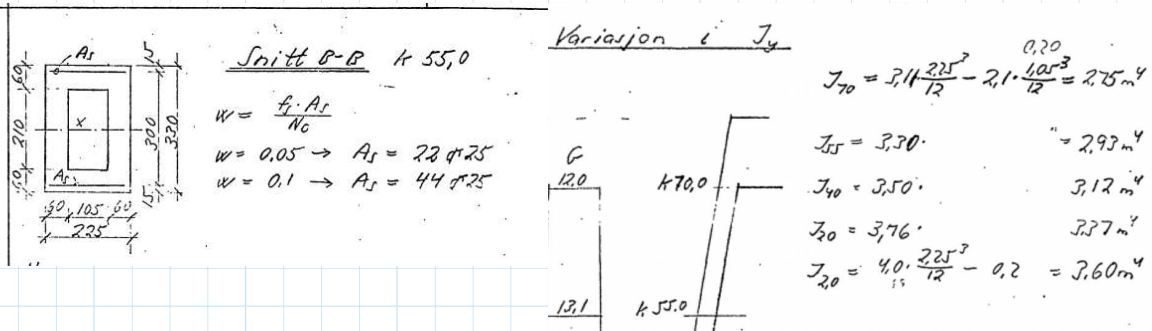
$$a := \frac{3.5}{2} \quad \text{Half the length of the long side}$$

$$b := \frac{1.8}{2} \quad \text{Half the length of the short side} \\ \text{(using approximate value for} \\ \text{rectangular section)}$$

$$J := a \cdot b^3 \cdot \left(\frac{16}{3} - 3.36 \cdot \frac{b}{a} \cdot \left(1 - \frac{b^4}{12 \cdot a^4} \right) \right) = 4.612 \quad [\text{m}^4]$$

Mechanical properties of tower (legs+cross beam)

Tower legs



Increase in outer height of the cross section per meter elevation:

$$\Delta h_o := \frac{(4 - 3.11)}{(70 - 2)} = 0.013088235$$

$k := 5.5$ Equivalent height of the element (see drawing above) [m]

$b_o := 2.25$ Outer width [m]

$b_i := 1.05$ Inner width [m]

$h_o := 3.11 + \Delta h_o \cdot (70 - k) = 3.954$ Outer height [m]

$h_i := h_o - 1.2 = 2.754$ Inner height [m]

$A_o := b_o \cdot h_o = 8.897$ Outer area [m²]

$A_i := b_i \cdot h_i = 2.892$ Inner area [m²]

$A := A_o - A_i = 6.005$ Area of the cross section [m²]

Second moment of area (I_y/I_z):

$$I_y := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot b_o \cdot (h_o)^3 - \left(\frac{1}{12}\right) \cdot b_i \cdot (h_i)^3 = 9.764 \quad [\text{m}^4]$$

$$I_z := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot h_o \cdot (b_o)^3 - \left(\frac{1}{12}\right) \cdot h_i \cdot (b_i)^3 = 3.488 \quad [\text{m}^4]$$

Torsion constant:

Assuming thin walled (Bredt's formula)

$t := 0.6$ Thickness of the section [m]

$b' := b_o - t = 1.65$ Width (wall center line) [m]

$h' := h_o - t = 3.354$ Height (wall center line) [m]

$A' := b' \cdot h' = 5.534$ Area enclosed by the center line [m²]

$$J := 4 \cdot \frac{A'^2}{\left(\frac{b'}{t} + \frac{h'}{t} + \frac{b'}{t} + \frac{h'}{t}\right)} = 7.345 \quad [\text{m}^4]$$

$A = 6.005$

$I_y = 9.764$

$I_z = 3.488$

$J = 7.345$

Values:

k=10 --> A=5.934, I_y=9.369, I_z=3.437, J=7.174
k=18.8 --> A=5.796, I_y=8.625, I_z=3.339, J=6.84
k=30 --> A=5.62, I_y=7.734, I_z=3.214, J=6.419
k=44 --> A=5.4, I_y=6.704, I_z=3.058, J=5.898
k=57.9 --> A=5.182, I_y=5.772, I_z=2.903, J=5.387
k=70 --> A=4.992, I_y=5.03, I_z=2.768, J=4.948

Bottom 3.5m (not hollow)

$b := 2.25$ Width [m]
 $h := 4.0$ Height [m]

$A := b \cdot h = 9$ Area of the cross section [m²]

Second moment of area (I_y/I_z):

$$I_y := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot b \cdot (h)^3 = 12 \quad [\text{m}^4]$$

$$I_z := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot h \cdot (b)^3 = 3.797 \quad [\text{m}^4]$$

Torsion constant:

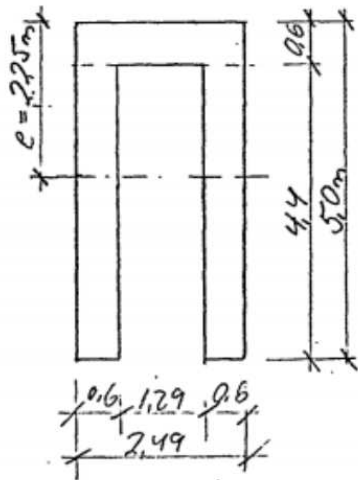
$a := \frac{h}{2}$ Half the length of the long side

$b := \frac{b}{2}$ Half the length of the short side

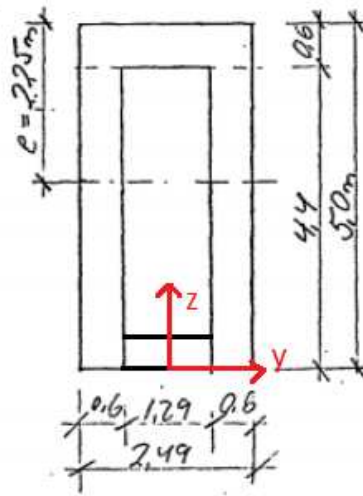
$$J := a \cdot b^3 \cdot \left(\frac{16}{3} - 3.36 \cdot \frac{b}{a} \cdot \left(1 - \frac{b^4}{12 \cdot a^4} \right) \right) = 9.85 \quad [\text{m}^4]$$

Tower cross beam

Shape from original calculations:



Assumed shape (hollow section):



$b_o := 2.49$ Outer width [m]
 $b_i := 1.29$ Inner width [m]
 $h_o := 5$ Outer height [m]
 $h_i := 3.8$ Inner height [m]

$A_o := b_o \cdot h_o = 12.45$ Outer area [m²]
 $A_i := b_i \cdot h_i = 4.902$ Inner area [m²]

$A := A_o - A_i = 7.548$ Area of the cross section [m²]

Second moment of area (I_y/I_z):

$$I_y := \left(\frac{1}{12} \right) \cdot b_o \cdot (h_o)^3 - \left(\frac{1}{12} \right) \cdot b_i \cdot (h_i)^3 = 20.039 \quad [\text{m}^4]$$

$$I_z := \left(\frac{1}{12} \right) \cdot h_o \cdot (b_o)^3 - \left(\frac{1}{12} \right) \cdot h_i \cdot (b_i)^3 = 5.753 \quad [\text{m}^4]$$

Torsion constant

Assuming thin walled hollow cross section (Bredt's formula)

$t_b := 0.6$ Thickness of the section [m]

$t_h := 0.6$

$b' := (2.49) - t_h = 1.89$ Width (wall center line) [m]

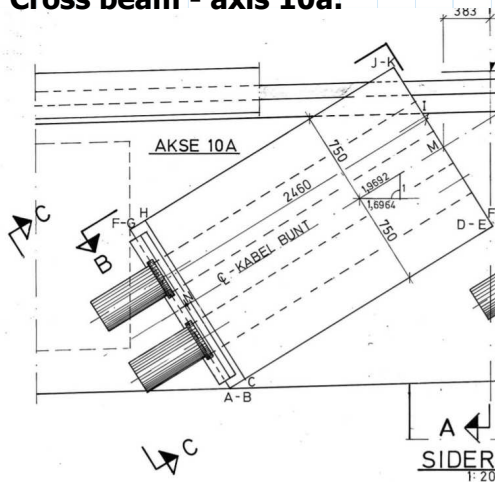
$h' := (5.0) - t_b = 4.4$ Height (wall center line) [m]

$A' := b' \cdot h' = 8.316$ Area enclosed by the center line [m²]

$$J := 4 \cdot \frac{A'^2}{\left(\frac{b'}{t_b} + \frac{h'}{t_h} + \frac{b'}{t_b} + \frac{h'}{t_h} \right)} = 13.193 \quad [\text{m}^4]$$

Mechanical properties of concrete cross beams

Cross beam - axis 10a:



$$\alpha_{10a} := \operatorname{atan}\left(\frac{1}{1.6964}\right) = 0.533 \quad \text{Angle of cross beam 10a [rad]}$$

$$\alpha_{10a_model} := \operatorname{atan}\left(\frac{50.4523 - 0.9776}{120 - 36.6}\right) = 0.535 \quad \text{Attached cable angle in the Abaqus-model (verification) [rad]}$$

$$\Delta y_{10a} := 2.460 \quad \text{Local width of the cross section [m]}$$

$$\Delta z_{10a} := 1.500 \quad \text{Local height of the cross section [m]}$$

$$A_{10a} := \Delta y_{10a} \cdot \Delta z_{10a} = 3.69 \quad \text{Area of cross beam 10a [m}^2\text{]}$$

Second moment of area (I_y, I_z) of cross beam 10a:

$$I_{y'_{10a}} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot \Delta y_{10a} \cdot (\Delta z_{10a})^3 = 0.692 \quad \text{[m}^4\text{]}$$

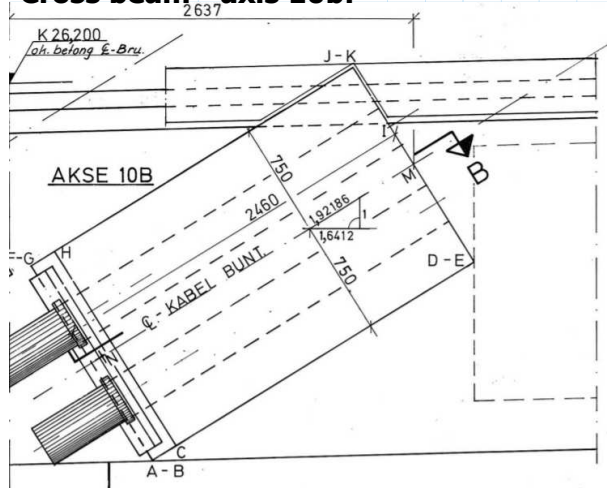
$$I_{z'_{10a}} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot \Delta z_{10a} \cdot (\Delta y_{10a})^3 = 1.861 \quad \text{[m}^4\text{]}$$

Rotate with respect to area center:

$$I_{y_{10a}} := \left(I_{y'_{10a}} \cdot (\cos(\alpha_{10a}))^2 + I_{z'_{10a}} \cdot (\sin(\alpha_{10a}))^2 \right) = 0.993 \quad \text{[m}^4\text{]}$$

$$I_{z_{10a}} := \left(I_{y'_{10a}} \cdot (\sin(\alpha_{10a}))^2 + I_{z'_{10a}} \cdot (\cos(\alpha_{10a}))^2 \right) = 1.559 \quad \text{[m}^4\text{]}$$

Cross beam - axis 10b:



$$\alpha_{10b} := \text{atan}\left(\frac{1}{1.6412}\right) = 0.547 \quad \text{Angle of cross beam 10b [rad]}$$

$$\alpha_{10b_model} := \text{atan}\left(\frac{50.4523 - 1.0577}{120 - 39.6}\right) = 0.551 \quad \text{Attached cable angle in the Abaqus-model (verification) [rad]}$$

$$\Delta y_{10b} := 2.460 \quad [\text{m}]$$

$$\Delta z_{10b} := 1.500 \quad [\text{m}]$$

$$A_{10b} := \Delta y_{10b} \cdot \Delta z_{10b} = 3.69 \quad \text{Area of cross beam 10b [m}^2\text{]}$$

Second moment of area (I_y, I_z) of cross beam 10b:

$$I_{y'_{10b}} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot \Delta y_{10b} \cdot (\Delta z_{10b})^3 = 0.692 \quad [\text{m}^4]$$

$$I_{z'_{10b}} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot \Delta z_{10b} \cdot (\Delta y_{10b})^3 = 1.861 \quad [\text{m}^4]$$

Rotate with respect to area center:

$$I_{y_{10b}} := \left(I_{y'_{10b}} \cdot (\cos(\alpha_{10b}))^2 + I_{z'_{10b}} \cdot (\sin(\alpha_{10b}))^2 \right) = 1.008 \quad [\text{m}^4]$$

$$I_{z_{10b}} := \left(I_{y'_{10b}} \cdot (\sin(\alpha_{10b}))^2 + I_{z'_{10b}} \cdot (\cos(\alpha_{10b}))^2 \right) = 1.544 \quad [\text{m}^4]$$

Cross beam - axis 11:

For cross beam in axis 11, the angle of inclination is estimated from the model

$$\alpha_{11} := \operatorname{atan}\left(\frac{50.4523 - 2.1651}{120 - 82}\right) = 0.904 \quad \text{Attached cable angle in the Abaqus-model [rad]}$$

$$\Delta y_{11} := 2.460 \quad [\text{m}]$$

$$\Delta z_{11} := 1.500 \quad [\text{m}]$$

$$A_{11} := \Delta y_{11} \cdot \Delta z_{11} = 3.69 \quad \text{Area of cross beam 11 [m}^2\text{]}$$

Second moment of area (I_y, I_z) of cross beam 11:

$$Iy'_{11} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot \Delta y_{11} \cdot (\Delta z_{11})^3 = 0.692 \quad [\text{m}^4]$$

$$Iz'_{11} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot \Delta z_{11} \cdot (\Delta y_{11})^3 = 1.861 \quad [\text{m}^4]$$

Rotate with respect to area center:

$$Iy_{11} := \left(Iy'_{11} \cdot (\cos(\alpha_{11}))_2^2 + Iz'_{11} \cdot (\sin(\alpha_{11}))_2^2 \right) = 1.414 \quad [\text{m}^4]$$

$$Iz_{11} := \left(Iy'_{11} \cdot (\sin(\alpha_{11}))_2^2 + Iz'_{11} \cdot (\cos(\alpha_{11}))_2^2 \right) = 1.139 \quad [\text{m}^4]$$

Torsion constant (10a/10b/11):

Assuming a rectangular section

Formula from "Roark's Formulas for Stress and Strains"

$$a := \frac{2.460}{2} = 1.23 \quad \text{Half the length of the long side}$$

$$b := \frac{1.500}{2} = 0.75 \quad \text{Half the length of the short side}$$

$$J := a \cdot b^3 \cdot \left(\frac{16}{3} - 3.36 \cdot \frac{b}{a} \cdot \left(1 - \frac{b^4}{12 \cdot a^4} \right) \right) = 1.717 \quad [\text{m}^4]$$

Anchoring coordinates check, cross beam 10a:

Estimating anchoring point as in the middle of the cross beam (between M and N), NB: the abaqus model uses z as height coordinate

$$x_{10a} := \frac{(82.383 + 84.440)}{2} = 83.412 \quad (\text{Distance from bridge})$$

$$y_{10a} := \frac{(8.907 + 9.074)}{2} = 8.991$$

$$z_{10a} := \frac{(25.557 + 24.344)}{2} = 24.951$$

Transforming coordinates to the coordinate system within the abaqus model:

$$x_{10a_model} := (38 + 44 + 38) - x_{10a} = 36.589$$

$$y_{10a_model} := y_{10a} = 8.991$$

$$z_{10a_model} := z_{10a} - 24.0022 = 0.948$$

For comparison, $x=36.6$ results in $z=0.977586$ (~3cm diff.) from the bridge deck nodes calculations. This difference is negligible. To avoid unnecessary complications in the model, the z-coordinate of the cross beam is chosen to be the same as the node on the deck.

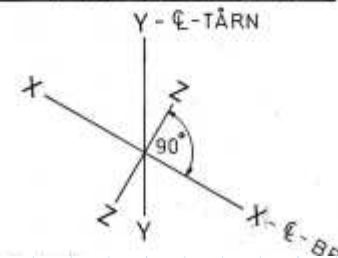
The length of the cross beam is chosen as 9.00m on each side (rounded up from 8.991)

The x-coordinate for axis 10a is chosen as $x=36.6$ m

AKSE 10A

PKT	Koordinater		
	Z	X	Y
A	5,25	-84,121	23,661
B	8,052	-84,121	23,661
C	10,070	-84,000	23,733
D	5,25	-82,002	24,911
E	9,908	-82,002	24,911
F	5,25	-84,883	24,953
G	8,052	-84,883	24,953
H	10,070	-84,762	25,025
I	5,25	X	X
J	7,710	-82,764	26,203
K	9,908	-82,764	26,203

M	8,907	-82,383	25,557
N	9,074	-84,440	24,344



Anchoring coordinates check, cross beam 10b:

Estimating anchoring point as in the middle of the cross beam (between M and N)

$$x_{10b} := \frac{(79.363 + 81.390)}{2} = 80.377$$

$$y_{10b} := \frac{(8.893 + 9.093)}{2} = 8.993$$

$$z_{10b} := \frac{(25.663 + 24.428)}{2} = 25.046$$

Transforming coordinates to the coordinate system within the abaqus model:

$$x_{10b_model} := (38 + 44 + 38) - x_{10b} = 39.624$$

$$y_{10b_model} := y_{10b} = 8.993$$

$$z_{10b_model} := z_{10b} - 24.0022 = 1.043$$

For comparison, $x=39.6$ results in $z=1.057716$ (~1.5cm diff.) from the bridge deck nodes calculations. This difference is negligible. To avoid unnecessary complications in the model, the z-coordinate of the cross beam is chosen to be the same as the node on the deck.

The length of the cross beam is chosen as 9.00m on each side (rounded up from 8.993)

The x-coordinate for axis 10a is chosen as $x=39.6$ m

AKSE 10B

PKT	Koordinater		
	Z	X	Y
A	5,25	-81,073	23,743
B	8,072	-81,073	23,743
C	10,070	-80,930	23,830
D	5,25	-78,973	25,023
E	9,877	-78,973	25,023
F	5,25	-81,853	25,023
G	8,072	-81,853	25,023
H	10,070	-81,710	25,110
I	5,25	X	X
J	7,710	-79,753	26,303
K	9,877	-79,753	26,303

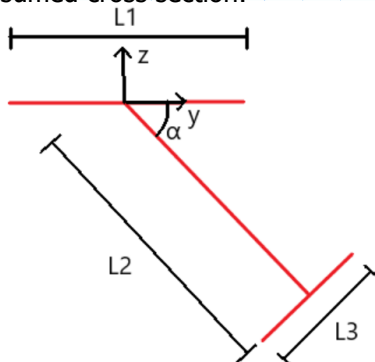
- M	8,893	-79,363	25,663
N	9,093	-81,390	24,428

Y - Koordinater = kotehøyder.

Mechanical properties of steel cross beams

Cross beam, anchoring cable 5

Assumed cross section:



$$\alpha := \text{atan}\left(\frac{50.4523 - 3.4064}{159 - 120}\right) = 0.879$$

Angle of cross beam (using cable angle from the Abaqus model) [rad]

Segment 1

$$d_1 := 0.02$$

Plate thickness [m]

$$\alpha_1 := 0 = 0$$

Angle of inclination of line segment with respect to horizontal line [rad]

$$\Delta y_1 := 2.7$$

Segment length with respect to y and z [m]

$$\Delta z_1 := 0 = 0$$

$$L_1 := \sqrt{(\Delta y_1)^2 + (\Delta z_1)^2} = 2.7$$

Length of line segment [m]

$$y_1 := 0 = 0$$

Coordinates of midpoint of each segment with respect to reference point (y,z) [m]

$$z_1 := \frac{(\Delta z_1)}{2} = 0$$

$$A_1 := L_1 \cdot d_1 = 0.054$$

Area of segment [m²]

Segment 2

$$d_2 := 0.02$$

$$\alpha_2 := \alpha = 0.879$$

$$L_2 := 3.0 = 3$$

$$\Delta y_2 := L_2 \cdot \cos(\alpha_2) = 1.915$$

$$\Delta z_2 := L_2 \cdot \sin(\alpha_2) = 2.31$$

$$y_2 := \frac{(\Delta y_2)}{2} = 0.957$$

$$z_2 := -\frac{(\Delta z_2)}{2} = -1.155$$

$$A_2 := L_2 \cdot d_2 = 0.06$$

Segment 3

$$d_3 := 0.04$$

$$\alpha_3 := \frac{\pi}{2} - \alpha = 0.692$$

$$L_3 := 1.0 = 1$$

$$\Delta y_3 := L_3 \cdot \cos(\alpha_3) = 0.77$$

$$\Delta z_3 := L_3 \cdot \sin(\alpha_3) = 0.638$$

$$y_3 := \Delta y_2 = 1.915$$

$$z_3 := -\Delta z_2 = -2.31$$

$$A_3 := L_3 \cdot d_3 = 0.04$$

Calculating the area center of the cross beam

$$\Sigma z_i A_i := z_1 \cdot A_1 + z_2 \cdot A_2 + z_3 \cdot A_3 = -0.162$$

$$\Sigma y_i A_i := y_1 \cdot A_1 + y_2 \cdot A_2 + y_3 \cdot A_3 = 0.134$$

$$A := A_1 + A_2 + A_3 = 0.154$$

Total area of cross beam [m²]

$$z_c := \frac{\Sigma z_i A_i}{A} = -1.05$$

Area center of cross beam (y,z)
relative to reference point [m]

$$y_c := \frac{\Sigma y_i A_i}{A} = 0.87$$

Calculating the second moment of area of the cross beam

Segment 1

$$I'_{y_1} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot L_1 \cdot (d_1)^3 = 1.8 \cdot 10^{-6} \quad [\text{m}^4]$$

$$I'_{z_1} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot d_1 \cdot (L_1)^3 = 0.033 \quad [\text{m}^4]$$

Rotate and translate with respect to the area center:

$$I_{y_1} := 2 \cdot \left(I'_{y_1} \cdot (\cos(\alpha_1))^2 + I'_{z_1} \cdot (\sin(\alpha_1))^2 + A_1 \cdot (z_1 - z_c)^2 \right) = 0.119 \quad [\text{m}^4]$$

$$I_{z_1} := 2 \cdot \left(I'_{y_1} \cdot (\sin(\alpha_1))^2 + I'_{z_1} \cdot (\cos(\alpha_1))^2 + A_1 \cdot (y_1 - y_c)^2 \right) = 0.147 \quad [\text{m}^4]$$

Segment 2

$$I'_{y_2} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot L_2 \cdot (d_2)^3 = 2 \cdot 10^{-6} \quad [\text{m}^4]$$

$$I'_{z_2} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot d_2 \cdot (L_2)^3 = 0.045 \quad [\text{m}^4]$$

Rotate and translate with respect to the area center:

$$I_{y_2} := 2 \cdot \left(I'_{y_2} \cdot (\cos(\alpha_2))^2 + I'_{z_2} \cdot (\sin(\alpha_2))^2 + A_2 \cdot (z_2 - z_c)^2 \right) = 0.055$$

$$I_{z_2} := 2 \cdot \left(I'_{y_2} \cdot (\sin(\alpha_2))^2 + I'_{z_2} \cdot (\cos(\alpha_2))^2 + A_2 \cdot (y_2 - y_c)^2 \right) = 0.038$$

Segment 3

$$I'_{y_3} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot L_3 \cdot (d_3)^3 = 5.333 \cdot 10^{-6} \quad [\text{m}^4]$$

$$I'_{z_3} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot d_3 \cdot (L_3)^3 = 0.003 \quad [\text{m}^4]$$

Rotate and translate with respect to the area center:

$$I_{y_3} := 2 \cdot \left(I'_{y_3} \cdot (\cos(\alpha_3))^2 + I'_{z_3} \cdot (\sin(\alpha_3))^2 + A_3 \cdot (z_3 - z_c)^2 \right) = 0.13$$

$$I_{z_3} := 2 \cdot \left(I'_{y_3} \cdot (\sin(\alpha_3))^2 + I'_{z_3} \cdot (\cos(\alpha_3))^2 + A_3 \cdot (y_3 - y_c)^2 \right) = 0.091$$

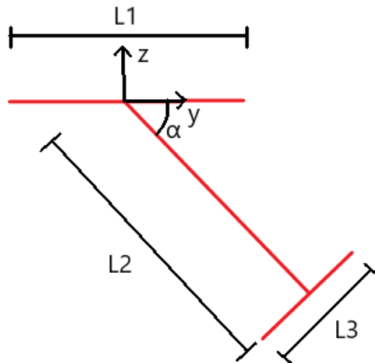
Overall second moment of area (I_y/I_z) of the cross beam (anchoring cable 5)

$$I_y := I_{y_1} + I_{y_2} + I_{y_3} = 0.303 \quad [\text{m}^4]$$

$$I_z := I_{z_1} + I_{z_2} + I_{z_3} = 0.276 \quad [\text{m}^4]$$

Cross beam, anchoring cable 6

Assumed cross section:



$$\alpha := \text{atan}\left(\frac{50.4523 - 3.7277}{203 - 120}\right) = 0.513$$

Angle of cross beam (using cable angle from the Abaqus model) [rad]

Segment 1

$$d_1 := 0.02$$

Plate thickness [m]

$$\alpha_1 := 0 = 0$$

Angle of inclination of line segment with respect to horizontal line [rad]

$$\Delta y_1 := 2.7$$

Segment length with respect to y and z [m]

$$\Delta z_1 := 0 = 0$$

$$L_1 := \sqrt{(\Delta y_1)^2 + (\Delta z_1)^2} = 2.7$$

Length of line segment [m]

$$y_1 := 0 = 0$$

Coordinates of midpoint of each segment with respect to reference point (y,z) [m]

$$z_1 := \frac{(\Delta z_1)}{2} = 0$$

$$A_1 := L_1 \cdot d_1 = 0.054$$

Area of segment [m²]

Segment 2

$$d_2 := 0.02$$

$$\alpha_2 := \alpha = 0.513$$

$$L_2 := 3.0 = 3$$

$$\Delta y_2 := L_2 \cdot \cos(\alpha_2) = 2.614$$

$$\Delta z_2 := L_2 \cdot \sin(\alpha_2) = 1.472$$

$$y_2 := \frac{(\Delta y_2)}{2} = 1.307$$

$$z_2 := -\frac{(\Delta z_2)}{2} = -0.736$$

$$A_2 := L_2 \cdot d_2 = 0.06$$

Segment 3

$$d_3 := 0.04$$

$$\alpha_3 := \frac{\pi}{2} - \alpha = 1.058$$

$$L_3 := 1.0 = 1$$

$$\Delta y_3 := L_3 \cdot \cos(\alpha_3) = 0.491$$

$$\Delta z_3 := L_3 \cdot \sin(\alpha_3) = 0.871$$

$$y_3 := \Delta y_2 = 2.614$$

$$z_3 := -\Delta z_2 = -1.472$$

$$A_3 := L_3 \cdot d_3 = 0.04$$

Calculating the area center of the cross beam

$$\Sigma z_i A_i := z_1 \cdot A_1 + z_2 \cdot A_2 + z_3 \cdot A_3 = -0.103$$

$$\Sigma y_i A_i := y_1 \cdot A_1 + y_2 \cdot A_2 + y_3 \cdot A_3 = 0.183$$

$$A := A_1 + A_2 + A_3 = 0.154$$

Total area of cross beam [m²]

$$z_c := \frac{\Sigma z_i A_i}{A} = -0.669$$

Area center of cross beam (y,z)
relative to reference point [m]

$$y_c := \frac{\Sigma y_i A_i}{A} = 1.188$$

Calculating the second moment of area of the cross beam

Segment 1

$$I'_{y_1} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot L_1 \cdot (d_1)^3 = 1.8 \cdot 10^{-6} \quad [\text{m}^4]$$

$$I'_{z_1} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot d_1 \cdot (L_1)^3 = 0.033 \quad [\text{m}^4]$$

Rotate and translate with respect to the area center:

$$I_{y_1} := 2 \cdot \left(I'_{y_1} \cdot (\cos(\alpha_1))^2 + I'_{z_1} \cdot (\sin(\alpha_1))^2 + A_1 \cdot (z_1 - z_c)^2 \right) = 0.048 \quad [\text{m}^4]$$

$$I_{z_1} := 2 \cdot \left(I'_{y_1} \cdot (\sin(\alpha_1))^2 + I'_{z_1} \cdot (\cos(\alpha_1))^2 + A_1 \cdot (y_1 - y_c)^2 \right) = 0.218 \quad [\text{m}^4]$$

Segment 2

$$I'_{y_2} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot L_2 \cdot (d_2)^3 = 2 \cdot 10^{-6} \quad [\text{m}^4]$$

$$I'_{z_2} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot d_2 \cdot (L_2)^3 = 0.045 \quad [\text{m}^4]$$

Rotate and translate with respect to the area center:

$$I_{y_2} := 2 \cdot \left(I'_{y_2} \cdot (\cos(\alpha_2))^2 + I'_{z_2} \cdot (\sin(\alpha_2))^2 + A_2 \cdot (z_2 - z_c)^2 \right) = 0.022$$

$$I_{z_2} := 2 \cdot \left(I'_{y_2} \cdot (\sin(\alpha_2))^2 + I'_{z_2} \cdot (\cos(\alpha_2))^2 + A_2 \cdot (y_2 - y_c)^2 \right) = 0.07$$

Segment 3

$$I'_{y_3} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot L_3 \cdot (d_3)^3 = 5.333 \cdot 10^{-6} \quad [\text{m}^4]$$

$$I'_{z_3} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot d_3 \cdot (L_3)^3 = 0.003 \quad [\text{m}^4]$$

Rotate and translate with respect to the area center:

$$I_{y_3} := 2 \cdot \left(I'_{y_3} \cdot (\cos(\alpha_3))^2 + I'_{z_3} \cdot (\sin(\alpha_3))^2 + A_3 \cdot (z_3 - z_c)^2 \right) = 0.057$$

$$I_{z_3} := 2 \cdot \left(I'_{y_3} \cdot (\sin(\alpha_3))^2 + I'_{z_3} \cdot (\cos(\alpha_3))^2 + A_3 \cdot (y_3 - y_c)^2 \right) = 0.164$$

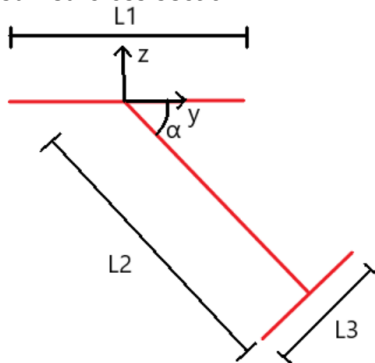
Overall second moment of area (I_y/I_z) of the cross beam (anchoring cable 6)

$$I_y := I_{y_1} + I_{y_2} + I_{y_3} = 0.127 \quad [\text{m}^4]$$

$$I_z := I_{z_1} + I_{z_2} + I_{z_3} = 0.452 \quad [\text{m}^4]$$

Cross beam, anchoring cable 7

Assumed cross section:



$$\alpha := \text{atan}\left(\frac{50.4523 - 3.7056}{252 - 120}\right) = 0.34$$

Angle of cross beam (using cable angle from the Abaqus model) [rad]

Segment 1

$$d_1 := 0.02$$

Plate thickness [m]

$$\alpha_1 := 0 = 0$$

Angle of inclination of line segment with respect to horizontal line [rad]

$$\Delta y_1 := 2.7$$

Segment length with respect to y and z [m]

$$\Delta z_1 := 0 = 0$$

$$L_1 := \sqrt{(\Delta y_1)^2 + (\Delta z_1)^2} = 2.7$$

Length of line segment [m]

$$y_1 := 0 = 0$$

Coordinates of midpoint of each segment with respect to reference point (y, z) [m]

$$z_1 := \frac{(\Delta z_1)}{2} = 0$$

$$A_1 := L_1 \cdot d_1 = 0.054$$

Area of segment [m²]

Segment 2

$$d_2 := 0.02$$

$$\alpha_2 := \alpha = 0.34$$

$$L_2 := 3.0 = 3$$

$$\Delta y_2 := L_2 \cdot \cos(\alpha_2) = 2.828$$

$$\Delta z_2 := L_2 \cdot \sin(\alpha_2) = 1.001$$

$$y_2 := \frac{(\Delta y_2)}{2} = 1.414$$

$$z_2 := -\frac{(\Delta z_2)}{2} = -0.501$$

$$A_2 := L_2 \cdot d_2 = 0.06$$

Segment 3

$$d_3 := 0.04$$

$$\alpha_3 := \frac{\pi}{2} - \alpha = 1.23$$

$$L_3 := 1.0 = 1$$

$$\Delta y_3 := L_3 \cdot \cos(\alpha_3) = 0.334$$

$$\Delta z_3 := L_3 \cdot \sin(\alpha_3) = 0.943$$

$$y_3 := \Delta y_2 = 2.828$$

$$z_3 := -\Delta z_2 = -1.001$$

$$A_3 := L_3 \cdot d_3 = 0.04$$

Calculating the area center of the cross beam

$$\Sigma z_i A_i := z_1 \cdot A_1 + z_2 \cdot A_2 + z_3 \cdot A_3 = -0.07$$

$$\Sigma y_i A_i := y_1 \cdot A_1 + y_2 \cdot A_2 + y_3 \cdot A_3 = 0.198$$

$$A := A_1 + A_2 + A_3 = 0.154$$

Total area of cross beam [m²]

$$z_c := \frac{\Sigma z_i A_i}{A} = -0.455$$

Area center of cross beam (y,z)
relative to reference point [m]

$$y_c := \frac{\Sigma y_i A_i}{A} = 1.285$$

Calculating the second moment of area of the cross beam

Segment 1

$$I'_{y_1} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot L_1 \cdot (d_1)^3 = 1.8 \cdot 10^{-6} \quad [\text{m}^4]$$

$$I'_{z_1} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot d_1 \cdot (L_1)^3 = 0.033 \quad [\text{m}^4]$$

Rotate and translate with respect to the area center:

$$I_{y_1} := 2 \cdot \left(I'_{y_1} \cdot (\cos(\alpha_1))^2 + I'_{z_1} \cdot (\sin(\alpha_1))^2 + A_1 \cdot (z_1 - z_c)^2 \right) = 0.022$$

$$I_{z_1} := 2 \cdot \left(I'_{y_1} \cdot (\sin(\alpha_1))^2 + I'_{z_1} \cdot (\cos(\alpha_1))^2 + A_1 \cdot (y_1 - y_c)^2 \right) = 0.244$$

Segment 2

$$I'_{y_2} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot L_2 \cdot (d_2)^3 = 2 \cdot 10^{-6} \quad [\text{m}^4]$$

$$I'_{z_2} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot d_2 \cdot (L_2)^3 = 0.045 \quad [\text{m}^4]$$

Rotate and translate with respect to the area center:

$$I_{y_2} := 2 \cdot \left(I'_{y_2} \cdot (\cos(\alpha_2))^2 + I'_{z_2} \cdot (\sin(\alpha_2))^2 + A_2 \cdot (z_2 - z_c)^2 \right) = 0.01$$

$$I_{z_2} := 2 \cdot \left(I'_{y_2} \cdot (\sin(\alpha_2))^2 + I'_{z_2} \cdot (\cos(\alpha_2))^2 + A_2 \cdot (y_2 - y_c)^2 \right) = 0.082$$

Segment 3

$$I'_{y_3} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot L_3 \cdot (d_3)^3 = 5.333 \cdot 10^{-6} \quad [\text{m}^4]$$

$$I'_{z_3} := \left(\frac{1}{12}\right) \cdot d_3 \cdot (L_3)^3 = 0.003 \quad [\text{m}^4]$$

Rotate and translate with respect to the area center:

$$I_{y_3} := 2 \cdot \left(I'_{y_3} \cdot (\cos(\alpha_3))^2 + I'_{z_3} \cdot (\sin(\alpha_3))^2 + A_3 \cdot (z_3 - z_c)^2 \right) = 0.03$$

$$I_{z_3} := 2 \cdot \left(I'_{y_3} \cdot (\sin(\alpha_3))^2 + I'_{z_3} \cdot (\cos(\alpha_3))^2 + A_3 \cdot (y_3 - y_c)^2 \right) = 0.191$$

Overall second moment of area (I_y/I_z) of the cross beam (anchoring cable 7)

$$I_y := I_{y_1} + I_{y_2} + I_{y_3} = 0.062 \quad [\text{m}^4]$$

$$I_z := I_{z_1} + I_{z_2} + I_{z_3} = 0.517 \quad [\text{m}^4]$$

Torsion constant and warping constant for all steel cross beams:

Assuming wide flange beam with unequal flanges

Formula from "Roark's Formulas for Stress and Strain"

Assuming top flange is straight

$b_1 := L_1 = 2.7$	Width of top flange [m]
$b_2 := L_3 = 1$	Width of bottom flange [m]
$h := L_2 = 3$	Height of the beam [m]
$t_1 := d_1 = 0.02$	Thickness of top flange [m]
$t_2 := d_3 = 0.04$	Thickness of bottom flange [m]
$tw := d_2 = 0.02$	Thickness of web [m]

Torsion constant:

$$J := \left(\frac{1}{3}\right) \cdot (t_1^3 \cdot b_1 + t_2^3 \cdot b_2 + tw^3 \cdot h) = 3.653 \cdot 10^{-5} \quad [\text{m}^4]$$

Warping constant:

$$C_w := \frac{(h^2 \cdot t_1 \cdot t_2 \cdot b_1^3 \cdot b_2^3)}{12 \cdot (t_1 \cdot b_1^3 + t_2 \cdot b_2^3)} = 0.027 \quad [\text{m}^6]$$

Cross beam point masses calculations

Substituting the very stiff beam elements within the bridge decks with point masses

Concrete cross beams:

$\rho_{concrete} := 2500$ Density of material (concrete) [kg/m³]

$A_{concrete} := 2.46 \cdot 1.5 = 3.69$ Area of concrete cross beam [m²]

$L_{concrete} := 2 \cdot 5.25$ Width of the concrete bridge deck [m]

$m_{concrete} := \rho_{concrete} \cdot A_{concrete} \cdot L_{concrete} = 9.686 \cdot 10^4$ Resulting point mass [kg]

Steel cross beams:

$\rho_{steel} := 7850$ Density of material (steel) [kg/m³]

$A_{steel} := 0.154 = 0.154$ Area of steel cross beam [m²]

$L_{steel} := 2 \cdot 4.35$ Width of the steel bridge deck [m]

$m_{steel} := \rho_{steel} \cdot A_{steel} \cdot L_{steel} = 1.052 \cdot 10^4$ Resulting point mass [kg]

Concrete material properties

According to NS-EN1992-1-1

Poisson's ratio is assumed to be 0.2 (urisset)

The linear temperature coefficient is assumed to be $10 \cdot 10^{-6} \cdot K^{-1}$

$$t := (2020 - 1978) \cdot 365 = 1.533 \cdot 10^4 \quad \text{Age of the concrete [days]}$$

$$s := 0.38 \quad \text{(Assumed)}$$

$$\beta_{cct} := e^{\left(s \cdot \left(1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{0.5} \right) \right)} = 1.439$$

B35:

$$f_{cm} := 43 \quad \text{[MPa]}$$

$$E_{cm} := 34 \quad \text{[GPa]}$$

$$f_{cmt} := \beta_{cct} \cdot f_{cm} = 61.865 \quad \text{[MPa]}$$

$$E_{cmt} := \left(\frac{f_{cmt}}{f_{cm}} \right)^{0.3} \cdot E_{cm} = 37.92 \quad \text{[GPa]}$$

B45:

$$f_{cm} := 53 \quad \text{[MPa]}$$

$$E_{cm} := 36 \quad \text{[GPa]}$$

$$f_{cmt} := \beta_{cct} \cdot f_{cm} = 76.253 \quad \text{[MPa]}$$

$$E_{cmt} := \left(\frac{f_{cmt}}{f_{cm}} \right)^{0.3} \cdot E_{cm} = 40.151 \quad \text{[GPa]}$$

Prestressing calculations

Tendon profiles with parabolic segments

Formulas from "Design of Prestressed Concrete to Eurocode 2"

$H := 2.354$ Height of deck [m]
 $GC := 1.404$ Geometric center of deck [m]
 $d := 0.2$ Assumed min. cover of cables [m]

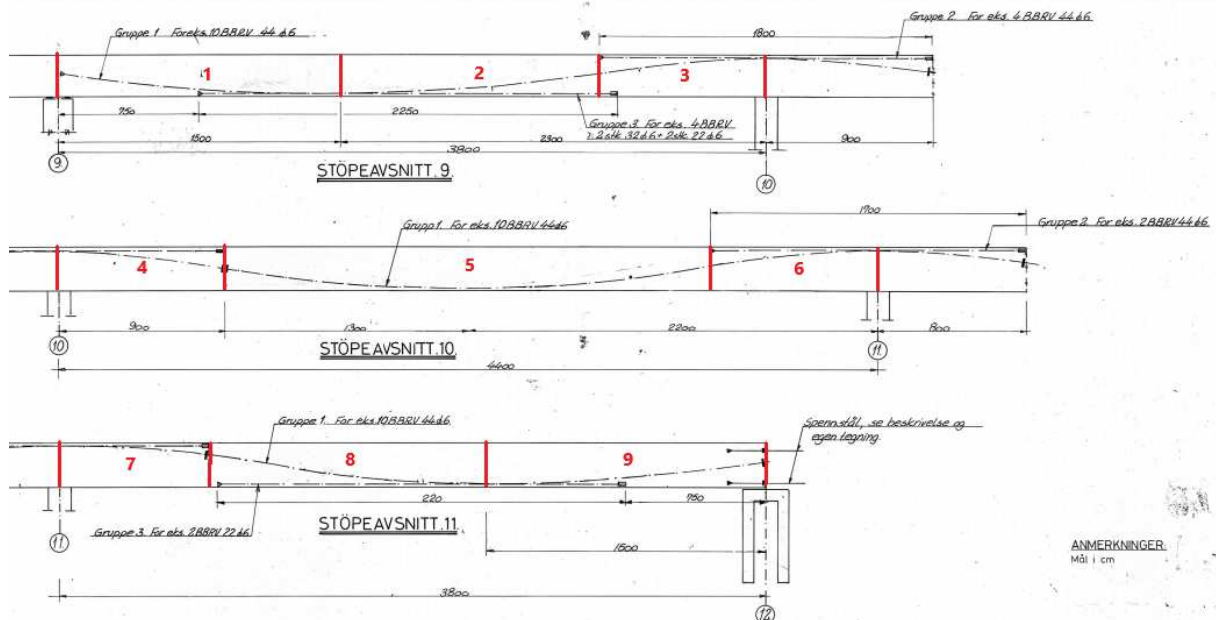
$e1 := GC - d = 1.204$

$e2 := H - GC - d = 0.75$

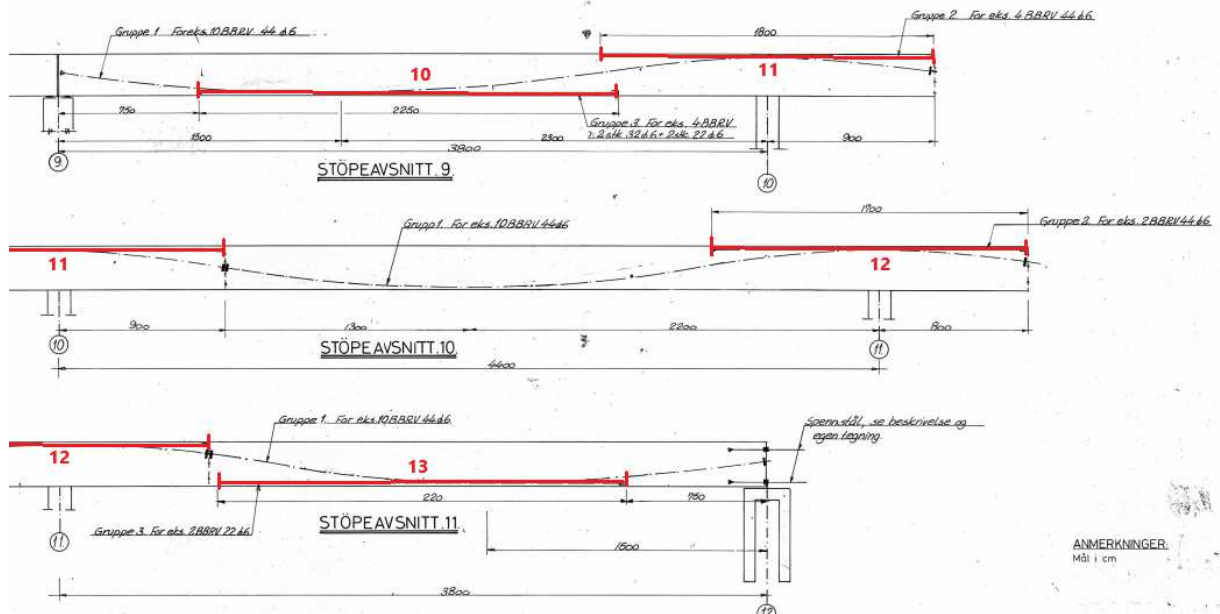
Støpe- etaper	d i rod						Nødv. Tylekraft (Mp)			Min. samlet sp.kraft etter (dosing) (Mp)		
	d1	d2	d3	L1	L2	L	Gr.1	Gr.2	Gr.3	Gr.1	Gr.2	Gr.3
	9.							2000	800	480	1425	640
10.							2000	400	-	1530	370	-
11.							2000	-	200	1425	-	160

NB. Plasing av kabler se tegn.nr. og

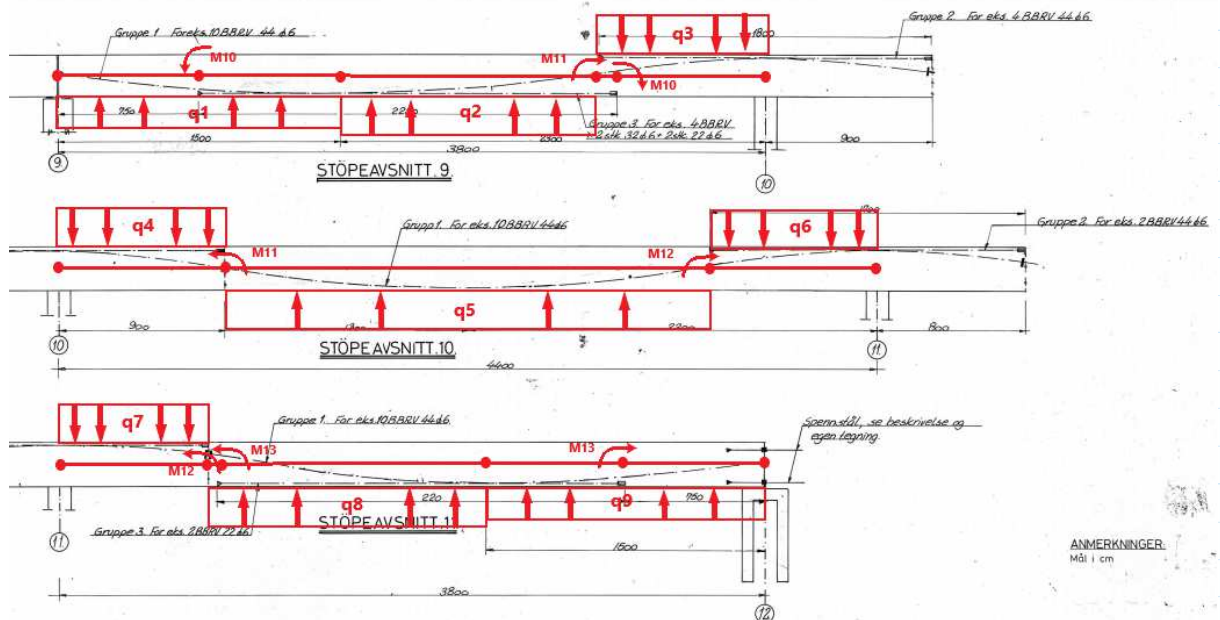
Overview of curved cable segments



Overview of straight cables



Node map with equivalent loads (axial forces not shown)



Group 1 cable forces (from table):

$$P_{gr1_støp9} := 1425 \cdot 9.81 = 1.3979 \cdot 10^4 \quad [\text{kN}]$$

$$P_{gr1_støp10} := 1530 \cdot 9.81 = 1.5009 \cdot 10^4 \quad [\text{kN}]$$

$$P_{gr1_støp11} := 1425 \cdot 9.81 = 1.3979 \cdot 10^4 \quad [\text{kN}]$$

Axis 9 - 10

$$l := 38 \quad [\text{m}]$$

$$\alpha_1 := \frac{23}{38} = 0.6053$$

$$\alpha_2 := \frac{9}{38} = 0.2368$$

$$hi := \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \cdot (e_1 + e_2) = 0.7646$$

Segment 1, x=0m -> x=15m

$$\kappa_{p1} := 2 \cdot \frac{e_1}{l^2 (1 - \alpha_1)^2} = 0.0107$$

$$q_1 := P_{gr1_støp9} \cdot \kappa_{p1} = 149.609 \quad [\text{kN/m}]$$

Segment 2, x=15m -> x=29m

$$\kappa_{p2} := 2 \cdot \frac{(e_1 + e_2 - hi)}{l^2 \cdot (\alpha_1 - \alpha_2)^2} = 0.0121$$

$$q_2 := P_{gr1_støp9} \cdot \kappa_{p2} = 169.6612 \quad [\text{kN/m}]$$

Segment 3, x=29m -> x=38m

$$\kappa_{p3} := 2 \cdot \frac{(e_1 + e_2)}{\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot l^2} = 0.0189$$

$$q_3 := P_{gr1_støp9} \cdot \kappa_{p3} = 263.9174 \quad [\text{kN/m}]$$

Axis 10 - 11

$$l := 44 \quad [\text{m}]$$

$$\alpha_1 := \frac{22}{44} = 0.5$$

$$\alpha_2 := \frac{9}{44} = 0.2045$$

$$hi := \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \cdot (e_1 + e_2) = 0.7994$$

Segment 4, x=38m -> x=47m

$$\kappa_{p3} := 2 \cdot \frac{(e_1 + e_2)}{\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot l^2} = 0.0197$$

$$q_4 := P_{gr1_støp9} \cdot \kappa_{p3} = 275.9137 \quad [\text{kN/m}]$$

Segment 5, x=47m -> x=73m

$$\kappa_{p2} := 2 \cdot \frac{(e_1 + e_2 - hi)}{l^2 \cdot (\alpha_1 - \alpha_2)^2} = 0.0137$$

$$q_5 := P_{gr1_støp10} \cdot \kappa_{p2} = 205.0921 \quad [\text{kN/m}]$$

Segment 6, x=73 -> x=82

$$q_6 := P_{gr1_støp10} \cdot \kappa p_3 = 296.2442 \quad [\text{kN/m}]$$

Axis 11 - 12

$$l := 38 \quad [\text{m}]$$

$$\alpha_1 := \frac{23}{38} = 0.6053$$

$$\alpha_2 := \frac{9}{38} = 0.2368$$

$$h_i := \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \cdot (e_1 + e_2) = 0.7646$$

Segment 7, x=82m -> x=90m

$$\kappa p_3 := 2 \cdot \frac{(e_1 + e_2)}{\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot l^2} = 0.0189$$

$$q_7 := P_{gr1_støp10} \cdot \kappa p_3 = 283.364 \quad [\text{kN/m}]$$

Segment 8, x=90m -> x=105m

$$\kappa p_2 := 2 \cdot \frac{(e_1 + e_2 - h_i)}{l^2 \cdot (\alpha_1 - \alpha_2)^2} = 0.0121$$

$$q_8 := P_{gr1_støp11} \cdot \kappa p_2 = 169.6612 \quad [\text{kN/m}]$$

Segment 9, x=105m -> x=120m

$$\kappa p_1 := 2 \cdot \frac{e_1}{(l^2 (1 - \alpha_1)^2)} = 0.0107$$

$$q_9 := P_{gr1_støp11} \cdot \kappa p_1 = 149.609 \quad [\text{kN/m}]$$

Group 3 cable forces

$$P_{gr3_støp9} := 385 \cdot 9.81 = 3.7769 \cdot 10^3 \quad [\text{kN}]$$

$$P_{gr3_støp11} := 160 \cdot 9.81 = 1.5696 \cdot 10^3 \quad [\text{kN}]$$

Segment 10, x=7.5m -> x=30m

$$M_{10} := P_{gr3_støp9} \cdot e_1 = 4.5473 \cdot 10^3 \quad [\text{kNm}]$$

Segment 13, x=90.5m -> x=112.5m

$$M_{13} := P_{gr3_støp11} \cdot e_1 = 1.8898 \cdot 10^3 \quad [\text{kNm}]$$

Group 2 cables

$$P_{gr2_støp9} := 640 \cdot 9.81 = 6.2784 \cdot 10^3 \quad [\text{kN}]$$

$$P_{gr2_støp10} := 370 \cdot 9.81 = 3.6297 \cdot 10^3 \quad [\text{kN}]$$

Segment 11, x=29m -> x=47m

$$M_{11} := P_{gr2_støp9} \cdot e_2 = 4.7088 \cdot 10^3 \quad [\text{kNm}]$$

Segment 12, x=73m -> x=90m

$$M_{12} := P_{gr2_støp10} \cdot e_2 = 2.7223 \cdot 10^3 \quad [\text{kNm}]$$

Prestressing force components, start of cast 9 $y=0.0054x^2-0.1605x$, $x[0,15]$, $y[0,-1.204]$ (Segment 1) $\theta_1 := -0.1605$ Cable slope [rad]

$$P_{h1} := P_{gr1_støp9} = 1.3979 \cdot 10^4 \quad [\text{kN}]$$

$$P_{v1} := P_{gr1_støp9} \cdot (\theta_1) = -2.2437 \cdot 10^3 \quad [\text{kN}]$$

Prestressing force components, end of cast 9 $y=0.0071x^2-0.1852x$, $x[0,13]$, $y[0,-1.204]$ (Segment 5) $\theta_2 := 0.1852$ Cable slope [rad]

$$P_{h2} := P_{gr1_støp9} = 1.3979 \cdot 10^4 \quad [\text{kN}]$$

$$P_{v2} := P_{gr1_støp9} \cdot (\theta_2) = 2.589 \cdot 10^3 \quad [\text{kN}]$$

Prestressing force components, start of cast 10 $y=0.0071x^2-0.1852x$, $x[0,13]$, $y[0,-1.204]$ (Segment 5) $\theta_3 := -\theta_2 = -0.1852$ Cable slope [rad]

$$P_{h3} := P_{gr1_støp10} = 1.5009 \cdot 10^4 \quad [\text{kN}]$$

$$P_{v3} := P_{gr1_støp10} \cdot (\theta_3) = -2.7797 \cdot 10^3 \quad [\text{kN}]$$

Prestressing force components, end of cast 10 $y=0.0073x^2-0.1897x$, $x[0,15]$, $y[0,-1.204]$ (Segment 8) $\theta_4 := 0.1897$ Cable slope [rad]

$$P_{h4} := P_{gr1_støp10} = 1.5009 \cdot 10^4 \quad [\text{kN}]$$

$$P_{v4} := P_{gr1_støp10} \cdot (\theta_4) = 2.8473 \cdot 10^3 \quad [\text{kN}]$$

Prestressing force components, start of cast 11 $y=0.0073x^2-0.1897x$, $x[0,15]$, $y[0,-1.204]$ (Segment 8) $\theta_5 := -\theta_4 = -0.1897$ Cable slope [rad]

$$P_{h5} := P_{gr1_støp11} = 1.3979 \cdot 10^4 \quad [\text{kN}]$$

$$P_{v5} := P_{gr1_støp11} \cdot (\theta_5) = -2.6519 \cdot 10^3 \quad [\text{kN}]$$

Prestressing force components, end of cast 11 $y=0.0054x^2-0.1605x$, $x[0,15]$, $y[0,-1.204]$ (Segment 9) $\theta_6 := -0.1605$ Cable slope [rad]

$$P_{h6} := P_{gr1_støp11} = 1.3979 \cdot 10^4 \quad [\text{kN}]$$

$$P_{v6} := P_{gr1_støp11} \cdot (\theta_6) = -2.2437 \cdot 10^3 \quad [\text{kN}]$$

Abaqus model coordinate transformation

$$Fall := (0.02671) = 0.0267$$

Linear decline of deck top coordinates (from axis 9 to pel 45+7.52m)

$$x_{p457.52m} := 457.52$$

$$z_{p457.52m} := 26.968$$

Global x,z -coordinates of top of deck, pel 45+7.52m

$$x_{p393m} := 393$$

$$z_{p393m} := z_{p457.52m} - Fall \cdot (x_{p457.52m} - x_{p393m}) = 25.2447$$

Global x,z-coordinates of top of deck, axis 9

In the Abaqus model, (0,0,0) is set to c.g. of the deck in axis 9

$$H := 2.476$$

$$z_{cg} := 1.404$$

Height of deck (concrete)

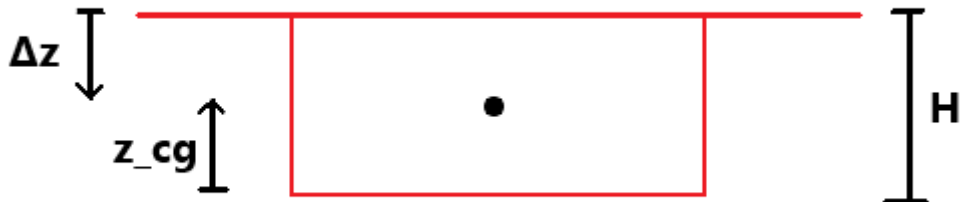
Distance from bottom of deck to c.g.

$$\Delta z := H - z_{cg} = 1.072$$

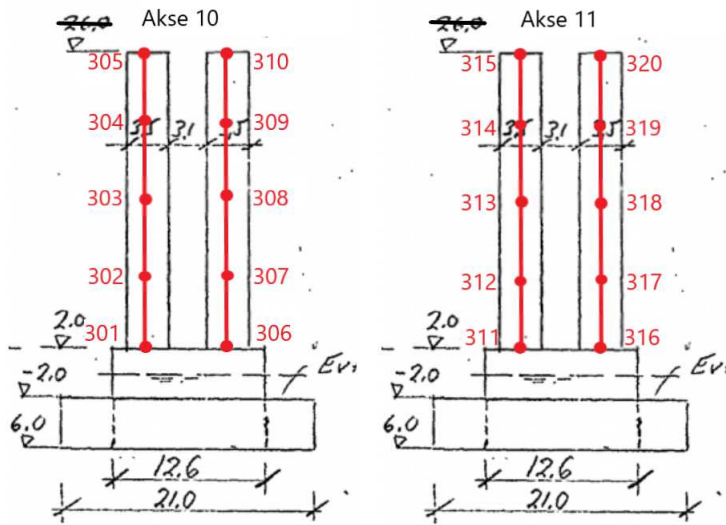
Distance from top of deck to c.g.

$$z_{\varphi} := z_{p393m} - \Delta z = 24.1727$$

Transformation value, global z-coordinates to z-coordinates in the Abaqus model



Column nodes



$$w_columns := 3.1 + 3.5 = 6.6 \quad [\text{m}]$$

(+/-) y-coordinates of the columns:

$$y_columns := \frac{w_columns}{2} = 3.3$$

Node 301/306:

$$z_{301} := 2.0 - z_{\varphi} = -22.1727$$

Node 305/310:

$$z_{305} := 1.01498 = 1.015$$

Node 302/307:

$$z_{302} := z_{301} + (z_{305} - z_{301}) \cdot \left(\frac{1}{4}\right) = -16.3758$$

Node 303/308:

$$z_{303} := z_{301} + (z_{305} - z_{301}) \cdot \left(\frac{2}{4}\right) = -10.5788$$

Node 304/309:

$$z_{304} := z_{301} + (z_{305} - z_{301}) \cdot \left(\frac{3}{4}\right) = -4.7819$$

Node 311/316:

$$z_{311} := 2.0 - z_{\varphi} = -22.1727$$

Node 315/320:

$$z_{315} := 2.1651 = 2.1651$$

Node 312/317:

$$z_{312} := z_{311} + (z_{315} - z_{311}) \cdot \left(\frac{1}{4}\right) = -16.0882$$

Node 313/318:

$$z_{313} := z_{311} + (z_{315} - z_{311}) \cdot \left(\frac{2}{4}\right) = -10.0038$$

Node 314/319:

$$z_{314} := z_{311} + (z_{315} - z_{311}) \cdot \left(\frac{3}{4}\right) = -3.9193$$

Tower nodes

Node 222

$$y_{222} := 0 = 0$$

$$z_{222} := 23.2 - z_{\varphi} = -0.9727$$

Node 204

$$y_{204} := 8.80 + \frac{2.25}{2} = 9.925$$

$$z_{204} := z_{222} = -0.9727$$

Node 221

$$y_{221} := \frac{(y_{204} + y_{222})}{2} = 4.9625$$

$$z_{221} := z_{222} = -0.9727$$

Node 201

$$y_{201} := 14.5 - \frac{2.25}{2} = 13.375$$

$$z_{201} := z_{222} - (23.2 - 2) = -22.1727$$

Calculating the angle of the tower legs

$$\alpha := \operatorname{atan}\left(\frac{(z_{204} - z_{201})}{(y_{201} - y_{204})}\right) = 1.4095 \quad [\text{rad}]$$

Node 202

$$z_{202} := z_{201} + 3.5 = -18.6727$$

$$y_{202} := y_{201} - \frac{(z_{202} - z_{201})}{\tan(\alpha)} = 12.8054$$

Node 208

$$z_{208} := 78.75 - z_{\varphi} = 54.5773$$

$$y_{208} := y_{204} - \frac{(z_{208} - z_{204})}{\tan(\alpha)} = 0.885$$

Node 206

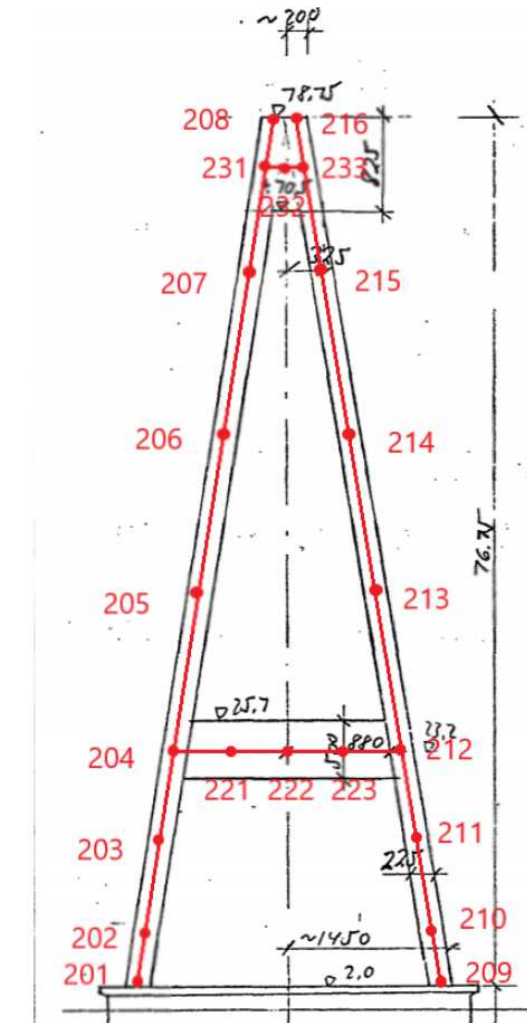
$$z_{206} := z_{204} + \frac{(z_{208} - z_{204}) \cdot \left(\frac{2}{4}\right)}{1} = 26.8023$$

$$y_{206} := y_{204} - \frac{(z_{206} - z_{204})}{\tan(\alpha)} = 5.405$$

Node 231

$$z_{231} := 74.625 - \frac{(23.2 - z_{222})}{2} = 50.4523$$

$$y_{231} := y_{204} - \frac{(z_{231} - z_{204})}{\tan(\alpha)} = 1.5563$$



Node 203

$$z_{203} := \frac{(z_{202} + z_{204})}{2} = -9.8227$$

$$y_{203} := y_{201} - \frac{2(z_{203} - z_{201})}{\tan(\alpha)} = 11.3652$$

Node 205

$$z_{205} := z_{204} + \frac{(z_{208} - z_{204}) \cdot \left(\frac{1}{4}\right)}{1} = 12.9148$$

$$y_{205} := y_{204} - \frac{(z_{205} - z_{204})}{\tan(\alpha)} = 7.665$$

Node 207

$$z_{207} := z_{204} + \frac{(z_{208} - z_{204}) \cdot \left(\frac{3}{4}\right)}{1} = 40.6898$$

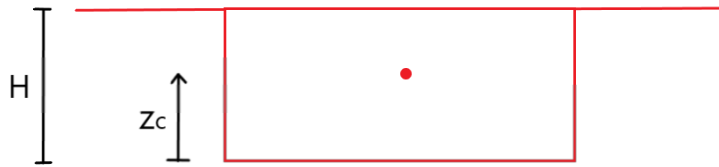
$$y_{207} := y_{204} - \frac{(z_{207} - z_{204})}{\tan(\alpha)} = 3.145$$

Node 232

$$z_{232} := z_{231} = 50.4523$$

$$y_{222} := 0 = 0$$

Height difference between concrete and steel deck



Concrete deck:

$H_{concrete} := 2.476$ Height of the concrete deck (centerline) [m]
 $z_{concrete} := 1.404$ Area center/center of gravity of the cross section
(distance from the bottom of the deck) [m]

Steel deck:

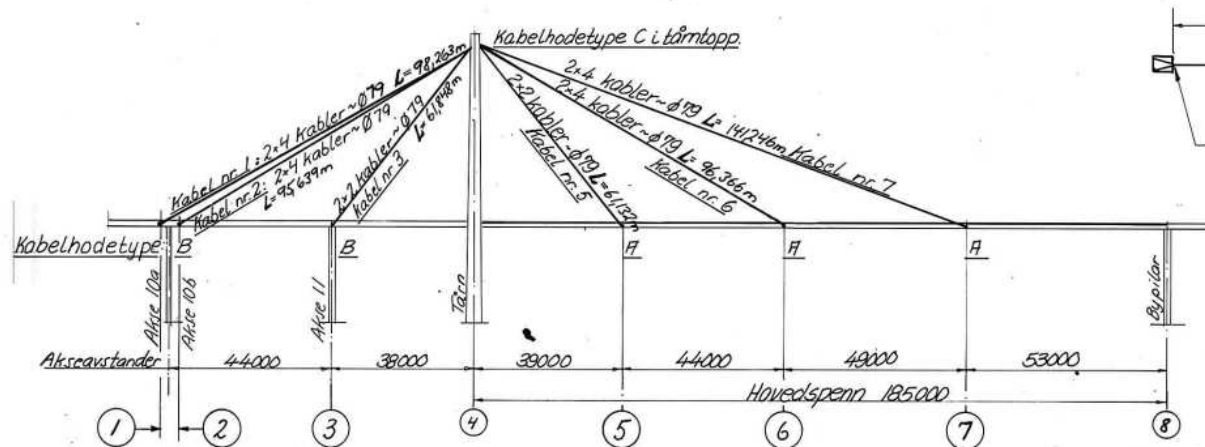
$H_{steel} := 2.450$
 $z_{steel} := 1.374$

Assuming the top of both decks have the same global height coordinate

Height difference between the deck nodes:

$$\Delta z := (H_{concrete} - z_{concrete}) - (H_{steel} - z_{steel}) = -0.004 \quad [\text{m}]$$

Calculations cables



OVERSIKT.

1:1000.

Cable type A: 2x4 ~Ø79

Cable type B: 2x2 ~Ø79

Cable 1: type A

Cable 2: type A

Cable 3: type B

Cable 5: type B

Cable 6: type A

Cable 7: type A

ANMERKNINGER:

Kabelhode, støpestål GS-52-3 DIN1681

Kabeltverrsnitt 4272mm² ~ Ø 79mm.

Montasjespindel må sikres mot å skru seg ut under bruk.

Area per cable strand:

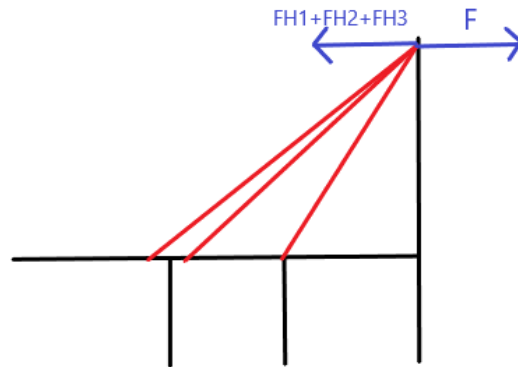
$A := 4272 \quad [\text{mm}^2]$

Cross section area of cables of each type:

$A_A := 4 \cdot A = 1.7088 \cdot 10^4 \quad [\text{mm}^2]$

$A_B := 2 \cdot A = 8.544 \cdot 10^3 \quad [\text{mm}^2]$

Cable forces - cable 1, 2, 3



Cable areas:

$$\begin{aligned} A1 &:= A_A = 1.7088 \cdot 10^4 && [\text{mm}^2] \\ A2 &:= A_A = 1.7088 \cdot 10^4 && [\text{mm}^2] \\ A3 &:= A_B = 8.544 \cdot 10^3 && [\text{mm}^2] \end{aligned}$$

Cable angles:

$$\begin{aligned} \alpha1 &:= 0.535 && [\text{rad}] \\ \alpha2 &:= 0.551 && [\text{rad}] \\ \alpha3 &:= 0.904 && [\text{rad}] \end{aligned}$$

Cable forces:

$$\begin{aligned} F1 &:= A1 \cdot \sigma1 \\ F2 &:= A2 \cdot \sigma2 \\ F3 &:= A3 \cdot \sigma3 \end{aligned}$$

Horizontal components of cable forces:

$$\begin{aligned} FH1 &:= \cos(\alpha1) \cdot F1 \\ FH2 &:= \cos(\alpha2) \cdot F2 \\ FH3 &:= \cos(\alpha3) \cdot F3 \end{aligned}$$

Assuming the horizontal forces to be equal for all three cables

$$\begin{aligned} FH2 &:= FH1 \\ FH3 &:= FH1 \end{aligned}$$

Ratios of cable stresses (compared to stress in cable 1):

$$\sigma1 := 1$$

$$\sigma2 := \frac{\cos(\alpha1) \cdot A1 \cdot \sigma1}{\cos(\alpha2) \cdot A2} = 1.0097$$

$$\sigma3 := \frac{\cos(\alpha1) \cdot A1 \cdot \sigma1}{\cos(\alpha3) \cdot A3} = 2.7819$$

Stiffness properties for cables (Beam elements)

$$r_A := \sqrt{\frac{A_A}{\pi}} = 73.7515 \quad [\text{mm}]$$

$$r_B := \sqrt{\frac{A_B}{\pi}} = 52.1502 \quad [\text{mm}]$$

Second moment of area of the cables (both directions), assuming 5% of circular section

$$I_A := \pi \cdot \frac{(r_A)^4}{4} \cdot 0.05 = 1.1618 \cdot 10^6 \quad [\text{mm}^4]$$

$$I_B := \pi \cdot \frac{(r_B)^4}{4} \cdot 0.05 = 2.9046 \cdot 10^5 \quad [\text{mm}^4]$$

$$I_A \cdot 10^{-12} = 1.1618 \cdot 10^{-6} \quad [\text{m}^4]$$

$$I_B \cdot 10^{-12} = 2.9046 \cdot 10^{-7} \quad [\text{m}^4]$$

Torsion constant for the cables

$$J_A := 2 \cdot I_A = 2.3237 \cdot 10^6 \quad [\text{mm}^4]$$

$$J_B := 2 \cdot I_B = 5.8092 \cdot 10^5 \quad [\text{mm}^4]$$

$$J_A \cdot 10^{-12} = 2.3237 \cdot 10^{-6} \quad [\text{m}^4]$$

$$J_B \cdot 10^{-12} = 5.8092 \cdot 10^{-7} \quad [\text{m}^4]$$

Initial axial forces for (beam general section only)

$$\text{StressCable1} := 310.2158 \cdot 10^6 \quad [\text{N/m}^2]$$

$$\text{StressCable2} := 313.2259 \cdot 10^6 \quad [\text{N/m}^2]$$

$$\text{StressCable3} := 862.9947 \cdot 10^6 \quad [\text{N/m}^2]$$

$$\text{StressCable5} := 271.6491 \cdot 10^6 \quad [\text{N/m}^2]$$

$$\text{StressCable6} := 200.4405 \cdot 10^6 \quad [\text{N/m}^2]$$

$$\text{StressCable7} := 441.8283 \cdot 10^6 \quad [\text{N/m}^2]$$

$$N1 := \text{StressCable1} \cdot A_A \cdot 10^{-6} = 5.301 \cdot 10^6$$

$$N2 := \text{StressCable2} \cdot A_A \cdot 10^{-6} = 5.3524 \cdot 10^6$$

$$N3 := \text{StressCable3} \cdot A_B \cdot 10^{-6} = 7.3734 \cdot 10^6$$

$$N5 := \text{StressCable5} \cdot A_B \cdot 10^{-6} = 2.321 \cdot 10^6$$

$$N6 := \text{StressCable6} \cdot A_A \cdot 10^{-6} = 3.4251 \cdot 10^6$$

$$N8 := \text{StressCable7} \cdot A_A \cdot 10^{-6} = 7.55 \cdot 10^6$$

Cable anchoring coordinates

ORIGIN := 1

Anchoring point top of tower:
 $Node222 := [120 \ 0 \ 50.4523]^T$

Anchoring points cable 1:
 $Node101 := [36.6 \ -9 \ 0.9776]^T$
 $Node104 := [36.6 \ 9 \ 0.9776]^T$

Anchoring points cable 2:
 $Node105 := [39.6 \ -9 \ 1.0577]^T$
 $Node108 := [39.6 \ 9 \ 1.0577]^T$

Anchoring points cable 3:
 $Node109 := [82 \ -9 \ 2.1651]^T$
 $Node112 := [82 \ 9 \ 2.1651]^T$

Anchoring points cable 5:
 $Node113 := [159 \ -8.35 \ 3.5004]^T$
 $Node116 := [159 \ 8.35 \ 3.5004]^T$

Anchoring points cable 6:
 $Node117 := [203 \ -8.35 \ 3.8217]^T$
 $Node120 := [203 \ 8.35 \ 3.8217]^T$

Anchoring points cable 7:
 $Node121 := [252 \ -8.35 \ 3.7996]^T$
 $Node124 := [252 \ 8.35 \ 3.7996]^T$

Calculating beam orientations (n1) for the cable elements

Cable 1

$$V11 := \left[\begin{array}{ccc} Node222_1 - Node101_1 & Node222_2 - Node101_2 & Node222_3 - Node101_3 \end{array} \right]^T = \left[\begin{array}{c} 83.4 \\ 9 \\ 49.4747 \end{array} \right]$$

$$x11 := -\frac{(V11_2 \cdot (0 - Node101_2) + V11_3 \cdot (0))}{V11_1} + Node101_1 = 35.6288$$

$$n1_11 := \left[\begin{array}{ccc} x11 - Node101_1 & 0 - Node101_2 & 0 \end{array} \right]^T = \left[\begin{array}{c} -0.9712 \\ 9 \\ 0 \end{array} \right]$$

$$\alpha11 := \left[\begin{array}{ccc} \frac{n1_11_1}{|n1_11|} & \frac{n1_11_2}{|n1_11|} & \frac{n1_11_3}{|n1_11|} \end{array} \right] = [-0.1073 \ 0.9942 \ 0]$$

$$V12 := \left[\begin{array}{ccc} Node222_1 - Node104_1 & Node222_2 - Node104_2 & Node222_3 - Node104_3 \end{array} \right]^T = \left[\begin{array}{c} 83.4 \\ -9 \\ 49.4747 \end{array} \right]$$

$$x12 := -\frac{(V12_2 \cdot (20 - Node104_2) + V12_3 \cdot (0))}{V12_1} + Node104_1 = 37.7871$$

$$n1_12 := \left[\begin{array}{ccc} x12 - Node104_1 & 20 - Node104_2 & 0 \end{array} \right]^T = \left[\begin{array}{c} 1.1871 \\ 11 \\ 0 \end{array} \right]$$

$$\alpha12 := \left[\begin{array}{ccc} \frac{n1_12_1}{|n1_12|} & \frac{n1_12_2}{|n1_12|} & \frac{n1_12_3}{|n1_12|} \end{array} \right] = [0.1073 \ 0.9942 \ 0]$$

Cable 2

$$V21 := \begin{bmatrix} \text{Node222}_1 - \text{Node105}_1 & \text{Node222}_2 - \text{Node105}_2 & \text{Node222}_3 - \text{Node105}_3 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 80.4 \\ 9 \\ 49.3946 \end{bmatrix}$$

$$x21 := -\frac{(V21_2 \cdot (0 - \text{Node105}_2) + V21_3 \cdot (0))}{V21_1} + \text{Node105}_1 = 38.5925$$

$$n1_21 := \begin{bmatrix} x21 - \text{Node105}_1 & 0 - \text{Node105}_2 & 0 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} -1.0075 \\ 9 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\alpha21 := \begin{bmatrix} \frac{n1_21_1}{|n1_21|} & \frac{n1_21_2}{|n1_21|} & \frac{n1_21_3}{|n1_21|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.1112 & 0.9938 & 0 \end{bmatrix}$$

$$V22 := \begin{bmatrix} \text{Node222}_1 - \text{Node108}_1 & \text{Node222}_2 - \text{Node108}_2 & \text{Node222}_3 - \text{Node108}_3 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 80.4 \\ -9 \\ 49.3946 \end{bmatrix}$$

$$x22 := -\frac{(V22_2 \cdot (20 - \text{Node108}_2) + V22_3 \cdot (0))}{V22_1} + \text{Node108}_1 = 40.8313$$

$$n1_22 := \begin{bmatrix} x22 - \text{Node108}_1 & 20 - \text{Node108}_2 & 0 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 1.2313 \\ 11 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\alpha22 := \begin{bmatrix} \frac{n1_22_1}{|n1_22|} & \frac{n1_22_2}{|n1_22|} & \frac{n1_22_3}{|n1_22|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1112 & 0.9938 & 0 \end{bmatrix}$$

Cable 3

$$V31 := \begin{bmatrix} \text{Node222}_1 - \text{Node109}_1 & \text{Node222}_2 - \text{Node109}_2 & \text{Node222}_3 - \text{Node109}_3 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 38 \\ 9 \\ 48.2872 \end{bmatrix}$$

$$x31 := -\frac{(V31_2 \cdot (0 - \text{Node109}_2) + V31_3 \cdot (0))}{V31_1} + \text{Node109}_1 = 79.8684$$

$$n1_31 := \begin{bmatrix} x31 - \text{Node109}_1 & 0 - \text{Node109}_2 & 0 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} -2.1316 \\ 9 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\alpha31 := \begin{bmatrix} \frac{n1_31_1}{|n1_31|} & \frac{n1_31_2}{|n1_31|} & \frac{n1_31_3}{|n1_31|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.2305 & 0.9731 & 0 \end{bmatrix}$$

$$V32 := \begin{bmatrix} \text{Node222}_1 - \text{Node112}_1 & \text{Node222}_2 - \text{Node112}_2 & \text{Node222}_3 - \text{Node112}_3 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 38 \\ -9 \\ 48.2872 \end{bmatrix}$$

$$x32 := -\frac{(V32_2 \cdot (20 - \text{Node112}_2) + V32_3 \cdot (0))}{V32_1} + \text{Node112}_1 = 84.6053$$

$$n1_32 := \begin{bmatrix} x32 - \text{Node112}_1 & 20 - \text{Node112}_2 & 0 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 2.6053 \\ 11 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\alpha32 := \begin{bmatrix} \frac{n1_32_1}{|n1_32|} & \frac{n1_32_2}{|n1_32|} & \frac{n1_32_3}{|n1_32|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2305 & 0.9731 & 0 \end{bmatrix}$$

Cable 5

$$V51 := \begin{bmatrix} \text{Node222}_1 - \text{Node113}_1 & \text{Node222}_2 - \text{Node113}_2 & \text{Node222}_3 - \text{Node113}_3 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} -39 \\ 8.35 \\ 46.9519 \end{bmatrix}$$

$$x51 := -\frac{(V51_2 \cdot (-20 - \text{Node113}_2) + V51_3 \cdot (0))}{V51_1} + \text{Node113}_1 = 156.5057$$

$$n1_51 := \begin{bmatrix} x51 - \text{Node113}_1 & -20 - \text{Node113}_2 & 0 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} -2.4943 \\ -11.65 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\alpha51 := \begin{bmatrix} \frac{n1_51_1}{|n1_51|} & \frac{n1_51_2}{|n1_51|} & \frac{n1_51_3}{|n1_51|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.2094 & -0.9778 & 0 \end{bmatrix}$$

$$V52 := \begin{bmatrix} Node222_1 - Node116_1 & Node222_2 - Node116_2 & Node222_3 - Node116_3 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} -8.35 \\ 46.9519 \end{bmatrix}$$

$$x52 := -\frac{(V52_2 \cdot (0 - Node116_2) + V52_3 \cdot (0))}{V52_1} + Node116_1 = 160.7878$$

$$n1_52 := \begin{bmatrix} x52 - Node116_1 & 0 - Node116_2 & 0 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 1.7878 \\ -8.35 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\alpha52 := \begin{bmatrix} \frac{n1_52_1}{|n1_52_1|} & \frac{n1_52_2}{|n1_52_2|} & \frac{n1_52_3}{|n1_52_3|} \end{bmatrix} = [0.2094 \quad -0.9778 \quad 0]$$

Cable 6

$$V61 := \begin{bmatrix} Node222_1 - Node117_1 & Node222_2 - Node117_2 & Node222_3 - Node117_3 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} -83 \\ 8.35 \\ 46.6306 \end{bmatrix}$$

$$x61 := -\frac{(V61_2 \cdot (-20 - Node117_2) + V61_3 \cdot (0))}{V61_1} + Node117_1 = 201.828$$

$$n1_61 := \begin{bmatrix} x61 - Node117_1 & -20 - Node117_2 & 0 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} -1.172 \\ -11.65 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\alpha61 := \begin{bmatrix} \frac{n1_61_1}{|n1_61_1|} & \frac{n1_61_2}{|n1_61_2|} & \frac{n1_61_3}{|n1_61_3|} \end{bmatrix} = [-0.1001 \quad -0.995 \quad 0]$$

$$V62 := \begin{bmatrix} Node222_1 - Node120_1 & Node222_2 - Node120_2 & Node222_3 - Node120_3 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} -83 \\ -8.35 \\ 46.6306 \end{bmatrix}$$

$$x62 := -\frac{(V62_2 \cdot (0 - Node120_2) + V62_3 \cdot (0))}{V62_1} + Node120_1 = 203.84$$

$$n1_62 := \begin{bmatrix} x62 - Node120_1 & 0 - Node120_2 & 0 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 0.84 \\ -8.35 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\alpha62 := \begin{bmatrix} \frac{n1_62_1}{|n1_62_1|} & \frac{n1_62_2}{|n1_62_2|} & \frac{n1_62_3}{|n1_62_3|} \end{bmatrix} = [0.1001 \quad -0.995 \quad 0]$$

Cable 7

$$V71 := \begin{bmatrix} Node222_1 - Node121_1 & Node222_2 - Node121_2 & Node222_3 - Node121_3 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} -132 \\ 8.35 \\ 46.6527 \end{bmatrix}$$

$$x71 := -\frac{(V71_2 \cdot (-20 - Node121_2) + V71_3 \cdot (0))}{V71_1} + Node121_1 = 251.263$$

$$n1_71 := \begin{bmatrix} x71 - Node121_1 & -20 - Node121_2 & 0 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} -0.737 \\ -11.65 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\alpha71 := \begin{bmatrix} \frac{n1_71_1}{|n1_71_1|} & \frac{n1_71_2}{|n1_71_2|} & \frac{n1_71_3}{|n1_71_3|} \end{bmatrix} = [-0.0631 \quad -0.998 \quad 0]$$

$$V72 := \begin{bmatrix} Node222_1 - Node124_1 & Node222_2 - Node124_2 & Node222_3 - Node124_3 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} -132 \\ -8.35 \\ 46.6527 \end{bmatrix}$$

$$x72 := -\frac{(V72_2 \cdot (0 - Node124_2) + V72_3 \cdot (0))}{V72_1} + Node124_1 = 252.5282$$

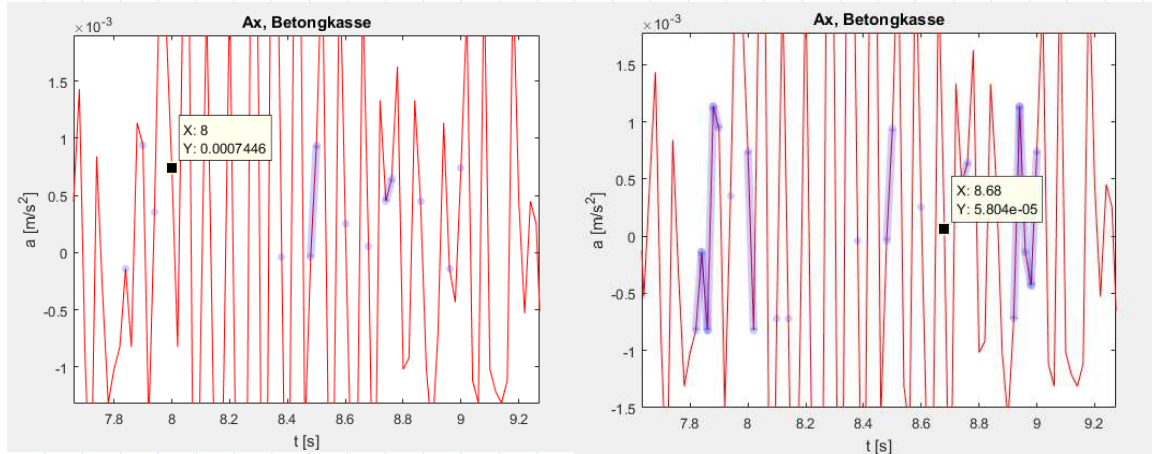
$$n1_72 := \begin{bmatrix} x72 - Node124_1 & 0 - Node124_2 & 0 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 0.5282 \\ -8.35 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\alpha72 := \begin{bmatrix} \frac{n1_72_1}{|n1_72_1|} & \frac{n1_72_2}{|n1_72_2|} & \frac{n1_72_3}{|n1_72_3|} \end{bmatrix} = [0.0631 \quad -0.998 \quad 0]$$

Verification of Matlab FFT/pwelch analysis

Concrete deck, x-axis

Sample 1, $t \sim 0$ s:



$$t_{start} := 8$$

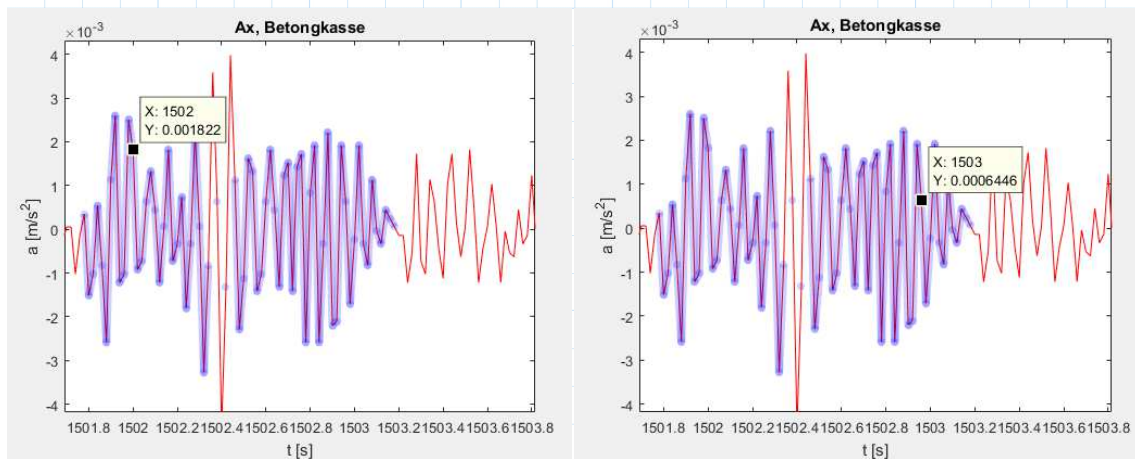
$$t_{end} := 8.68$$

$$N := 9$$

$$T_{mean} := \frac{(t_{end} - t_{start})}{N} = 0.076$$

$$f_{mean} := \frac{1}{T_{mean}} = 13.235$$

Sample 2, $t \sim 1500$ s:



$$t_{start} := 1502$$

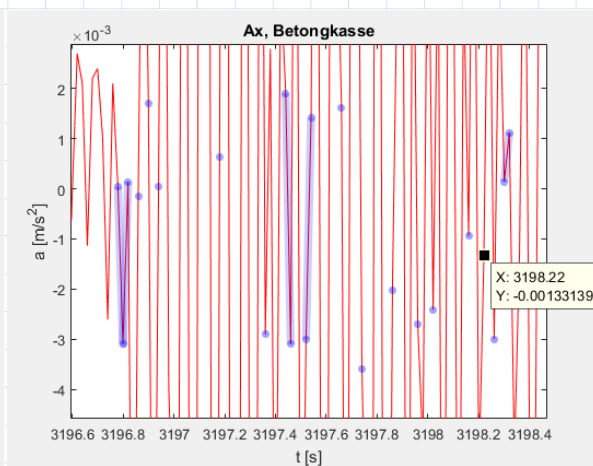
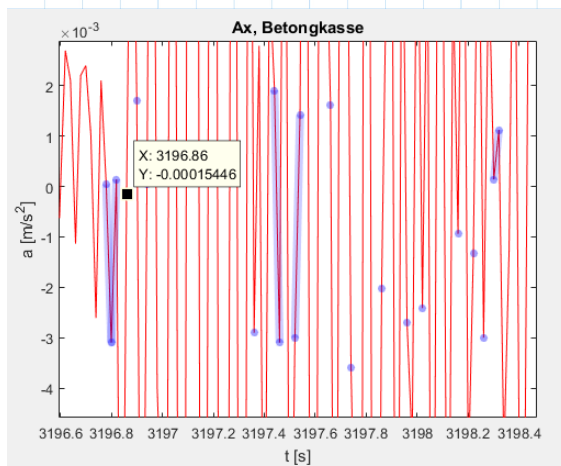
$$t_{end} := 1502.96$$

$$N := 13$$

$$T_{mean} := \frac{(t_{end} - t_{start})}{N} = 0.074$$

$$f_{mean} := \frac{1}{T_{mean}} = 13.542$$

Sample 3, $t \sim 3000s$:



$$t_{start} := 3196.86$$

$$t_{end} := 3198.22$$

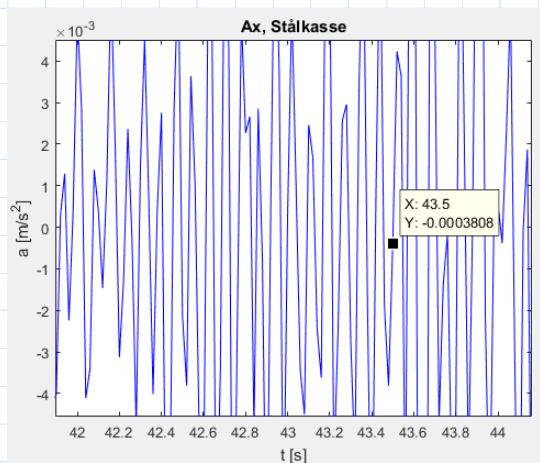
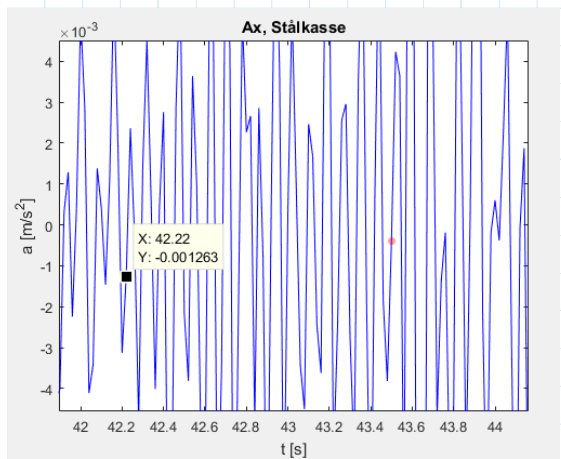
$$N := 21$$

$$T_{mean} := \frac{(t_{end} - t_{start})}{N} = 0.065$$

$$f_{mean} := \frac{1}{T_{mean}} = 15.441$$

Steel deck, x-axis

Sample 1, $t \sim 0s$:



$$t_{start} := 42.22$$

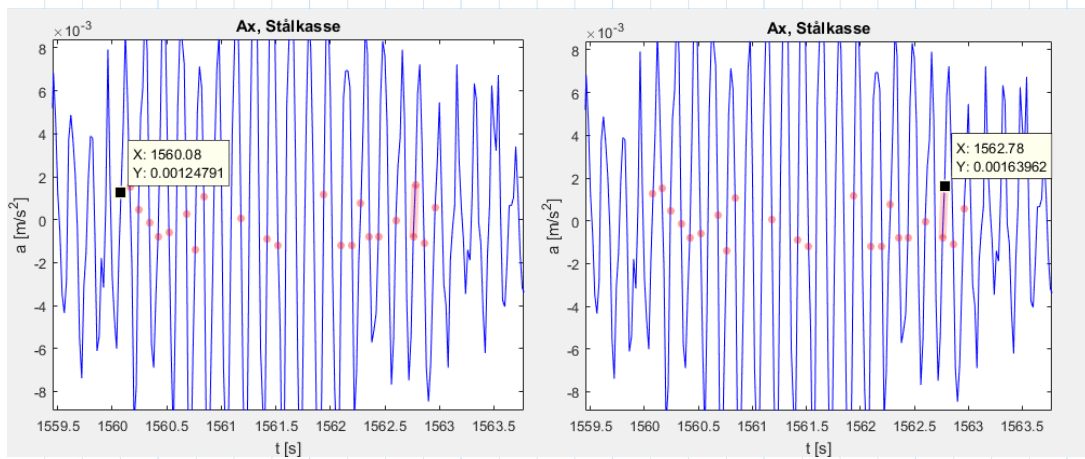
$$t_{end} := 43.5$$

$$N := 17$$

$$T_{mean} := \frac{(t_{end} - t_{start})}{N} = 0.075$$

$$f_{mean} := \frac{1}{T_{mean}} = 13.281$$

Sample 2, $t \sim 1500$ s:



$$t_{start} := 1560.08$$

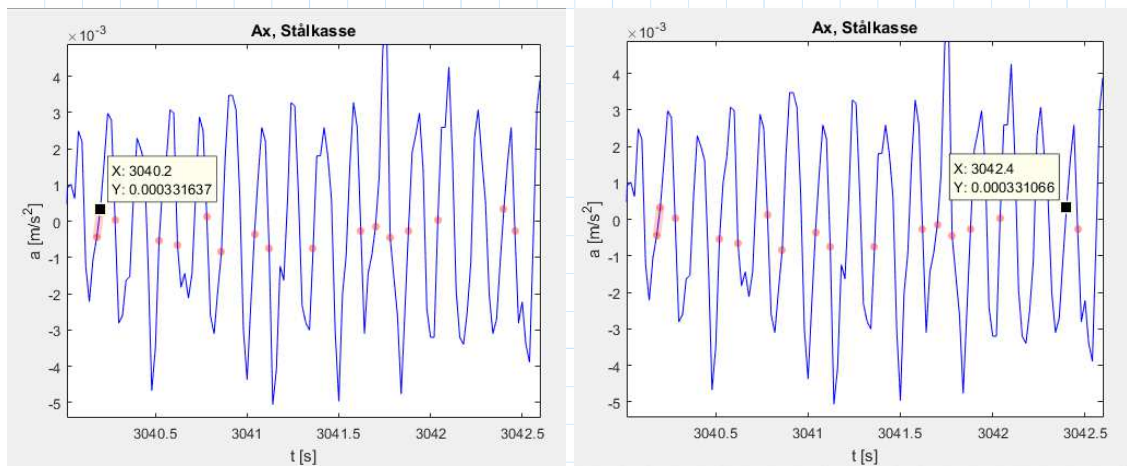
$$t_{end} := 1562.78$$

$$N := 16$$

$$T_{mean} := \frac{(t_{end} - t_{start})}{N} = 0.169$$

$$f_{mean} := \frac{1}{T_{mean}} = 5.926$$

Sample 3, $t \sim 3000$ s:



$$t_{start} := 3040.2$$

$$t_{end} := 3042.4$$

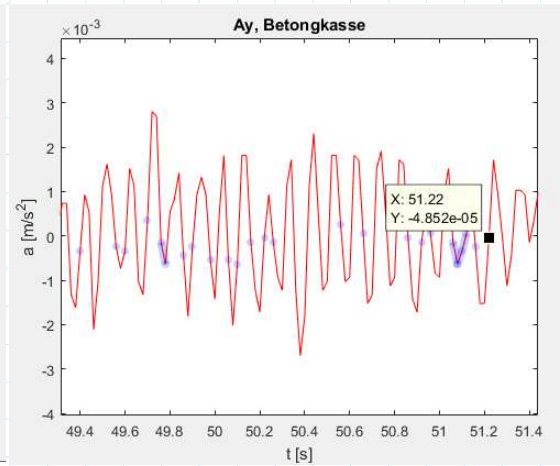
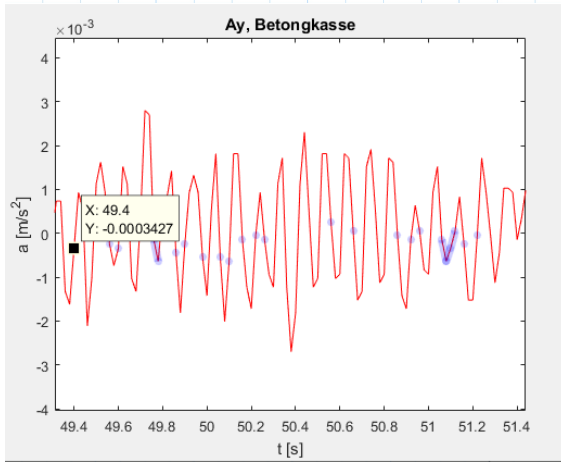
$$N := 13$$

$$T_{mean} := \frac{(t_{end} - t_{start})}{N} = 0.169$$

$$f_{mean} := \frac{1}{T_{mean}} = 5.909$$

Concrete deck, y-axis

Sample 1, $t \sim 0$ s:



$$t_{start} := 49.4$$

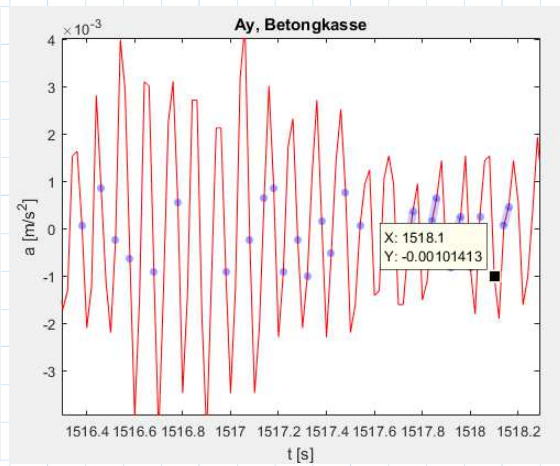
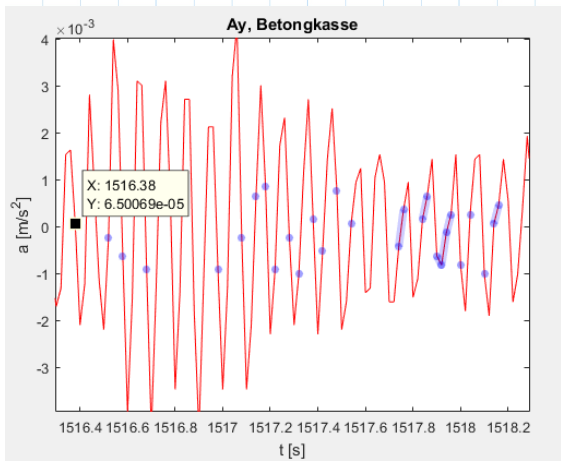
$$t_{end} := 51.22$$

$$N := 18$$

$$T_{mean} := \frac{(t_{end} - t_{start})}{N} = 0.101$$

$$f_{mean} := \frac{1}{T_{mean}} = 9.89$$

Sample 2, $t \sim 1500$ s:



$$t_{start} := 1516.38$$

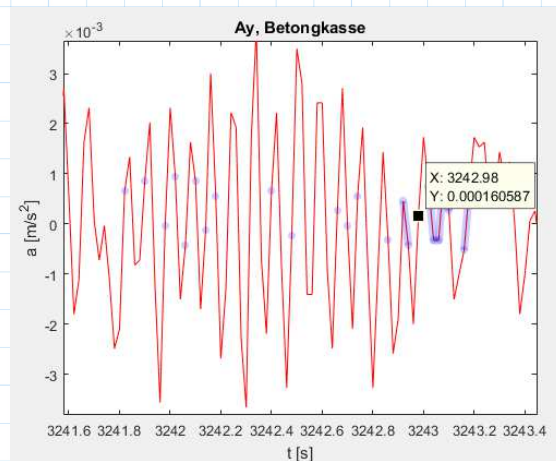
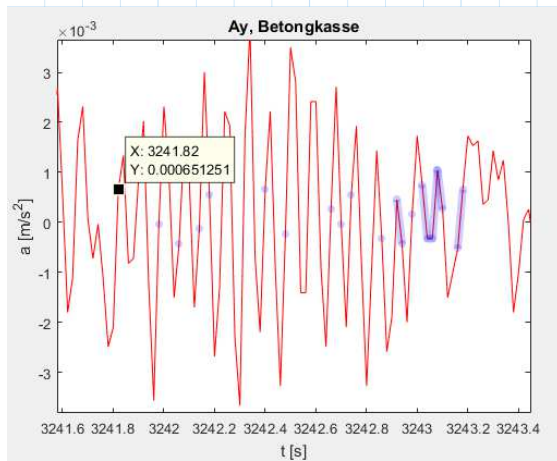
$$t_{end} := 1518.1$$

$$N := 17$$

$$T_{mean} := \frac{(t_{end} - t_{start})}{N} = 0.101$$

$$f_{mean} := \frac{1}{T_{mean}} = 9.884$$

Sample 3, $t \sim 3000s$:



$$t_{start} := 3041.82$$

$$t_{end} := 3042.98$$

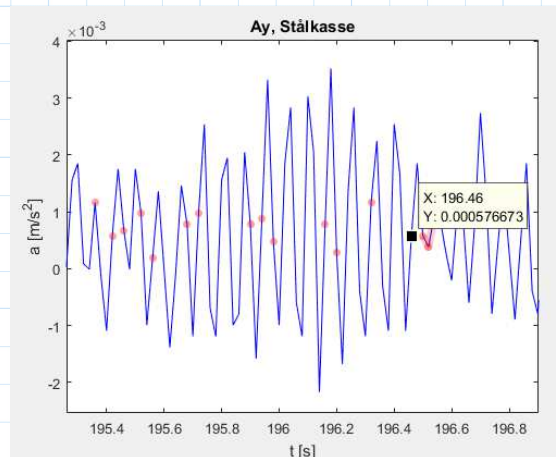
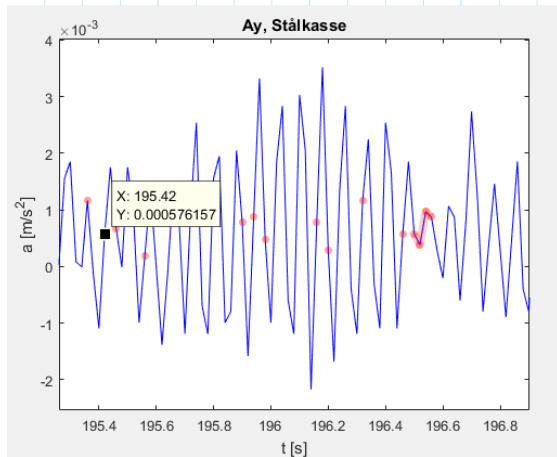
$$N := 14$$

$$T_{mean} := \frac{(t_{end} - t_{start})}{N} = 0.083$$

$$f_{mean} := \frac{1}{T_{mean}} = 12.069$$

Steel deck, y-axis

Sample 1, $t \sim 0s$:



$$t_{start} := 195.42$$

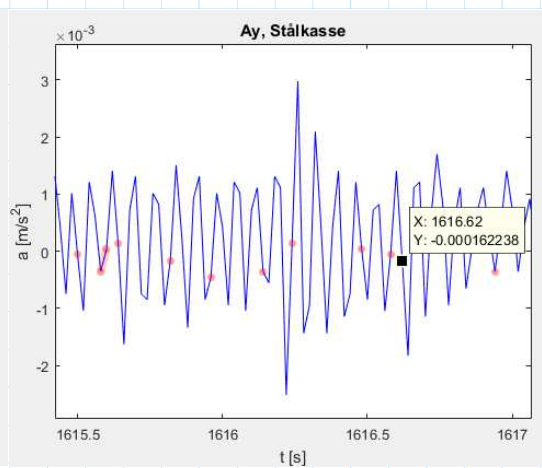
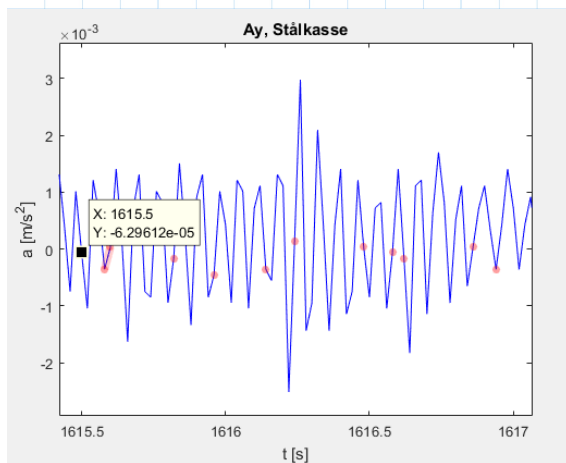
$$t_{end} := 196.46$$

$$N := 14$$

$$T_{mean} := \frac{(t_{end} - t_{start})}{N} = 0.074$$

$$f_{mean} := \frac{1}{T_{mean}} = 13.462$$

Sample 2, $t \sim 1500s$:



$$t_{start} := 1615.5$$

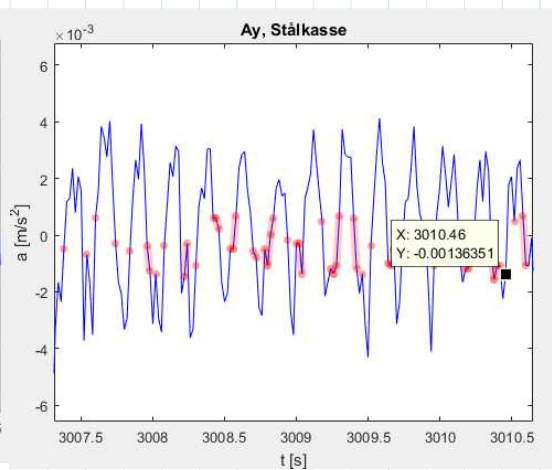
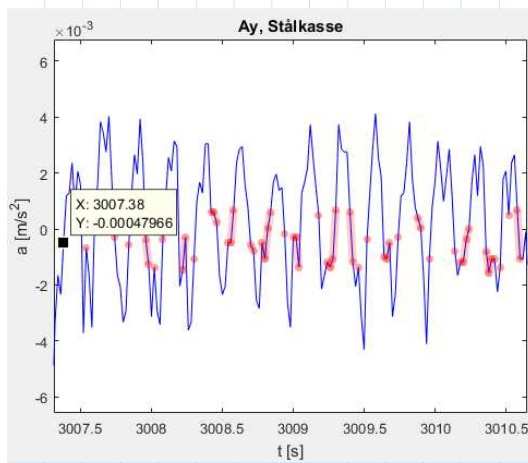
$$t_{end} := 1616.62$$

$$N := 16$$

$$T_{mean} := \frac{(t_{end} - t_{start})}{N} = 0.07$$

$$f_{mean} := \frac{1}{T_{mean}} = 14.286$$

Sample 3, $t \sim 3000s$:



$$t_{start} := 3007.38$$

$$t_{end} := 3010.46$$

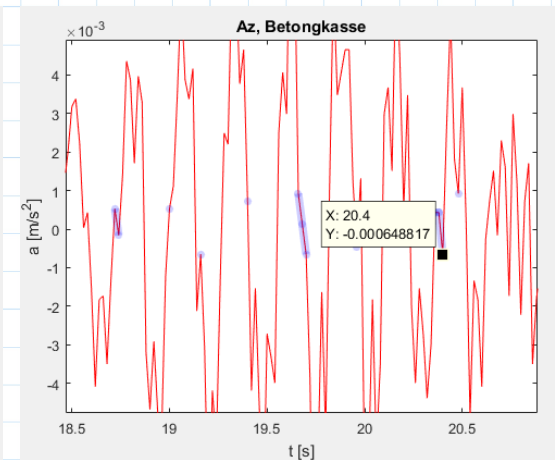
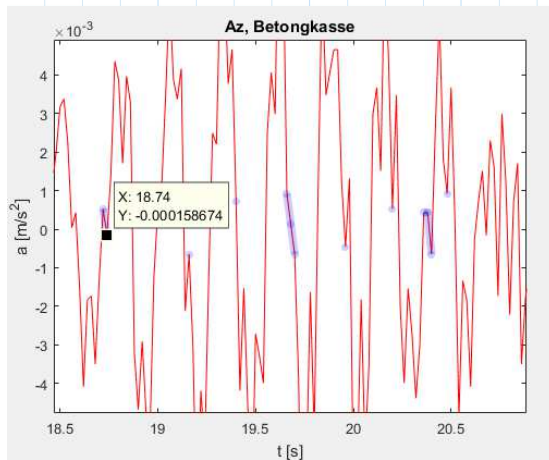
$$N := 13$$

$$T_{mean} := \frac{(t_{end} - t_{start})}{N} = 0.237$$

$$f_{mean} := \frac{1}{T_{mean}} = 4.221$$

Concrete deck, z-axis

Sample 1, $t \sim 0$ s:



$$t_{start} := 18.74$$

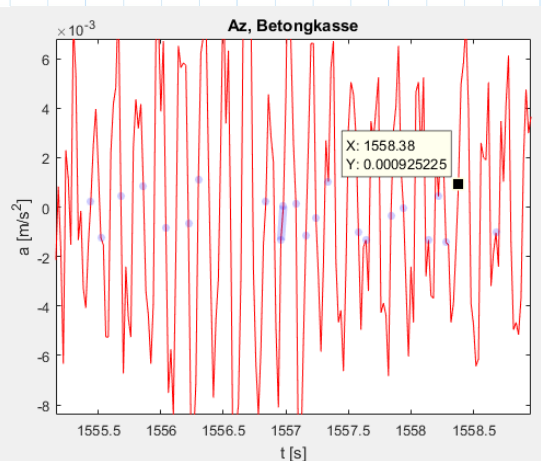
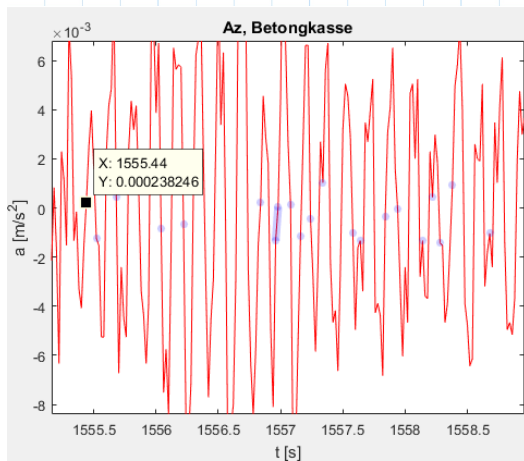
$$t_{end} := 20.4$$

$$N := 6$$

$$T_{mean} := \frac{(t_{end} - t_{start})}{N} = 0.277$$

$$f_{mean} := \frac{1}{T_{mean}} = 3.614$$

Sample 2, $t \sim 1500$ s:



$$t_{start} := 1555.44$$

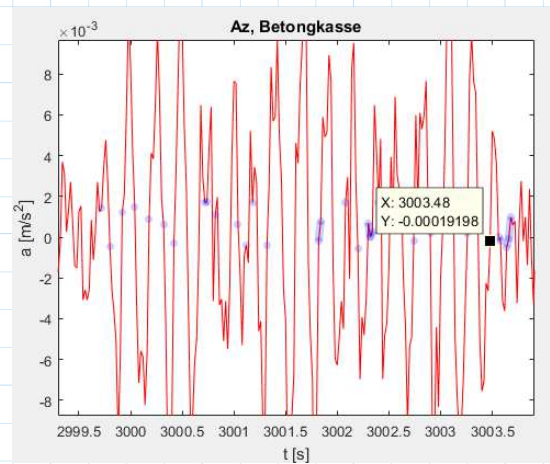
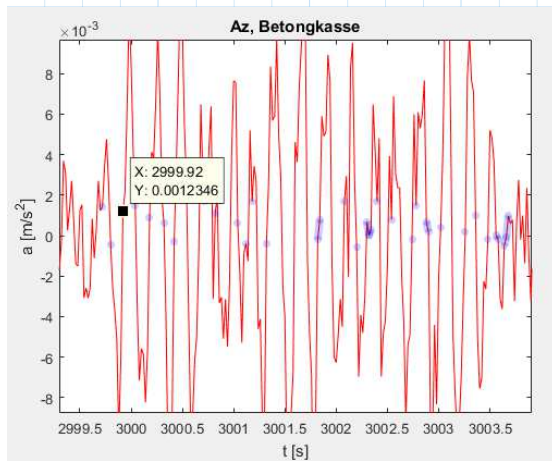
$$t_{end} := 1558.38$$

$$N := 17$$

$$T_{mean} := \frac{(t_{end} - t_{start})}{N} = 0.173$$

$$f_{mean} := \frac{1}{T_{mean}} = 5.782$$

Sample 3, $t \sim 3000$ s:



$$t_{start} := 2999.92$$

$$t_{end} := 3003.48$$

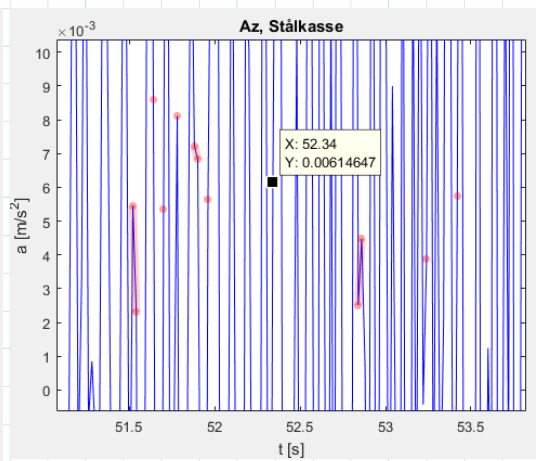
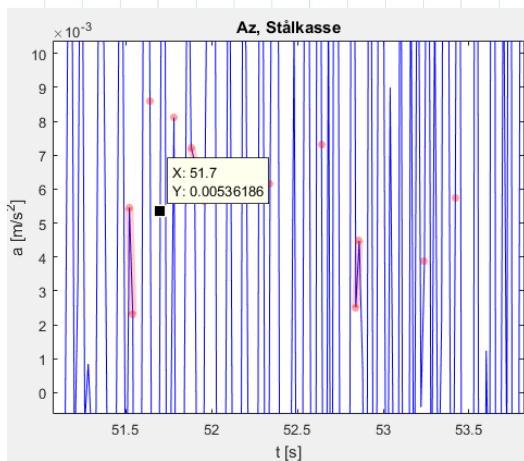
$$N := 15$$

$$T_{mean} := \frac{(t_{end} - t_{start})}{N} = 0.237$$

$$f_{mean} := \frac{1}{T_{mean}} = 4.213$$

Steel deck, z-axis

Sample 1, $t \sim 0$ s:



$$t_{start} := 51.7$$

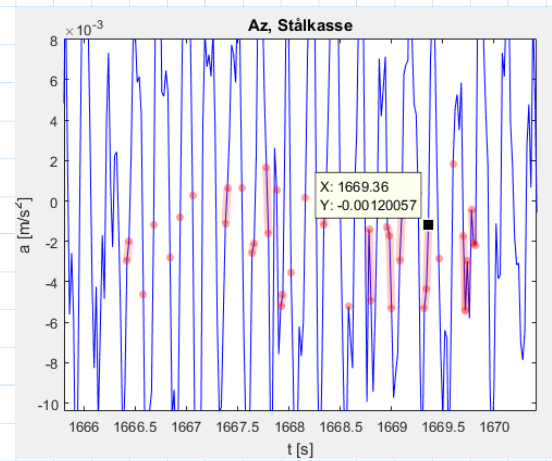
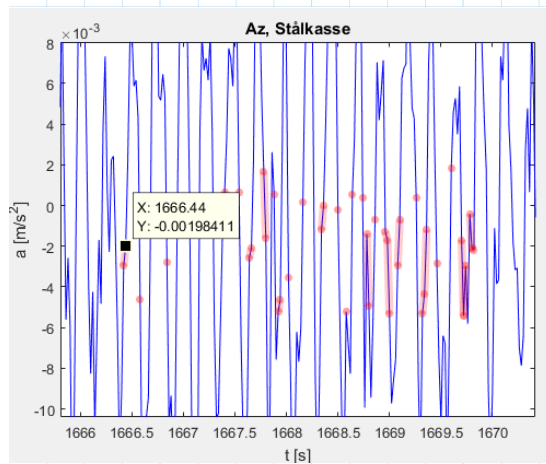
$$t_{end} := 52.34$$

$$N := 7$$

$$T_{mean} := \frac{(t_{end} - t_{start})}{N} = 0.091$$

$$f_{mean} := \frac{1}{T_{mean}} = 10.938$$

Sample 2, $t \sim 1500s$:



$$t_{start} := 1666.44$$

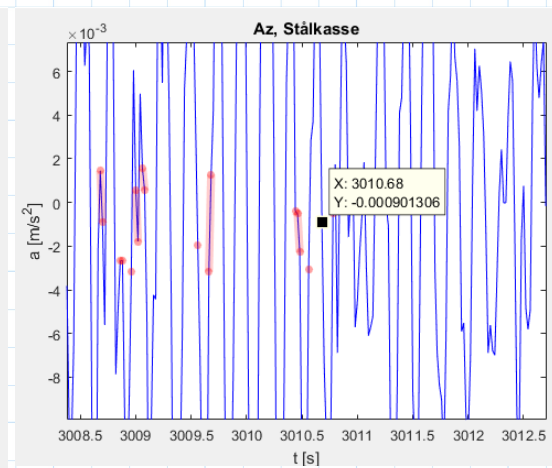
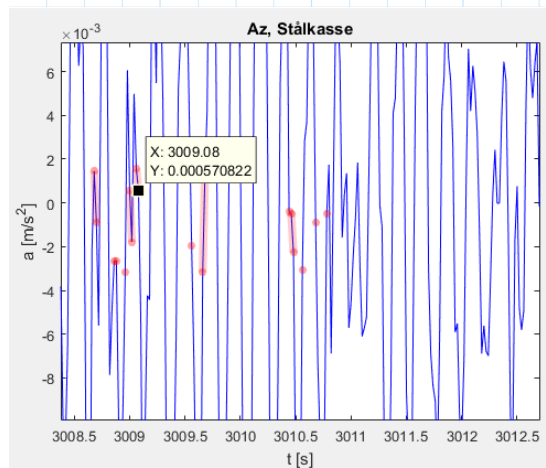
$$t_{end} := 1669.36$$

$$N := 13$$

$$T_{mean} := \frac{(t_{end} - t_{start})}{N} = 0.225$$

$$f_{mean} := \frac{1}{T_{mean}} = 4.452$$

Sample 3, $t \sim 3000s$:



$$t_{start} := 3009.08$$

$$t_{end} := 3010.68$$

$$N := 7$$

$$T_{mean} := \frac{(t_{end} - t_{start})}{N} = 0.229$$

$$f_{mean} := \frac{1}{T_{mean}} = 4.375$$

VEDLEGG D

Beregninger i Matlab

```
clear all
close all
clc
```

```
%kjente koordinater (x,z) på bro
```

```
%pel 45+7.52m
x0=457.52-393
z0=26.968
```

```
%pel 61+7.72m
x1=617.72-393
z1=29.110
```

```
%pel 67+5.95m
x2=675.95-393
z2=28.828
```

```
%beregner høydekoordinat til akse 9 (topp av brobane)
```

```
x_akse9=0
z_akse9=z0-0.02671*x0
```

```
%beregner høydekoordinat til akse 13 (topp av brobane)
```

```
x_akse13=698-393
z_akse13=z2-0.00971*(x_akse13-x2)
```

```
%Beregner konstanter for andregradskurven mellom pel 45+7.52m og 67+5.95m
```

```
syms a b c x
```

```
eqn0=a*x0^2+b*x0+c == z0
```

```
c=solve(eqn0, c)
```

```
eqn1=a*x1^2+b*x1+c == z1
```

```
eqn2=a*x2^2+b*x2+c == z2
```

```
sol=solve([eqn1,eqn2], [a,b]);
```

```
aSol=sol.a
```

```
bSol=sol.b
```

```
a=eval(aSol)
```

```
b=eval(bSol)
```

```
c=eval(c)
```

```
%Endelig andregradslikning
```

```
syms z
```

```
eqn=a*x^2+b*x+c == z
```

```
clear all
close all
clc
```

```
Data=[-2.30E-01 1.67E-02 1.66E-02 5.90E-03 2.55E-02 1.79E-02 -6.76E-02
03
-6.44E-01 4.07E-02 4.03E-02 1.45E-02 1.21E-02 7.66E-02 1.81E-02
-8.50E-01 4.68E-02 4.64E-02 1.67E-02 2.28E-03 7.32E-02 5.94E-02
-8.60E-01 4.31E-02 4.27E-02 1.54E-02 -2.06E-03 4.97E-02 8.51E-02
-5.66E-01 2.56E-02 2.53E-02 9.15E-03 -2.26E-03 2.38E-02 5.98E-02
1.64E-01 -2.29E-02 -2.28E-02 -8.24E-03 9.03E-04 5.80E-04 1.04E-02];
```

```
A=Data(:,2:7);
B=Data(:,1);
```

```
%Solving the equation Ax+B=0 for x (cable stresses)
%x=linsolve(A,-B)
```

```
%Angle of the cable 1, 2 and 3
angle1=0.535
angle2=0.551
angle3=0.904
```

```
%Area of cable 1, 2 and 3
area1=1.7088e-2
area2=area1
area3=8.544e-3
```

```
%Factors for cable 2 and 3 based on cable 1
rho2=(cos(angle1)*area1)/(cos(angle2)*area2);
rho3=(cos(angle1)*area1)/(cos(angle3)*area3);
```

```
%Setting up an optimization problem
prob = optimproblem;
```

```
%Cable stresses vector, only positive values
x = optimvar('x',6,1,'Lowerbound',0);
%Displacement vector
y = optimvar('y',6,1);
%Variable for absolute sum of displacements
E = optimvar('E');
```

```
prob.Constraints.const1 = A*x+B == y;
prob.Constraints.const2 = sqrt(y(1)^2)+sqrt(y(2)^2)+sqrt(y(3)^2)+sqrt(y(4)^2)+sqrt(y(5)^2)+sqrt(y(6)^2) == E;
prob.Constraints.const3 = x(2) == rho2*x(1);
prob.Constraints.const4 = x(3) == rho3*x(1);
```

```
%prob.Constraints.const5 = x(1) == (1.05/0.93)^2*3.102158;
```

```
%Setting the objective of solving for min. value of E
prob.Objective = E;

%Initial values
x0.x=[0 0 0 0 0 0]
x0.y=[0 0 0 0 0 0]
x0.E=0

sol = solve(prob,x0)

%Optimized cable stresses
x_optimized=sol.x

displacement_check=A*x_optimized+B

Error_1=sqrt((displacement_check(1))^2);
Error_2=sqrt((displacement_check(2))^2);
Error_3=sqrt((displacement_check(3))^2);
Error_4=sqrt((displacement_check(4))^2);
Error_5=sqrt((displacement_check(5))^2);
Error_6=sqrt((displacement_check(6))^2);

Error_sum=Error_1+Error_2+Error_3+Error_4+Error_5+Error_6;
```



```

%This script plots the displacements due to cable initial stress
%and prestressing effect in concrete
clear all;clc;close all;

Data1=importdata('displacement_data1.txt');
Data2=importdata('displacement_data2.txt');

% number of nodes along the deck
N=70;

%Read the deck x coordinates
X=importdata('deck_coord.txt');

ux1=Data1(1:N,2);
ux2=Data2(1:N,2);

uz1=Data1(1:N,4);
uz2=Data2(1:N,4);

h=figure;

axes('FontSize',20);
title(['Displacement deck'])
hold on;
y=0:12
xVS1=0.603
plot(xVS1*ones(size(y)),y)
p1=plot(X(1:N)+ux1,uz1,'Color',[0,0,1],'LineWidth',2,'LineStyle','--');
p2=plot(X(1:N)+ux2,uz2,'Color',[0.5,0.04,0.08],'LineWidth',2);
line(xlim(), [0,0], 'LineWidth', 2, 'Color', 'k');
legend([p1 p2], 'Without cable prestress', 'With cable
prestress', 'Location', 'south', 'boxoff', 'orientation', 'horizontal');
xlim([0 305])
xlabel('x [m]')
ylabel('z [m]')
filename = ['displacement_plot.png'];
print(h, '-dpng', '-r100', filename);

```

```

% -----
% This script reads Abaqus output file of frequency analysis
% .dat and plots the mode shapes.
% The mode shapes are normalized by the largest displacement value.
% Coded by Ibuki Kusano, April, 2020
%
% Adjusted by Sander Felberg, June 2020
% Changes: -Max displacement is calculated for each mode
%          -Accelerometer points are included in the mode plot
%
% Input
%     M: number of modes to plot
%     N: number of nodes of the deck
%     filename: Abaqus output file name .dat
%     deck_coord.txt: text file for the deck x coordinate
% Output
%     mode shape plots
% -----
clear all;clc;close all;
delete('*.png')

% Read the frequencies and modes from Abaqus
M=50;      % number of modes to plot
N=70;      % number of nodes along the deck
filename='bybrua_model.dat';
[mode,freq]=read_modes2(M,N,filename);

% Read the deck x coordinate
X=importdata('deck_coord.txt');

% Find the max displacement to normalize the modes
%disp=mode(:,2:5);
%maxdisp=max(abs(disp(:)));

% plot mode shapes
for i=1:M
    n1=N*(i-1)+1;
    n2=N*i;

    %Find the max displacement to normalize the mode
    disp=mode(n1:n2,2:5);
    maxdisp=max(abs(disp(:)));

    uy=mode(n1:n2,3)/maxdisp;
    uz=mode(n1:n2,4)/maxdisp;
    rx=mode(n1:n2,5)/maxdisp;
    ux=mode(n1:n2,2)/maxdisp;

    h=figure;

    axes('FontSize',20);
    title(['Mode ',num2str(i),' (' ,num2str(freq(i),'%.3f'),' Hz)'])
    hold on;

    plot(X,uy,'Color',[0.5,0.04,0.08],'LineWidth',2); %red
    plot(X,uz,'Color',[0,0,1],'LineWidth',2,'LineStyle','--'); %blue

```

```
plot(X, rx, 'Color', [0.1, 0.64, 0.24], 'LineWidth', 2, 'LineStyle', '-. '); %green
plot(X, ux, 'Color', [0.95, 0.36, 0.13], 'LineWidth', 2, 'LineStyle', ': '); %orange
plot([60 155], [0 0], 'ro', 'MarkerSize', 10)
legend
('lat', 'vert', 'tor', 'long', 'acclrm', 'Location', 'south', 'boxoff', 'orientation', 'horizontal
');
xlim([0 305])
filename = ['mode_', num2str(i), '.png'];
print(h, '-dpng', '-r100', filename);
end
```

```

function [FI, OMEGAN]=read_modes (M,N, filename)

%-----
% MODE SHAPES AND NATURAL FREQUENCIES
%-----
% This function reads the matrix of mode shapes FI and the natural
% frequencies OMEGAN from the file .dat
%
% INPUT
% [M]:      Total number of mode shapes
% [N]:      Number of nodes of the deck
% [namefile]:Name of Abaqus file without extension
%
%
% OUTPUT
%
% [FI]:     Matrix of mode shapes. Its dimension is NxM since its
%           columns are the M mode shapes which are chosen to carry
%           out the analysis.
% [OMEGAN]: Natural frequency vector. Its dimension is Mx1.
%
%           i, j, n = indexes
%           ux, uy, uz, rx, ry, rz = node displacements for the n mode shape.
%           waux = n natural frequency.
%
fid=fopen([filename], 'r');

% FINDING NATURAL FREQUENCIES:
% MODE NO, EIGENVALUE, FREQUENCY (RAD/TIME), FREQUENCY (Hz), GENERALIZED MASS, COMPOSITE
% MODAL DAMPING
%
%%%'                               E I G E N V A L U E       O U T P U T       '
linea=fgetl(fid);
while (isempty(strfind(linea, '                               E I G E N V A L U E '
U T P U T       ')) & ischar(linea))
    linea=fgetl(fid);
end

for s=1:5; linea=fgetl(fid);end;

nums=fscanf(fid, '%f %E %E %E %f %f', [6, M]); nums=nums'; OMEGAN=nums(:, 4);

% FINDING MODE SHAPES:
%'                               E I G E N V A L U E       N U M B E R       1'
%'                               E I G E N V A L U E       N U M B E R       30'

FI=[];
i=1;
while (i<=M)

% Searching for heading of mode shape.

```

```

        if i<10
            modostr=['          E I G E N V A L U E          N U M B E R          ',num2str(i)];
        elseif i<100
            modostr=['          E I G E N V A L U E          N U M B E R          ',num2str(i)];
        elseif i<1000
            modostr=['          E I G E N V A L U E          N U M B E R          ',num2str(i)];
        end
        linea=fgetl(fid);
        while 0==strcmp(linea,modostr)
            linea=fgetl(fid);
        end
        for s=1:14; linea=fgetl(fid);end;

        nums=fscanf(fid,'%f %E %E %E %E %E %E',[7,N]); nums=nums';
        FI=[FI;nums];

        i=i+1;
    end
    fclose(fid);

end % end of function

```

```
clear all
close all
clc

load('dataAccDeckBybrua_28082019_0700.mat')

dt=1/fs
N=length(Az)

t=0:dt:dt*(N-1)

%Acceleration measurement time series
figure(1)
PlotAzS=plot(t,Az(2,:), 'b')
title('Tidsserie Akselerasjon, Stålkasse z-akse')
xlabel('t [s]')
ylabel('a [m/s^2]')
xlim([0 3600])
filename = ['StålkasseAz'];
print(figure(1), '-dpng', '-r100', filename);
saveas(figure(1), filename);

figure(2)
PlotAzB=plot(t, Az(1,:), 'r')
title('Tidsserie Akselerasjon, Betongkasse z-akse')
xlabel('t [s]')
ylabel('a [m/s^2]')
xlim([0 3600])
filename = ['BetongkasseAz'];
print(figure(2), '-dpng', '-r100', filename);
saveas(figure(2), filename);

figure(3)
PlotAyS=plot(t,Ay(2,:), 'b')
title('Tidsserie Akselerasjon, Stålkasse y-akse')
xlabel('t [s]')
ylabel('a [m/s^2]')
xlim([0 3600])
filename = ['StålkasseAy'];
print(figure(3), '-dpng', '-r100', filename);
saveas(figure(3), filename);

figure(4)
PlotAyB=plot(t,Ay(1,:), 'r')
title('Tidsserie Akselerasjon, Betongkasse y-akse')
xlabel('t [s]')
ylabel('a [m/s^2]')
xlim([0 3600])
filename = ['BetongkasseAy'];
print(figure(4), '-dpng', '-r100', filename);
```

```
saveas (figure(4), filename);
```

```
figure(5)
PlotAxS=plot(t,Ax(2,:), 'b')
title('Tidsserie Akselerasjon, Stålkasse x-akse')
xlabel('t [s]')
ylabel('a [m/s^2]')
xlim([0 3600])
filename = ['StålkasseAx'];
print (figure(5), '-dpng', '-r100', filename);
saveas (figure(5), filename);
```

```
figure(6)
PlotAxB=plot(t,Ax(1,:), 'r')
title('Tidsserie Akselerasjon, Betongkasse x-akse')
xlabel('t [s]')
ylabel('a [m/s^2]')
xlim([0 3600])
filename = ['BetongkasseAx'];
print (figure(6), '-dpng', '-r100', filename);
saveas (figure(6), filename);
```

```
%Variance of the time series
```

```
V_AzS=var(Az(2,:))
```

```
V_AzB=var(Az(1,:))
```

```
V_AyS=var(Ay(2,:))
```

```
V_AyB=var(Ay(1,:))
```

```
V_AxS=var(Ax(2,:))
```

```
V_AxB=var(Ax(1,:))
```

```
clear all
close all
clc

load('dataAccDeckBybrua_28082019_0700.mat')
dt=1/fs
N=length(Az)
t=0:dt:dt*(N-1)

%Acceleration measurement time series comparison

%z-axis
figure(1)
PlotAz=plot(t,Az(2,:), 'b',t,Az(1,:), 'r')
title('Tidsserie Akselerasjon, z-akse')
legend('Stålkasse', 'Betongkasse')
xlabel('t [s]')
ylabel('a [m/s^2]')
xlim([0 3600])
filename = ['Az'];
print(figure(1), '-dpng', '-r100', filename);
saveas(figure(1), filename);

%y-axis
figure(2)
PlotAy=plot(t,Ay(2,:), 'b',t,Ay(1,:), 'r')
title('Tidsserie Akselerasjon, y-akse')
legend('Stålkasse', 'Betongkasse')
xlabel('t [s]')
ylabel('a [m/s^2]')
xlim([0 3600])
filename = ['Ay'];
print(figure(2), '-dpng', '-r100', filename);
saveas(figure(2), filename);

%x-axis
figure(3)
PlotAx=plot(t,Ax(2,:), 'b',t,Ax(1,:), 'r')
title('Tidsserie Akselerasjon, x-akse')
legend('Stålkasse', 'Betongkasse')
xlabel('t [s]')
ylabel('a [m/s^2]')
xlim([0 3600])
filename = ['Ax'];
print(figure(3), '-dpng', '-r100', filename);
saveas(figure(3), filename);
```



```
clear all
close all
clc

load('dataAccDeckBybrua_28082019_0700.mat');

dt=1/fs;
N=length(Az);
t=0:dt:dt*(N-1);

%Betongkasse x-akse
X=Ax(1,:);
Y=fft(X);
P2=abs(Y/N);
P1=P2(1:N/2+1);
P1(2:end-1)=2*P1(2:end-1);
f=fs*(0:(N/2))/N;
figure(1)
plot(f,P1);
title('Akselerasjonsspektra (FFT), Betongkasse x-akse')
xlabel('f [Hz]')
ylabel('PSD [m^2/s^3]')
xlim([0 25])
filename = ['Spektra_BetongkasseAx_FFT'];
print(figure(1), '-dpng', '-r300', filename);
saveas(figure(1), filename);

winLen=1000;
winOverlap=500;
[Yw_AxB, fw_AxB]=pwelch(X, winLen, winOverlap, [], fs);
figure(2)
plot(fw_AxB, Yw_AxB)
title('Akselerasjonsspektra (pwelch), Betongkasse x-akse')
xlabel('f [Hz]')
ylabel('PSD [m^2/s^3]')
xlim([0 25])
filename = ['Spektra_BetongkasseAx_pwelch'];
print(figure(2), '-dpng', '-r300', filename);
saveas(figure(2), filename);

%Betongkasse y-akse
X=Ay(1,:);
Y=fft(X);
P2=abs(Y/N);
P1=P2(1:N/2+1);
P1(2:end-1)=2*P1(2:end-1);
f=fs*(0:(N/2))/N;
figure(3)
plot(f,P1);
title('Akselerasjonsspektra (FFT), Betongkasse y-akse')
xlabel('f [Hz]')
```

```
ylabel('PSD [m^2/s^3]')
xlim([0 25])
filename = ['Spektra_BetongkasseAy_FFT'];
print(figure(3), '-dpng', '-r300', filename);
saveas(figure(3), filename);

winLen=1000;
winOverlap=500;
[Yw_AyB, fw_AyB]=pwelch(X, winLen, winOverlap, [], fs);
figure(4)
plot(fw_AyB, Yw_AyB)
title('Akselerasjonsspektra (pwelch), Betongkasse y-akse')
xlabel('f [Hz]')
ylabel('PSD [m^2/s^3]')
xlim([0 25])
filename = ['Spektra_BetongkasseAy_pwelch'];
print(figure(4), '-dpng', '-r300', filename);
saveas(figure(4), filename);

%Betongkasse z-akse
X=Az(1, :);
Y=fft(X);
P2=abs(Y/N);
P1=P2(1:N/2+1);
P1(2:end-1)=2*P1(2:end-1);
f=fs*(0:(N/2))/N;
figure(5)
plot(f, P1);
title('Akselerasjonsspektra (FFT), Betongkasse z-akse')
xlabel('f [Hz]')
ylabel('PSD [m^2/s^3]')
xlim([0 25])
filename = ['Spektra_BetongkasseAz_FFT'];
print(figure(5), '-dpng', '-r300', filename);
saveas(figure(5), filename);

winLen=1000;
winOverlap=500;
[Yw_AzB, fw_AzB]=pwelch(X, winLen, winOverlap, [], fs);
figure(6)
plot(fw_AzB, Yw_AzB)
title('Akselerasjonsspektra (pwelch), Betongkasse z-akse')
xlabel('f [Hz]')
ylabel('PSD [m^2/s^3]')
xlim([0 25])
filename = ['Spektra_BetongkasseAz_pwelch'];
print(figure(6), '-dpng', '-r300', filename);
saveas(figure(6), filename);

%Stålkasse x-akse
```

```
X=Ax(2,:);
Y=fft(X);
P2=abs(Y/N);
P1=P2(1:N/2+1);
P1(2:end-1)=2*P1(2:end-1);
f=fs*(0:(N/2))/N;
figure(7)
plot(f,P1);
title('Akselerasjonsspektra (FFT), Stålkasse x-akse')
xlabel('f [Hz]')
ylabel('PSD [m^2/s^3]')
xlim([0 25])
filename = ['Spektra_StålkasseAx_FFT'];
print(figure(7), '-dpng', '-r300', filename);
saveas(figure(7), filename);

winLen=1000;
winOverlap=500;
[Yw_AxS, fw_AxS]=pwelch(X, winLen, winOverlap, [], fs);
figure(8)
plot(fw_AxS, Yw_AxS)
title('Akselerasjonsspektra (pwelch), Stålkasse x-akse')
xlabel('f [Hz]')
ylabel('PSD [m^2/s^3]')
xlim([0 25])
filename = ['Spektra_StålkasseAx_pwelch'];
print(figure(8), '-dpng', '-r300', filename);
saveas(figure(8), filename);

%Stålkasse y-akse
X=Ay(2,:);
Y=fft(X);
P2=abs(Y/N);
P1=P2(1:N/2+1);
P1(2:end-1)=2*P1(2:end-1);
f=fs*(0:(N/2))/N;
figure(9)
plot(f,P1);
title('Akselerasjonsspektra (FFT), Stålkasse y-akse')
xlabel('f [Hz]')
ylabel('PSD [m^2/s^3]')
xlim([0 25])
filename = ['Spektra_StålkasseAy_FFT'];
print(figure(9), '-dpng', '-r300', filename);
saveas(figure(9), filename);

winLen=1000;
winOverlap=500;
[Yw_AyS, fw_AyS]=pwelch(X, winLen, winOverlap, [], fs);
figure(10)
plot(fw_AyS, Yw_AyS)
```

```
title('Akselerasjonsspektra (pwelch), Stålkasse y-akse')
xlabel('f [Hz]')
ylabel('PSD [m^2/s^3]')
xlim([0 25])
filename = ['Spektra_StålkasseAy_pwelch'];
print(figure(10), '-dpng', '-r300', filename);
saveas(figure(10), filename);
```

```
%Stålkasse z-akse
X=Az(2, :);
Y=fft(X);
P2=abs(Y/N);
P1=P2(1:N/2+1);
P1(2:end-1)=2*P1(2:end-1);
f=fs*(0:(N/2))/N;
figure(11)
plot(f,P1);
title('Akselerasjonsspektra (FFT), Stålkasse z-akse')
xlabel('f [Hz]')
ylabel('PSD [m^2/s^3]')
xlim([0 25])
filename = ['Spektra_StålkasseAz_FFT'];
print(figure(11), '-dpng', '-r300', filename);
saveas(figure(11), filename);
```

```
winLen=1000;
winOverlap=500;
[Yw_AzS, fw_AzS]=pwelch(X, winLen, winOverlap, [], fs);
figure(12)
plot(fw_AzS, Yw_AzS)
title('Akselerasjonsspektra (pwelch), Stålkasse z-akse')
xlabel('f [Hz]')
ylabel('PSD [m^2/s^3]')
xlim([0 25])
filename = ['Spektra_StålkasseAz_pwelch'];
print(figure(12), '-dpng', '-r300', filename);
saveas(figure(12), filename);
```

```
%Logplot pwelch, betongkasse alle retninger samlet
figure(13)
loglog(fw_AzB, Yw_AzB, 'b', fw_AyB, Yw_AyB, 'r', fw_AxB, Yw_AxB, 'g')
title('Akselerasjonsspektra (pwelch), Betongkasse')
legend('Betongkasse z-akse', 'Betongkasse y-akse', 'Betongkasse x-akse')
xlabel('f [Hz]')
ylabel('PSD [m^2/s^3]')
xlim([0.3 25])
ylim([1e-10 1e-2])
filename = ['Logplot_Spektra_Betongkasse'];
```

```
print(figure(13), '-dpng', '-r300', filename);
saveas(figure(13), filename);

%Logplot pwelch, stålkasse alle retninger samlet
figure(14)
loglog(fw_AzS, Yw_AzS, 'b', fw_AyS, Yw_AyS, 'r', fw_AxS, Yw_AxS, 'g')
title('Akselerasjonsspektra (pwelch), Stålkasse')
legend('Stålkasse z-akse', 'Stålkasse y-akse', 'Stålkasse x-akse')
xlabel('f [Hz]')
ylabel('PSD [m^2/s^3]')
xlim([0.3 25])
ylim([1e-10 1e-2])
filename = ['Logplot_Spektra_Stålkasse'];
print(figure(14), '-dpng', '-r300', filename);
saveas(figure(14), filename);

%Logplot pwelch, betongkasse og stålkasse x-akse
figure(15)
loglog(fw_AxS, Yw_AxS, 'b', fw_AxB, Yw_AxB, 'r')
title('Akselerasjonsspektra (pwelch), x-akse')
legend('Stålkasse x-akse', 'Betongkasse x-akse')
xlabel('f [Hz]')
ylabel('PSD [m^2/s^3]')
xlim([0.3 25])
ylim([1e-10 1e-4])
filename = ['Logplot_Spektra_Ax'];
print(figure(15), '-dpng', '-r300', filename);
saveas(figure(15), filename);

%Logplot pwelch, betongkasse og stålkasse y-akse
figure(16)
loglog(fw_AyS, Yw_AyS, 'b', fw_AyB, Yw_AyB, 'r')
title('Akselerasjonsspektra (pwelch), y-akse')
legend('Stålkasse y-akse', 'Betongkasse y-akse')
xlabel('f [Hz]')
ylabel('PSD [m^2/s^3]')
xlim([0.3 25])
ylim([1e-10 1e-4])
filename = ['Logplot_Spektra_Ay'];
print(figure(16), '-dpng', '-r300', filename);
saveas(figure(16), filename);

%Logplot pwelch, betongkasse og stålkasse z-akse
figure(17)
loglog(fw_AzS, Yw_AzS, 'b', fw_AzB, Yw_AzB, 'r')
title('Akselerasjonsspektra (pwelch), z-akse')
```

```
legend('Stålkasse z-akse', 'Betongkasse z-akse')
xlabel('f [Hz]')
ylabel('PSD [m^2/s^3]')
xlim([0.3 25])
ylim([1e-10 1e-2])
filename = ['Logplot_Spektra_Az'];
print(figure(17), '-dpng', '-r300', filename);
saveas(figure(17), filename);
```

```
%Variance calculation of data
```

```
V_AzS=var(Az(2,:));
V_AzB=var(Az(1,:));
```

```
V_AyS=var(Ay(2,:));
V_AyB=var(Ay(1,:));
```

```
V_AxS=var(Ax(2,:));
V_AxB=var(Ax(1,:));
```

```
Q_AzS=trapz(fw_AzS, Yw_AzS);
Q_AzB=trapz(fw_AzB, Yw_AzB);
```

```
Q_AyS=trapz(fw_AyS, Yw_AyS);
Q_AyB=trapz(fw_AyB, Yw_AyB);
```

```
Q_AxS=trapz(fw_AxS, Yw_AxS);
Q_AxB=trapz(fw_AxB, Yw_AxB);
```

```
Q=[Q_AxB; Q_AxS; Q_AyB; Q_AyS; Q_AzB; Q_AzS];
V=[V_AxB; V_AxS; V_AyB; V_AyS; V_AzB; V_AzS];
```

```
clear all
close all
clc

load('dataAccDeckBybrua_28082019_0700.mat');

dt=1/fs
N=length(Ax)
t=0:dt:dt*(N-1)

%Nyquistfrekvens
FN=1/(2*dt)

%Filtreringsgrad
ord=400

%Filtrerte frekvenser
ffilt1=[0.8039 0.9539];
ffilt2=[2.171 2.321];
ffilt3=[2.659 2.809];
ffilt4=[4.075 4.225];
ffilt5=[4.808 4.958];
ffilt6=[6.370 6.520];
ffilt7=[6.859 7.009];
ffilt8=[7.64 7.79];
ffilt9=[12.085 12.235];
ffilt10=[13.405 13.555];
ffilt11=[13.935 14.085];
ffilt12=[16.425 16.575];
ffilt13=[17.645 17.795];
ffilt14=[18.285 18.435];
ffilt15=[20.575 20.725];

%Laveste og høyeste gjeldende frekvens
fmin=ffilt15(1);
fmax=ffilt15(2);

%Nummer korrelasjonsanalyse i Ax (kun brukt for filsortering)
nk=15

%Designfilter
[b_AxB,a_AxB] = fir1(ord,[fmin fmax]/FN);
[b_AxS,a_AxS] = fir1(ord,[fmin fmax]/FN);

%Filtrering av respons
filt_AxB = filtfilt(b_AxB,a_AxB,Ax(1,:));
filt_AxS = filtfilt(b_AxS,a_AxS,Ax(2,:));

%Lineær regresjonskurve
P = polyfit(filt_AxB,filt_AxS,1);
yfit = P(1)*filt_AxB+P(2);
```

```
%Beregning av korrelasjonskoeffisient
A = corrcoef(filt_AxB,filt_AxS);
A=A(1,2);

%Korrelasjonplot betongkasse og stålkasse Ax
figure(1)
plot(filt_AxB,filt_AxS,'*',filt_AxB,yfit,'r-')
title({'Korrelasjon mellom akselerasjon i betongkasse og stålkasse, x-akse'};
      ['f=[',num2str(fmin),',',',num2str(fmax),'] Hz, ', '\rho=',num2str(A)]})
xlabel('a (Betongkasse) [m/s^2]')
ylabel('a (Stålkasse) [m/s^2]')
filename = ['KorrelasjonAx_',num2str(nk)];
print(figure(1),'-dpng','-r200',filename);
saveas(figure(1),filename);

%Sammenligning av filtrert og ufiltrert data (Betongkasse Ax)
figure(2)
plot(t,Ax(1,:),',',t,filt_AxB,'r')
title('Tidsserie akselerasjon, Betongkasse x-akse')
xlabel('t [s]')
ylabel('a [m/s^2]')
xlim([0 3600])
legend(['Opprinnelig signal'], ['Filtrert signal [',num2str(fmin),',',',num2str(fmax),'] Hz'])
filename = ['Filt_Ufilt_BetongkasseAx_',num2str(nk)];
print(figure(2),'-dpng','-r200',filename);
saveas(figure(2),filename);

%Sammenligning av filtrert og ufiltrert data (Stålkasse Ax)
figure(3)
plot(t,Ax(2,:),',',t,filt_AxS,'r')
title('Sammenligning av filtrert og ufiltrert data, Stålkasse x-akse')
xlabel('t [s]')
ylabel('a [m/s^2]')
xlim([0 3600])
legend(['Opprinnelig signal'], ['Filtrert signal [',num2str(fmin),',',',num2str(fmax),'] Hz'])
filename = ['Filt_Ufilt_StålkasseAx_',num2str(nk)];
print(figure(3),'-dpng','-r200',filename);
saveas(figure(3),filename);

%Spektra (pwelch) av filtrert data, Betongkasse x-akse
X=filt_AxB;
winLen=1000;
winOverlap=500;
[Yfilt_AxB,ffilt_AxB]=pwelch(X,winLen,winOverlap,[],fs);

%Spektra (pwelch) av filtrert data, Stålkasse x-akse
X=filt_AxS;
```



```
winLen=1000;
winOverlap=500;
[Yfilt_AxS,ffilt_AxS]=pwelch(X,winLen,winOverlap,[],fs);

%Logplot spektra (pwelch) av filtrert data, Betongkasse og stålkasse
figure(4)
loglog(ffilt_AxB,Yfilt_AxB,'b',ffilt_AxS,Yfilt_AxS,'r')
title(['Filtrert akselerasjonsspektra (pwelch), x-akse']; ['f=[',num2str(fmin),',',',',
num2str(fmax),'] Hz'])
legend('Betongkasse','Stålkasse')
xlabel('f [Hz]')
ylabel('PSD [m^2/s^3]')
xlim([0.3 25])
ylim([0 1e-2])
filename = ['Logplot_Spektra_Ax_',num2str(nk)];
print(figure(4),'-dpng','-r200',filename);
saveas(figure(4),filename);

%Standardavvik for de filtrerte signalene
StDevB=std(filt_AxB);
StDevS=std(filt_AxS);

%Forhold mellom standardavvik
StDevRatio=StDevB/StDevS;

Exceloutput=[A StDevB StDevS];
```

```
clear all
close all
clc

load('dataAccDeckBybrua_28082019_0700.mat');

dt=1/fs
N=length(Ay)
t=0:dt:dt*(N-1)

%Nyquistfrekvens
FN=1/(2*dt)

%Filtreringsgrad
ord=400

%Filtrerte frekvenser
ffilt1=[0.9016 1.0516];
ffilt2=[1.097 1.247];
ffilt3=[1.78 1.93];
ffilt4=[2.171 2.321];
ffilt5=[2.757 2.907];
ffilt6=[2.855 3.005];
ffilt7=[3.441 3.591];
ffilt8=[4.027 4.177];
ffilt9=[4.368 4.518];
ffilt10=[4.808 4.958];
ffilt11=[5.198 5.348];
ffilt12=[5.931 6.081];
ffilt13=[7.054 7.204];
ffilt14=[7.933 8.083];
ffilt15=[8.323 8.473];
ffilt16=[11.885 12.035];
ffilt17=[13.205 13.355];
ffilt18=[19.745 19.895];

%Laveste og høyeste gjeldende frekvens
fmin=ffilt11(1);
fmax=ffilt11(2);

%Nummer korrelasjonsanalyse i Ay (kun brukt for filsortering)
nk=11

%Designfilter
[b_AyB,a_AyB] = fir1(ord,[fmin fmax]/FN);
[b_AyS,a_AyS] = fir1(ord,[fmin fmax]/FN);

%Filtrering av respons
filt_AyB = filtfilt(b_AyB,a_AyB,Ay(1,:));
filt_AyS = filtfilt(b_AyS,a_AyS,Ay(2,:));

%Lineær regresjonskurve
P = polyfit(filt_AyB,filt_AyS,1);
```

```
yfit = P(1)*filt_AyB+P(2);
```

```
%Beregning av korrelasjonskoeffisient
```

```
A = corrcoef(filt_AyB,filt_AyS);
```

```
A=A(1,2);
```

```
%Korrelasjonplot betongkasse og stålkasse Ay
```

```
figure(1)
```

```
plot(filt_AyB,filt_AyS,'*',filt_AyB,yfit,'r-')
```

```
title(['Korrelasjon mellom akselerasjon i betongkasse og stålkasse, y-akse'];
```

```
['f=[',num2str(fmin),' ','',num2str(fmax),' ] Hz, ', '\rho=',num2str(A) ])
```

```
xlabel('a (Betongkasse) [m/s^2]')
```

```
ylabel('a (Stålkasse) [m/s^2]')
```

```
filename = ['KorrelasjonAy_',num2str(nk)];
```

```
print(figure(1),'-dpng','-r200',filename);
```

```
saveas(figure(1),filename);
```

```
%Sammenligning av filtrert og ufiltrert data (Betongkasse Ay)
```

```
figure(2)
```

```
plot(t,Ay(1,:),',',t,filt_AyB,'r')
```

```
title('Tidsserie akselerasjon, Betongkasse y-akse')
```

```
xlabel('t [s]')
```

```
ylabel('a [m/s^2]')
```

```
xlim([0 3600])
```

```
legend(['Opprinnelig signal'],['Filtrert signal [',num2str(fmin),' ','',num2str(fmax),
```

```
], ' ] Hz'])
```

```
filename = ['Filt_Ufilt_BetongkasseAy_',num2str(nk)];
```

```
print(figure(2),'-dpng','-r200',filename);
```

```
saveas(figure(2),filename);
```

```
%Sammenligning av filtrert og ufiltrert data (Stålkasse Ay)
```

```
figure(3)
```

```
plot(t,Ay(2,:),',',t,filt_AyS,'r')
```

```
title('Sammenligning av filtrert og ufiltrert data, Stålkasse y-akse')
```

```
xlabel('t [s]')
```

```
ylabel('a [m/s^2]')
```

```
xlim([0 3600])
```

```
legend(['Opprinnelig signal'],['Filtrert signal [',num2str(fmin),' ','',num2str(fmax),
```

```
], ' ] Hz'])
```

```
filename = ['Filt_Ufilt_StålkasseAy_',num2str(nk)];
```

```
print(figure(3),'-dpng','-r200',filename);
```

```
saveas(figure(3),filename);
```

```
%Spektra (pwelch) av filtrert data, Betongkasse y-akse
```

```
X=filt_AyB;
```

```
winLen=1000;
```

```
winOverlap=500;
```

```
[Yfilt_AyB,ffilt_AyB]=pwelch(X,winLen,winOverlap,[],fs);
```

```
%Spektra (pwelch) av filtrert data, Stålkasse y-akse
```

```
X=filt_AyS;
winLen=1000;
winOverlap=500;
[Yfilt_AyS,ffilt_AyS]=pwelch(X,winLen,winOverlap,[],fs);
```

```
%Logplot spektra (pwelch) av filtrert data, Betongkasse og stålkasse
figure(4)
loglog(ffilt_AyB,Yfilt_AyB,'b',ffilt_AyS,Yfilt_AyS,'r')
title(['Filtrert akselerasjonsspektra (pwelch), y-akse']; ['f=[',num2str(fmin),' ','',
num2str(fmax),' ] Hz'])
legend('Betongkasse','Stålkasse')
xlabel('f [Hz]')
ylabel('PSD [m^2/s^3]')
xlim([0.3 25])
ylim([0 1e-2])
filename = ['Logplot_Spektra_Ay_',num2str(nk)];
print(figure(4),'-dpng','-r200',filename);
saveas(figure(4),filename);
```

```
%Standardavvik for de filtrerte signalene
StDevB=std(filt_AyB);
StDevS=std(filt_AyS);
```

```
%Forhold mellom standardavvik
StDevRatio=StDevB/StDevS;
```

```
Exceloutput=[A StDevB StDevS];
```

```
clear all
close all
clc

load('dataAccDeckBybrua_28082019_0700.mat')

dt=1/fs
N=length(Az)
t=0:dt:dt*(N-1)

%Nyquistfrekvens
FN=1/(2*dt)

%Filtreringsgrad
ord=400

%Filtrerte frekvenser
ffilt1=[1.146 1.296];
ffilt2=[1.976 2.126];
ffilt3=[2.855 3.005];
ffilt4=[3.489 3.639];
ffilt5=[4.075 4.225];
ffilt6=[4.808 4.958];
ffilt7=[5.850 6.100];
ffilt8=[7.054 7.204];
ffilt9=[12.035 12.185];
ffilt10=[17.995 18.145];
ffilt11=[20.575 20.725];
ffilt12=[2.073 2.223];

%Laveste og høyeste frekvens
fmin=ffilt12(1);
fmax=ffilt12(2);

%Nummer korrelasjonsanalyse i Az (kun brukt for filsortering)
nk=12

%Designfilter
[b_AzB,a_AzB] = fir1(ord,[fmin fmax]/FN);
[b_AzS,a_AzS] = fir1(ord,[fmin fmax]/FN);

%Filtrering av respons
filt_AzB = filtfilt(b_AzB,a_AzB,Az(1,:));
filt_AzS = filtfilt(b_AzS,a_AzS,Az(2,:));

%Lineær regresjonskurve
P = polyfit(filt_AzB,filt_AzS,1);
yfit = P(1)*filt_AzB+P(2);

%Beregning av korrelasjonskoeffisient
```

```
A = corrcoef(filt_AzB,filt_AzS);
A=A(1,2);

%Korrelasjonplot betongkasse og stålkasse Az
figure(1)
plot(filt_AzB,filt_AzS, '*',filt_AzB,yfit, 'r-')
title(['Korrelasjon mellom akselerasjon i betongkasse og stålkasse, z-akse '];
      ['f=[',num2str(fmin),',',num2str(fmax),'] Hz, ', '\rho=',num2str(A) ])
xlabel('a (Betongkasse) [m/s^2]')
ylabel('a (Stålkasse) [m/s^2]')
filename = ['KorrelasjonAz_',num2str(nk)];
print(figure(1), '-dpng', '-r200',filename);
saveas(figure(1),filename);

%Sammenligning av filtrert og ufiltrert data (Betongkasse Az)
figure(2)
plot(t,Az(1,:),',',t,filt_AzB,'r')
title('Tidsserie akselerasjon, Betongkasse z-akse')
xlabel('t [s]')
ylabel('a [m/s^2]')
xlim([0 3600])
legend(['Opprinnelig signal'], ['Filtrert signal [' ,num2str(fmin),',',num2str(fmax),'] Hz'])
filename = ['Filt_Ufilt_BetongkasseAz_',num2str(nk)];
print(figure(2), '-dpng', '-r200',filename);
saveas(figure(2),filename);

%Sammenligning av filtrert og ufiltrert data (Stålkasse Az)
figure(3)
plot(t,Az(2,:),',',t,filt_AzS,'r')
title('Sammenligning av filtrert og ufiltrert data, Stålkasse z-akse')
xlabel('t [s]')
ylabel('a [m/s^2]')
xlim([0 3600])
legend(['Opprinnelig signal'], ['Filtrert signal [' ,num2str(fmin),',',num2str(fmax),'] Hz'])
filename = ['Filt_Ufilt_StålkasseAz_',num2str(nk)];
print(figure(3), '-dpng', '-r200',filename);
saveas(figure(3),filename);

%Spektra (pwelch) av filtrert data, Betongkasse z-akse
X=filt_AzB;
winLen=1000;
winOverlap=500;
[Yfilt_AzB,ffilt_AzB]=pwelch(X,winLen,winOverlap,[],fs);

%Spektra (pwelch) av filtrert data, Stålkasse z-akse
X=filt_AzS;
winLen=1000;
winOverlap=500;
```

```
[Yfilt_AzS,ffilt_AzS]=pwelch(X,winLen,winOverlap,[],fs);
```

```
%Logplot spektra (pwelch) av filtrert data, Betongkasse og stålkasse
figure(4)
loglog(ffilt_AzB,Yfilt_AzB,'b',ffilt_AzS,Yfilt_AzS,'r')
title(['Filtrert spektra (pwelch), z-akse']; ['f=[' ,num2str(fmin), ',' ,num2str(fmax), ' ] Hz']})
legend('Betongkasse','Stålkasse')
xlabel('f [Hz]')
ylabel('PSD [m^2/s^3]')
xlim([0.3 25])
ylim([0 1e-2])
filename = ['Logplot_Spektra_Az_',num2str(nk)];
print (figure(4), '-dpng', '-r200', filename);
saveas (figure(4), filename);
```

```
%Standardavvik for de filtrerte signalene
StDevB=std(filt_AzB);
StDevS=std(filt_AzS);
```

```
%Forhold mellom standardavvik
StDevRatio=StDevB/StDevS;
```

```
Exceloutput=[A StDevB StDevS];
```

```
%Logplot pwelch, betongkasse og stålkasse z-akse, med resultat fra Abaqus  
%(Randbetingelsesituasjon 1)
```

```
y=0:1  
xVS1=0.603  
xVA1=1.248  
xVS2=2.179  
xVA2=3.35  
xVS1B1=4.051  
xVS1B2=5.377  
xVS1B3=6.485  
xVS3=4.903  
xVA3=6.988  
xVS4=9.371  
xVA4=11.429
```

```
xTS1=2.427  
xTA1=4.168  
xTS2=6.034  
xTA2=7.844  
xTS3=9.345  
xTA3=10.968  
xTS4=13.354
```

```
figure(1)  
axes('XScale', 'log', 'YScale', 'log')  
hold on;  
loglog(fw_AzS, Yw_AzS, 'b', fw_AzB, Yw_AzB, 'r')  
loglog([xVS1 xVS1], [1e-10 1], 'k')  
loglog([xTS1 xTS1], [1e-10 1], 'g')  
  
loglog([xVA1 xVA1], [1e-10 1], 'k')  
loglog([xVS2 xVS2], [1e-10 1], 'k')  
loglog([xVA2 xVA2], [1e-10 1], 'k')  
loglog([xVS1B1 xVS1B1], [1e-10 1], 'k')  
loglog([xVS1B2 xVS1B2], [1e-10 1], 'k')  
loglog([xVS1B3 xVS1B3], [1e-10 1], 'k')  
loglog([xVS3 xVS3], [1e-10 1], 'k')  
loglog([xVA3 xVA3], [1e-10 1], 'k')  
loglog([xVS4 xVS4], [1e-10 1], 'k')  
loglog([xVA4 xVA4], [1e-10 1], 'k')  
  
loglog([xTA1 xTA1], [1e-10 1], 'g')  
loglog([xTS2 xTS2], [1e-10 1], 'g')  
loglog([xTA2 xTA2], [1e-10 1], 'g')  
loglog([xTS3 xTS3], [1e-10 1], 'g')  
loglog([xTA3 xTA3], [1e-10 1], 'g')  
loglog([xTS4 xTS4], [1e-10 1], 'g')  
  
title('Akselerasjonsspektra (pwelch), z-akse')
```



```
legend('Stålkasse z-akse', 'Betongkasse z-akse', 'Vertikale moder  
(Abaqus)', 'Torsjonmoder (Abaqus)')  
xlabel('f [Hz]')  
ylabel('PSD [m^2/s^3]')  
xlim([0.3 25])  
ylim([1e-10 1e-2])  
filename = ['Logplot_Spektra_Az_resultat1'];  
print(figure(1), '-dpng', '-r300', filename);  
saveas(figure(1), filename);
```

```
%Logplot pwelch, betongkasse og stålkasse z-akse, med resultat fra Abaqus  
%(Randbetingelsesituasjon 2)
```

```
y=0:1
```

```
xVS1=0.6  
xVA1=1.239  
xVS2=2.116  
xVA2=3.173  
xVS1B1=3.516  
xVS1B2=5.146  
xVS1B3=6.108  
xVA1B1=12.394  
xVA1B2=13.004
```

```
xVS3=4.634  
xVA3=6.978  
xVS4=9.314  
xVA4=11.325
```

```
xTS1=2.426  
xTA1=4.167  
xTS2=6.033  
xTA2=7.843  
xTS3=9.343  
xTA3=10.966
```

```
figure(2)  
axes('XScale', 'log', 'YScale', 'log')  
hold on;  
loglog(fw_AzS, Yw_AzS, 'b', fw_AzB, Yw_AzB, 'r')  
loglog([xVS1 xVS1], [1e-10 1], 'k')  
loglog([xTS1 xTS1], [1e-10 1], 'g')  
  
loglog([xVA1 xVA1], [1e-10 1], 'k')  
loglog([xVS2 xVS2], [1e-10 1], 'k')
```

```
loglog([xVA2 xVA2], [1e-10 1], 'k')
loglog([xVS1B1 xVS1B1], [1e-10 1], 'k')
loglog([xVS1B2 xVS1B2], [1e-10 1], 'k')
loglog([xVS1B3 xVS1B3], [1e-10 1], 'k')
loglog([xVA1B1 xVA1B1], [1e-10 1], 'k')
loglog([xVA1B2 xVA1B2], [1e-10 1], 'k')
loglog([xVS3 xVS3], [1e-10 1], 'k')
loglog([xVA3 xVA3], [1e-10 1], 'k')
loglog([xVS4 xVS4], [1e-10 1], 'k')
loglog([xVA4 xVA4], [1e-10 1], 'k')
loglog([xTA1 xTA1], [1e-10 1], 'g')
loglog([xTS2 xTS2], [1e-10 1], 'g')
loglog([xTA2 xTA2], [1e-10 1], 'g')
loglog([xTS3 xTS3], [1e-10 1], 'g')
loglog([xTA3 xTA3], [1e-10 1], 'g')
%loglog([xTS4 xTS4], [1e-10 1], 'g')

title('Akselerasjonsspektra (pwelch), z-akse')
legend('Stålkasse z-akse', 'Betongkasse z-akse', 'Vertikale moder
(Abaqus)', 'Torsjonmoder (Abaqus)')
xlabel('f [Hz]')
ylabel('PSD [m^2/s^3]')
xlim([0.3 25])
ylim([1e-10 1e-2])
filename = ['Logplot_Spektra_Az_resultat2'];
print(figure(2), '-dpng', '-r300', filename);
saveas(figure(2), filename);

%Logplot pwelch, betongkasse og stålkasse y-akse, med resultat fra Abaqus
%Randbetingelsesituasjon 1

xHA1=0.913
xHS2=2.712
xHA2=3.702
xHS3=5.623
xHA3=7.045

xHS2B=2.846

xTS1=2.427
xTA1=4.168
xTS2=6.034
xTA2=7.844
xTS3=9.345
xTA3=10.968
xTS4=13.354
```

```
figure(3)
axes('XScale', 'log', 'YScale', 'log')
hold on;
loglog(fw_AyS, Yw_AyS, 'b', fw_AyB, Yw_AyB, 'r')
loglog([xHA1 xHA1], [1e-10 1], 'k')
loglog([xTS1 xTS1], [1e-10 1], 'g')

loglog([xHS2 xHS2], [1e-10 1], 'k')
loglog([xHA2 xHA2], [1e-10 1], 'k')
loglog([xHS3 xHS3], [1e-10 1], 'k')
loglog([xHA3 xHA3], [1e-10 1], 'k')
loglog([xHS2B xHS2B], [1e-10 1], 'k')

loglog([xTA1 xTA1], [1e-10 1], 'g')
loglog([xTS2 xTS2], [1e-10 1], 'g')
loglog([xTA2 xTA2], [1e-10 1], 'g')
loglog([xTS3 xTS3], [1e-10 1], 'g')
loglog([xTA3 xTA3], [1e-10 1], 'g')
loglog([xTS4 xTS4], [1e-10 1], 'g')

title('Akselerasjonsspektra (pwelch), y-akse')
legend('Stålkasse y-akse', 'Betongkasse y-akse', 'Horisontale moder (Abaqus)', 'Torsjonmoder (Abaqus)')
xlabel('f [Hz]')
ylabel('PSD [m^2/s^3]')
xlim([0.3 25])
ylim([1e-10 1e-4])
filename = ['Logplot_Spektra_Ay_resultat1'];
print(figure(3), '-dpng', '-r300', filename);
saveas(figure(3), filename);

%Randbetingelsesituasjon 2

xHA1=0.912
xHS2=2.711
xHA2=3.696
xHS3=5.621
xHA3=7.042
xHS4=10.51
xHA4=12.979

xHS2B=2.841

xTS1=2.426
xTA1=4.167
```

```
xTS2=6.033
xTA2=7.843
xTS3=9.343
xTA3=10.966
```

```
figure(4)
axes('XScale', 'log', 'YScale', 'log')
hold on;
loglog(fw_AyS, Yw_AyS, 'b', fw_AyB, Yw_AyB, 'r')
loglog([xHA1 xHA1], [1e-10 1], 'k')
loglog([xTS1 xTS1], [1e-10 1], 'g')

loglog([xHS2 xHS2], [1e-10 1], 'k')
loglog([xHA2 xHA2], [1e-10 1], 'k')
loglog([xHS3 xHS3], [1e-10 1], 'k')
loglog([xHA3 xHA3], [1e-10 1], 'k')
loglog([xHS4 xHS4], [1e-10 1], 'k')
loglog([xHA4 xHA4], [1e-10 1], 'k')

loglog([xHS2B xHS2B], [1e-10 1], 'k')

loglog([xTA1 xTA1], [1e-10 1], 'g')
loglog([xTS2 xTS2], [1e-10 1], 'g')
loglog([xTA2 xTA2], [1e-10 1], 'g')
loglog([xTS3 xTS3], [1e-10 1], 'g')
loglog([xTA3 xTA3], [1e-10 1], 'g')
%loglog([xTS4 xTS4], [1e-10 1], 'g')

title('Akselerasjonsspektra (pwelch), y-akse')
legend('Stålkasse y-akse', 'Betongkasse y-akse', 'Horisontale moder  
(Abaqus)', 'Torsjonmoder (Abaqus)')
xlabel('f [Hz]')
ylabel('PSD [m^2/s^3]')
xlim([0.3 25])
ylim([1e-10 1e-4])
filename = ['Logplot_Spektra_Ay_resultat2'];
print(figure(4), '-dpng', '-r300', filename);
saveas(figure(4), filename);
```

fCable1=[0.9334 0.9334
1.8328 1.8328
2.6899 2.7661
3.4848 3.6881
4.1931 4.6102
4.8007 5.5322
5.2909 6.4542
5.6548 7.3763
5.8779 8.2983];

fCable2=[0.9638 0.9638
1.8918 1.8918
2.7771 2.8556
3.5999 3.8075
4.3318 4.7594
4.9594 5.7112
5.4684 6.6631
5.8426 7.6150
6.0739 8.5668];

fCable3=[2.5518 2.5518
5.0464 5.0464];

fCable5=[1.5022 1.5022
2.9691 2.9691
4.3560 4.4713
5.6466 5.9617
6.7964 7.4521];

fCable6=[0.8427 0.8427
1.6475 1.6475
2.4276 2.4902
3.1477 3.3203
3.7657 4.1503
4.3323 4.9804
4.7772 5.8105
5.1061 6.6405
5.3100 7.4706]

fCable7=[0.8202 0.8202
1.6559 1.6559
2.4157 2.4761
3.1497 3.3015
3.7817 4.1268
4.3146 4.9522
4.7698 5.7775
5.0918 6.6029
5.2887 7.4283];

```
%Logplot pwelch, betongkasse og stålkasse z-akse, med resultat fra Abaqus
figure(1)
axes('XScale', 'log', 'YScale', 'log')
hold on;
loglog(fw_AzS, Yw_AzS, 'b', fw_AzB, Yw_AzB, 'r')

%loglog([fCable3(1,1) fCable3(1,1)], [1e-10 1], 'k')
%loglog([fCable3(2,1) fCable3(2,1)], [1e-10 1], 'k')

loglog([fCable1(:,1) fCable1(:,1)], [1e-10 1], 'k')
loglog([fCable1(:,2) fCable1(:,2)], [1e-10 1], 'k', 'LineStyle', '--')

title('Akselerasjonsspektra (pwelch), z-akse')
legend('Stålkasse z-akse', 'Betongkasse z-akse', 'Kabel 1 egenfrekvens')
xlabel('f [Hz]')
ylabel('PSD [m^2/s^3]')
xlim([0.3 25])
ylim([1e-10 1e-2])
filename = ['Logplot_Spektra_Az_kabell1'];
print(figure(1), '-dpng', '-r300', filename);
saveas(figure(1), filename);
```

```
figure(2)
axes('XScale', 'log', 'YScale', 'log')
hold on;
loglog(fw_AyS, Yw_AyS, 'b', fw_AyB, Yw_AyB, 'r')

%loglog([fCable3(1,1) fCable3(1,1)], [1e-10 1], 'k')
%loglog([fCable3(2,1) fCable3(2,1)], [1e-10 1], 'k')

loglog([fCable1(:,1) fCable1(:,1)], [1e-10 1], 'k')
loglog([fCable1(:,2) fCable1(:,2)], [1e-10 1], 'k', 'LineStyle', '--')

title('Akselerasjonsspektra (pwelch), y-akse')
legend('Stålkasse y-akse', 'Betongkasse y-akse', 'Kabel 1 egenfrekvens')
xlabel('f [Hz]')
ylabel('PSD [m^2/s^3]')
xlim([0.3 25])
ylim([1e-10 1e-4])
filename = ['Logplot_Spektra_Ay_kabell1'];
print(figure(2), '-dpng', '-r300', filename);
saveas(figure(2), filename);
```

VEDLEGG E

Beregninger i Excel

Monterte stålelementer

Element nr.	Lengde [mm]	A [m ²]	I _x [m ⁴]	Topplate 1 [mm]	Topplate 2 [mm]	Bunnplate 1 [mm]	Bunnplate 2 [mm]	Bunnplate 3 [mm]	HP stivere 1 [mm]	HP stivere 2 [mm]	Steg [mm]
1	2.52	0.741	0.773	20	12	20	10	10	11	11	20
2-1	1.8	0.52	0.566	12	8	20	8	8	9	11	16
2-2	4.2	0.502	0.557	12	8	20	8	8	9	11	12
3	9	0.494	0.544	12	8	20	8	8	9	9	12
4	9	0.491	0.541	12	8	20	8	8	7	9	12
5-1	7	0.499	0.554	12	8	20	8	8	7	11	12
5-2	2	0.561	0.6	16	12	20	8	8	7	11	12
6-1	2.4	0.703	0.772	20	20	20	10	8	9	11	20
6-2	2.6	0.621	0.714	16	12	20	10	8	9	11	20
7	9	0.499	0.554	12	8	20	8	8	7	11	12
8	9	0.491	0.541	12	8	20	8	8	7	9	12
9	9	0.499	0.554	12	8	20	8	8	7	11	12
10	9	0.499	0.554	12	8	20	8	8	7	11	12
11-1	1.8	0.612	0.675	16	12	20	10	10	9	11	16
11-2	3.6	0.712	0.74	20	20	20	10	10	9	11	20
11-3	3.1	0.63	0.684	16	12	20	10	10	9	11	20
12-1	3	0.52	0.566	12	8	20	8	8	9	11	16
12-2	5.5	0.502	0.557	12	8	20	8	8	9	11	12
13	9	0.502	0.557	12	8	20	8	8	9	11	12
14	9	0.494	0.544	12	8	20	8	8	9	9	12
15	9	0.494	0.544	12	8	20	8	8	9	9	12
16-1	2	0.502	0.557	12	8	20	8	8	9	11	12
16-2	2	0.52	0.566	14	10	20	8	8	9	11	16
16-3	2	0.6	0.628	16	12	20	8	8	9	11	20
17-1	4	0.722	0.74	20	20	20	10	8	9	11	24
17-2	4	0.639	0.685	16	12	20	10	8	9	11	24
18-1	2	0.559	0.612	12	8	20	10	8	9	11	20
18-2	2	0.541	0.604	12	8	20	10	8	9	11	16
18-3	4	0.523	0.596	12	8	20	10	8	9	11	12
19	9	0.494	0.554	12	8	20	8	8	9	9	12
20	9	0.494	0.554	12	8	20	8	8	9	9	12
21	9	0.494	0.554	12	8	20	8	8	9	9	12
22	9	0.491	0.541	12	8	20	8	8	7	9	12
23-1	1.4	0.491	0.541	12	8	20	8	8	7	9	12
23-2	4	0.509	0.55	12	8	20	8	8	7	9	16
Vektet gjennomsnitt		0.524112223	0.576629295	12.90343628	9.066115702	20	8.348194867	8.119834711	8.283601566	10.06046107	13.63201392

Koordinater for noder på brubane

Akse	Node nr.	x	z	Element nr.	Elementlengde
Akse 9	1	0	0.0000	1	3.7513
	2	3.75	0.1002	2	3.7513
	3	7.5	0.2003	3	3.7513
	4	11.25	0.3005	4	3.7513
	5	15	0.4007	5	3.5012
	6	18.5	0.4941	6	3.5012
	7	22	0.5876	7	3.5012
	8	25.5	0.6811	8	3.5012
	9	29	0.7746	9	1.0004
	10	30	0.8013	10	3.3012
	11	33.3	0.8894	11	3.3012
Akse 10a	12	36.6	0.9776	12	1.4005
Akse 10	13	38	1.0150	13	1.6006
Akse 10b	14	39.6	1.0577	14	3.7013
	15	43.3	1.1565	15	3.7013
	16	47	1.2554	16	3.2512
	17	50.25	1.3422	17	3.2512
	18	53.5	1.4290	18	3.2512
	19	56.75	1.5158	19	3.2512
Akselerometer 1	20	60	1.6026	20	3.2512
	21	63.25	1.6894	21	3.2512
	22	66.5	1.7759	22	3.2511
	23	69.75	1.8608	23	3.2511
	24	73	1.9440	24	4.5014
	25	77.5	2.0562	25	4.5013
Akse 11	26	82	2.1651	26	4.0011
	27	86	2.2590	27	4.0010
	28	90	2.3502	28	0.5001
	29	90.5	2.3615	29	3.6259
	30	94.125	2.4416	30	3.6258
	31	97.75	2.5195	31	3.6258
	32	101.375	2.5952	32	3.6257
	33	105	2.6687	33	3.7507
	34	108.75	2.7424	34	3.7507
	35	112.5	2.8138	35	3.7506
	36	116.25	2.8829	36	3.7506
Akse 12 (tårn)	37	120	2.9496	-	-
Akse 12 (tårn)	38	120	2.9456	51	5.0007
	39	125	3.0309	52	5.0007
	40	130	3.1120	53	5.0006
	41	135	3.1890	54	5.0005
	42	140	3.2618	55	5.0005
	43	145	3.3304	56	5.0004
	44	150	3.3948	57	5.0004
Akselerometer 2	45	155	3.4551	58	4.0003
Forankring, kabel 5	46	159	3.5004	59	5.5003
	47	164.5	3.5582	60	5.5003
	48	170	3.6110	61	5.5002
	49	175.5	3.6587	62	5.5002
	50	181	3.7014	63	5.5001
	51	186.5	3.7390	64	5.5001
	52	192	3.7716	65	5.5001
	53	197.5	3.7992	66	5.5000
Forankring, kabel 6	54	203	3.8217	67	6.1250
	55	209.125	3.8409	68	6.1250
	56	215.25	3.8537	69	6.1250
	57	221.375	3.8604	70	6.1250
	58	227.5	3.8607	71	6.1250

Fall
0.02671

Høydeforskjell c.g. mellom betong- og ståldekke
 Δz -0.004

Startpunkt for kurve:	
z	1.7233
x	64.52

Kurveparametere:	
$y=ax^2+bx+c$	
a	-8.34E-05
b	0.03748889
c	-0.3483387

Δx (node 38-45)
5

Δx (node 46-54)
5.5

Δx (node 54-62)
6.125

	59	233.625	3.8548	72	6.1250	
	60	239.75	3.8427	73	6.1250	
	61	245.875	3.8243	74	6.1250	
Forankring, kabel 7	62	252	3.7996	75	6.6251	Δx (node62-70)
	63	258.625	3.7659	76	6.6251	6.625
	64	265.25	3.7249	77	6.6252	
	65	271.875	3.6765	78	6.6252	
	66	278.5	3.6208	79	6.6253	
	67	285.125	3.5582	80	6.6253	Fall
	68	291.75	3.4939	81	6.6253	0.00971
	69	298.375	3.4295	82	6.6253	
Akse 13	70	305	3.3652	-	-	

Sluttpunkt for kurve:	
z	3.5793
x	282.95

Lengde betong	120.0368
Lengde stål	185.0073
Totallengde	305.0440

Cable prestress calculations

Self weight only

Node nr.	U1	U2	U3	UR1	UR2	UR3
46	6.90E-03	0.00E+00	-2.30E-01	6.82E-16	8.80E-03	0.00E+00
54	2.91E-03	0.00E+00	-6.44E-01	5.98E-16	9.55E-03	0.00E+00
58	1.37E-03	0.00E+00	-8.50E-01	1.29E-15	5.46E-03	0.00E+00
62	2.99E-04	0.00E+00	-8.60E-01	2.00E-15	-4.95E-03	0.00E+00
66	6.13E-04	0.00E+00	-5.66E-01	9.97E-16	-1.72E-02	0.00E+00
232	1.64E-01	0.00E+00	-5.86E-03	0.00E+00	4.18E-03	0.00E+00

Relevant data	
U3	-2.30E-01
U3	-6.44E-01
U3	-8.50E-01
U3	-8.60E-01
U3	-5.66E-01
U1	1.64E-01

Cable 1

Node nr.	U1	U2	U3	UR1	UR2	UR3
46	-1.11E-05	6.10E-15	1.67E-02	1.44E-15	-6.11E-04	8.01E-17
54	-5.03E-05	1.29E-14	4.07E-02	1.00E-15	-4.01E-04	0.00E+00
58	1.88E-05	1.54E-14	4.68E-02	-3.45E-17	-7.64E-05	-1.02E-16
62	8.75E-05	1.23E-14	4.31E-02	-1.06E-15	4.08E-04	-2.50E-16
66	1.09E-04	6.16E-15	2.56E-02	-5.28E-16	8.64E-04	-2.53E-16
232	-2.29E-02	2.63E-15	-3.16E-05	0.00E+00	-6.49E-04	0.00E+00

Relevant data	
U3	1.67E-02
U3	4.07E-02
U3	4.68E-02
U3	4.31E-02
U3	2.56E-02
U1	-2.29E-02

Cable 2

Node nr.	U1	U2	U3	UR1	UR2	UR3
46	-6.96E-05	0.00E+00	1.66E-02	1.52E-16	-6.04E-04	0.00E+00
54	-9.11E-05	0.00E+00	4.03E-02	7.05E-17	-3.97E-04	0.00E+00
58	-1.29E-05	0.00E+00	4.64E-02	5.80E-17	-7.57E-05	0.00E+00
62	6.49E-05	0.00E+00	4.27E-02	4.58E-17	4.04E-04	0.00E+00
66	9.70E-05	0.00E+00	2.53E-02	2.29E-17	8.56E-04	0.00E+00
232	-2.28E-02	0.00E+00	-4.20E-05	5.43E-17	-6.42E-04	0.00E+00

Relevant data	
U3	1.66E-02
U3	4.03E-02
U3	4.64E-02
U3	4.27E-02
U3	2.53E-02
U1	-2.28E-02

Cable 3

Node nr.	U1	U2	U3	UR1	UR2	UR3
46	-6.20E-06	-3.05E-15	5.90E-03	-6.70E-16	-2.18E-04	-1.72E-16
54	-1.99E-05	-9.51E-15	1.45E-02	1.34E-15	-1.45E-04	-9.57E-17
58	4.33E-06	-9.89E-15	1.67E-02	1.98E-15	-2.83E-05	0.00E+00
62	2.85E-05	-7.26E-15	1.54E-02	2.61E-15	1.45E-04	1.33E-16
66	3.69E-05	-3.43E-15	9.15E-03	1.30E-15	3.09E-04	1.12E-16
232	-8.24E-03	-1.43E-15	-1.28E-04	9.28E-17	-2.33E-04	0.00E+00

Relevant data	
U3	5.90E-03
U3	1.45E-02
U3	1.67E-02
U3	1.54E-02
U3	9.15E-03
U1	-8.24E-03

Cable 5

Node nr.	U1	U2	U3	UR1	UR2	UR3
46	-5.09E-04	-9.97E-16	2.55E-02	-2.82E-16	-3.93E-04	-3.99E-17
54	-2.24E-04	-2.74E-15	1.21E-02	-3.18E-16	5.28E-04	-5.41E-17
58	-1.60E-04	-3.55E-15	2.28E-03	1.60E-16	2.80E-04	0.00E+00
62	-1.21E-04	-2.98E-15	-2.06E-03	6.32E-16	8.39E-05	5.73E-17
66	-7.15E-05	-1.44E-15	-2.26E-03	3.16E-16	-5.40E-05	5.17E-17
232	9.03E-04	0.00E+00	-5.49E-05	0.00E+00	3.70E-05	0.00E+00

Relevant data	
U3	2.55E-02
U3	1.21E-02
U3	2.28E-03
U3	-2.06E-03
U3	-2.26E-03
U1	9.03E-04

Cable 6

Node nr.	U1	U2	U3	UR1	UR2	UR3
46	4.74E-04	8.54E-15	1.79E-02	-2.26E-15	-1.16E-03	0.00E+00
54	-3.11E-05	4.57E-15	7.66E-02	-2.63E-15	-6.01E-04	-4.43E-17
58	1.59E-04	2.66E-15	7.32E-02	-2.05E-15	7.10E-04	-4.10E-17
62	2.82E-04	0.00E+00	4.97E-02	-1.47E-15	1.04E-03	-4.46E-17
66	1.68E-04	0.00E+00	2.38E-02	-7.36E-16	9.24E-04	-4.37E-17
232	5.80E-04	-2.91E-15	1.56E-05	0.00E+00	-8.94E-06	0.00E+00

Relevant data	
U3	1.79E-02
U3	7.66E-02
U3	7.32E-02
U3	4.97E-02
U3	2.38E-02
U1	5.80E-04

Cable 7

Node nr.	U1	U2	U3	UR1	UR2	UR3
46	1.56E-03	2.51E-15	-6.76E-03	1.87E-16	3.91E-05	8.47E-17
54	1.24E-03	6.63E-15	1.81E-02	-2.02E-16	-1.39E-03	6.42E-17
58	8.69E-04	7.49E-15	5.94E-02	-7.95E-16	-1.66E-03	0.00E+00
62	6.36E-04	6.07E-15	8.51E-02	-1.38E-15	-1.35E-04	-1.16E-16
66	5.38E-04	2.98E-15	5.98E-02	-6.88E-16	1.82E-03	-1.10E-16
232	1.04E-02	-7.53E-15	-1.37E-04	2.06E-16	2.23E-04	0.00E+00

Relevant data	
U3	-6.76E-03
U3	1.81E-02
U3	5.94E-02
U3	8.51E-02
U3	5.98E-02
U1	1.04E-02

Collected data

Node nr.	disp.	SW	cable1	cable2	cable3	cable5	cable6	cable7
46	U3	-2.30E-01	1.67E-02	1.66E-02	5.90E-03	2.55E-02	1.79E-02	-6.76E-03
54	U3	-6.44E-01	4.07E-02	4.03E-02	1.45E-02	1.21E-02	7.66E-02	1.81E-02
58	U3	-8.50E-01	4.68E-02	4.64E-02	1.67E-02	2.28E-03	7.32E-02	5.94E-02
62	U3	-8.60E-01	4.31E-02	4.27E-02	1.54E-02	-2.06E-03	4.97E-02	8.51E-02
66	U3	-5.66E-01	2.56E-02	2.53E-02	9.15E-03	-2.26E-03	2.38E-02	5.98E-02
232	U1	1.64E-01	-2.29E-02	-2.28E-02	-8.24E-03	9.03E-04	5.80E-04	1.04E-02

Results

Node nr.	disp.	Theoretical (Matlab)	Abaqus model
46	U3	5.93E-11	0.004406
54	U3	-8.89E-12	0.009917
58	U3	2.34E-12	0.01151
62	U3	1.04E-02	0.019818
66	U3	-2.26E-02	-0.01713
232	U1	-1.59E-12	-0.01173
Error sum:		0.033	0.074515

Oversikt egenmoder, uten kabelmoder

Randbetingelsessituasjon 1

Mode nr.	f [Hz]	Primær respons	Sekundære responser
1	0.603	VS1	
2	0.913	HA1	
3	0.933	Tverrbjelke	V
4	0.933	Tverrbjelke	H
5	1.107	Tverrbjelke	V
6	1.108	Tverrbjelke	H+T
7	1.126	Tverrbjelke	V
8	1.126	Tverrbjelke	H+T
9	1.248	VA1	
10	1.69	Tårn	H
11	1.893	Tårn	V+N
12	2.179	VS2	
13	2.427	TS1	H
14	2.712	HS2	T
15	2.846	HS2 (Betongdominert)	
16	2.933	Tårn	
17	3.331	VA2	N+Tårn
18	3.358	VA2	N
19	3.702	HA2	
20	3.964	Tårn	
21	4.051	VS1 (Betong, Akse 10-11)	
22	4.168	TA1	H
23	4.606	Tårn	V+N
24	4.903	VS3	
25	5.223	Tårn	H
26	5.377	VS1 (Betong, Akse 9-10)	
27	5.623	HS3	
28	6.034	TS2	H
29	6.485	VS1 (Betong, akse 11-12)	
30	6.988	VA3	
31	7.021	Tårn	H
32	7.045	HA3	
33	7.844	TA2	H
34	8.816	Tårn	N+V
35	9.345	TS3	H
36	9.371	VS4	
37	9.929	N	V
38	10.226	Tårn	H
39	10.461	Tårn	H
40	10.5	Tårn	H
41	10.968	TA3	H
42	11.051	Søyle	
43	11.439	VA4	
44	11.906	Tårn	
45	12.05	Søyle	
46	12.362	Søyle	
47	12.631	Tårn	V
48	13.012	Søyle	H
49	13.354	TS4	H
50	13.781	Tårn	V+N

Oversikt egenmoder, uten kabelmoder

Randbetingelsessituasjon 2

Mode nr.	f [Hz]	Primær respons	Sekundære responser
1	0.6	VS1	
2	0.912	HA1	
3	0.935	Tverrbjelke	V+H
4	0.936	Tverrbjelke	H
5	1.114	Tverrbjelke	V
6	1.114	Tverrbjelke	V
7	1.129	Tverrbjelke	V
8	1.129	Tverrbjelke	V+H+T
9	1.239	VA1	
10	1.689	Tårn	H
11	1.769	Tårn	N+V
12	2.116	VS2	
13	2.426	TS1	HS2
14	2.711	HS2	T
15	2.841	HS2 (Betongdominert)	
16	2.934	Tårn	
17	3.173	VA2	
18	3.3	Tårn	N+V
19	3.516	VS1 (Betong, Akse 10-11)	
20	3.696	HA2	
21	3.978	Tårn	
22	4.167	TA1	H
23	4.601	Tårn	V+N
24	4.634	VS3	
25	5.146	VS1 (Betong, Akse 9-10)	
26	5.222	Tårn	H
27	5.621	HS3	
28	6.033	TS2	H
29	6.108	VS1 (Betong, Akse 11-12)	
30	6.978	VA3	
31	7.021	Tårn	
32	7.042	HA3	
33	7.054	Søyle	
34	7.573	Søyle	
35	7.843	TA2	H
36	8.483	Søyle	
37	8.703	Søyle	Tårn+N
38	9.314	VS4	
39	9.343	TS3	H
40	9.414	Søyle	N+V+H
41	9.938	N	V
42	10.227	Tårn	H
43	10.462	Tårn	
44	10.51	HS4	Tårn
45	10.966	TA3	H
46	11.325	VA4	Tårn
47	11.796	Tårn	VA4
48	12.394	Tårn	VA1 (Betong, Akse 10-11)
49	12.979	HA4 (Betongdominert)	
50	13.004	VA1 (Betong, Akse 10-11)	

Egenfrekvenser kabler

Kabel nr.	Modeform	f(min) [Hz]	f(max) [Hz]	f(mid.) [Hz]	Teoretisk verdi (beregnet fra S1 og A1)
kabel 1	S1	0.92584	0.94086	0.9334	0.9334
kabel 1	A1	1.8302	1.8353	1.8328	1.8328
kabel 1	S2	2.689	2.6907	2.6899	2.7661
kabel 1	A2	3.4839	3.4856	3.4848	3.6881
kabel 1	S3	4.1927	4.1934	4.1931	4.6102
kabel 1	A3	4.7992	4.8021	4.8007	5.5322
kabel 1	S4	5.2903	5.2914	5.2909	6.4542
kabel 1	A4	5.6539	5.6556	5.6548	7.3763
kabel 1	S5	5.8778	5.878	5.8779	8.2983
kabel 2	S1	0.95654	0.97109	0.9638	0.9638
kabel 2	A1	1.8891	1.8945	1.8918	1.8918
kabel 2	S2	2.7691	2.785	2.7771	2.8556
kabel 2	A2	3.5994	3.6003	3.5999	3.8075
kabel 2	S3	4.3314	4.3321	4.3318	4.7594
kabel 2	A3	4.9581	4.9606	4.9594	5.7112
kabel 2	S4	5.4671	5.4696	5.4684	6.6631
kabel 2	A4	5.8422	5.8429	5.8426	7.6150
kabel 2	S5	6.0738	6.0739	6.0739	8.5668
kabel 3	S1	2.5485	2.555	2.5518	2.5518
kabel 3	A1	5.0394	5.0533	5.0464	5.0464
kabel 5	S1	1.4983	1.506	1.5022	1.5022
kabel 5	A1	2.9655	2.9727	2.9691	2.9691
kabel 5	S2	4.3524	4.3595	4.3560	4.4713
kabel 5	A2	5.6442	5.649	5.6466	5.9617
kabel 5	S3	6.7955	6.7972	6.7964	7.4521
kabel 6	S1	0.82745	0.85794	0.8427	0.8427
kabel 6	A1	1.6408	1.6542	1.6475	1.6475
kabel 6	S2	2.4258	2.4293	2.4276	2.4902
kabel 6	A2	3.1397	3.1557	3.1477	3.3203
kabel 6	S3	3.737	3.7943	3.7657	4.1503
kabel 6	A3	4.3317	4.3329	4.3323	4.9804
kabel 6	S4	4.7768	4.7776	4.7772	5.8105
kabel 6	A4	5.1058	5.1064	5.1061	6.6405
kabel 6	S5	5.3098	5.3102	5.3100	7.4706
kabel 7	S1	0.79588	0.8445	0.8202	0.8202
kabel 7	A1	1.6448	1.667	1.6559	1.6559
kabel 7	S2	2.3968	2.4345	2.4157	2.4761
kabel 7	A2	3.1437	3.1557	3.1497	3.3015
kabel 7	S3	3.7778	3.7855	3.7817	4.1268
kabel 7	A3	4.2988	4.3304	4.3146	4.9522
kabel 7	S4	4.7681	4.7714	4.7698	5.7775
kabel 7	A4	5.091	5.0925	5.0918	6.6029
kabel 7	S5	5.2883	5.289	5.2887	7.4283

Analyse av spektra, betongkasse mot stålkasse (Ax)

Frekvenst opp nr.	f [Hz]	f_{min}	f_{max}	ρ	$\sigma_{aB,F}$	$\sigma_{aS,F}$	$S_{aB}(f)$	$S_{aS}(f)$	$\frac{\sigma_{aB,F}}{\sigma_{aS,F}}$	$\sqrt{\frac{S_{aB}(f)}{S_{aS}(f)}}$
1	0.8789	0.8039	0.9539	0.94799	4.67E-05	6.07E-04	1.63E-08	2.75E-06	0.07701229	0.076875981
2	2.246	2.171	2.321	-0.0539	2.61E-04	4.61E-04	5.09E-07	1.57E-06	0.56694502	0.570115715
3	2.734	2.659	2.809	0.68854	3.08E-04	5.46E-04	7.31E-07	2.20E-06	0.56420408	0.575999004
4	4.15	4.075	4.225	-0.7264	2.25E-04	6.89E-04	4.79E-07	5.29E-06	0.32629202	0.300868965
5	4.883	4.808	4.958	0.44057	1.45E-04	2.00E-04	1.57E-07	3.08E-07	0.72125973	0.714410854
6	6.445	6.37	6.52	-0.8897	8.71E-05	2.63E-04	5.73E-08	5.23E-07	0.3313083	0.331272738
7	6.934	6.859	7.009	-0.9221	6.30E-05	2.02E-04	3.02E-08	3.15E-07	0.31127783	0.309982306
8	7.715	7.64	7.79	-0.4155	6.52E-05	1.58E-04	3.69E-08	1.99E-07	0.41198265	0.431104345
9	12.16	12.085	12.235	-0.3177	3.44E-04	3.87E-04	9.23E-07	1.20E-06	0.8884718	0.877149451
10	13.48	13.405	13.555	0.42922	3.71E-04	1.95E-04	1.02E-06	2.96E-07	1.90409756	1.860625952
11	14.01	13.935	14.085	0.35576	1.93E-04	2.83E-04	3.51E-07	7.08E-07	0.67973543	0.704206126
12	16.5	16.425	16.575	0.27448	1.49E-04	2.05E-04	1.67E-07	3.14E-07	0.72744746	0.730296743
13	17.72	17.645	17.795	0.65298	1.07E-04	1.75E-04	8.98E-08	2.53E-07	0.60956325	0.5954161
14	18.36	18.285	18.435	0.31275	1.29E-04	1.82E-04	1.43E-07	2.63E-07	0.7076636	0.738079877
15	20.65	20.575	20.725	-0.0377	1.73E-04	3.12E-04	2.26E-07	7.80E-07	0.55599044	0.537732858

Analyse av spektra, betongkasse mot stålkasse (Ay)

Frekvenst opp nr.	f [Hz]	f_{min}	f_{max}	ρ	$\sigma_{aB,F}$	$\sigma_{aS,F}$	$S_{aB}(f)$	$S_{aS}(f)$	$\frac{\sigma_{aB,F}}{\sigma_{aS,F}}$	$\sqrt{\frac{S_{aB}(f)}{S_{aS}(f)}}$
1	0.9766	0.9016	1.0516	-0.8902	1.11E-04	1.29E-04	1.04E-07	1.32E-07	0.86413867	0.888027677
2	1.172	1.097	1.247	-0.9813	2.36E-04	2.20E-04	4.99E-07	4.10E-07	1.06838384	1.103037202
3	1.855	1.78	1.93	-0.9418	1.03E-04	9.36E-05	9.26E-08	7.67E-08	1.09714795	1.098928181
4	2.246	2.171	2.321	-0.7539	4.13E-05	5.28E-05	1.51E-08	2.45E-08	0.78164924	0.785523589
5	2.832	2.757	2.907	-0.5281	8.95E-05	1.51E-04	7.66E-08	1.51E-07	0.59245435	0.712850965
6	2.93	2.855	3.005	-0.7367	8.15E-05	2.17E-04	5.49E-08	4.16E-07	0.37631324	0.363255828
7	3.516	3.441	3.591	-0.962	3.34E-04	2.99E-04	1.02E-06	8.16E-07	1.12004911	1.119402619
8	4.102	4.027	4.177	-0.8573	2.58E-04	4.92E-04	4.98E-07	2.09E-06	0.52308973	0.488001348
9	4.443	4.368	4.518	-0.8371	1.18E-04	1.69E-04	1.19E-07	2.30E-07	0.70154789	0.719142857
10	4.883	4.808	4.958	-0.1419	6.20E-05	1.06E-04	3.18E-08	9.19E-08	0.583404	0.587843028
11	5.273	5.198	5.348	-0.3746	5.17E-05	1.18E-04	2.31E-08	1.17E-07	0.43804406	0.443576874
12	6.006	5.931	6.081	0.64218	8.67E-05	1.23E-04	5.95E-08	1.31E-07	0.70716825	0.673315423
13	7.129	7.054	7.204	-0.3944	7.98E-05	1.34E-04	5.09E-08	1.57E-07	0.59554686	0.570045733
14	8.008	7.933	8.083	0.73318	6.59E-05	1.21E-04	3.52E-08	1.17E-07	0.54438029	0.548736787
15	8.398	8.323	8.473	0.55279	8.70E-05	1.40E-04	6.46E-08	1.52E-07	0.61980202	0.652198067
16	11.96	11.885	12.035	-0.5618	7.45E-05	1.89E-04	4.64E-08	2.97E-07	0.39350204	0.395125072
17	13.28	13.205	13.355	0.91582	7.77E-05	2.85E-04	4.96E-08	6.51E-07	0.2721284	0.276073898
18	19.82	19.745	19.895	0.66267	5.90E-05	2.04E-04	2.92E-08	3.46E-07	0.28983928	0.290386777

Analyse av spektra, betongkasse mot stålkasse (Az)

Frekvenst opp nr.	f [Hz]	f_{min}	f_{max}	ρ	$\sigma_{aB,F}$	$\sigma_{aS,F}$	$S_{aB}(f)$	$S_{aS}(f)$	$\frac{\sigma_{aB,F}}{\sigma_{aS,F}}$	$\sqrt{\frac{S_{aB}(f)}{S_{aS}(f)}}$
1	1.221	1.146	1.296	0.39424	4.13E-05	1.25E-03	7.06E-09	1.38E-05	0.03290816	0.022626648
2	2.051	1.976	2.126	0.90159	1.24E-04	3.35E-03	1.45E-07	1.16E-04	0.03705277	0.035392021
3	2.148	2.073	2.223	0.72212	9.76E-05	2.03E-03	6.99E-08	2.62E-05	0.04817022	0.051632392
4	2.93	2.855	3.005	0.96962	5.40E-04	3.40E-03	2.57E-06	1.01E-04	0.15858542	0.159499712
5	3.564	3.489	3.639	-0.5679	2.27E-03	9.84E-04	4.79E-05	6.92E-06	2.31135293	2.629843502
6	4.15	4.075	4.225	-0.7127	1.00E-03	2.75E-03	9.28E-06	7.87E-05	0.36380768	0.343338952
7	4.883	4.808	4.958	-0.897	5.73E-04	1.46E-03	3.01E-06	1.99E-05	0.39139155	0.38865558
8	6	5.85	6.1	0.30643	1.15E-03	1.53E-03	1.21E-05	2.33E-05	0.75163399	0.720203858
9	7.129	7.054	7.204	-0.6494	2.06E-04	9.57E-04	3.57E-07	7.91E-06	0.21567185	0.212420733
10	12.11	12.035	12.185	-0.3205	3.84E-04	1.13E-03	1.21E-06	1.17E-05	0.34062592	0.320648873
11	18.07	17.995	18.145	-0.0022	6.95E-04	1.18E-03	5.03E-06	1.07E-05	0.59146879	0.686899546
12	20.65	20.575	20.725	-0.1795	3.77E-04	1.38E-03	1.17E-06	1.52E-05	0.27322826	0.277322727

Sammenligning av måledata og Abaqus-modell for svingningsforskjeller mellom sensorer (y-akse)

Randbetingelsessituasjon 1, (se kapittel 5.3)

Frekvenstopp nr.	f (Spektra)	ρ	$\sqrt{\frac{S_{aB}(f)}{S_{aS}(f)}}$	Mode nr.	f (Abaqus)	X_{S1} (Node 20)	X_{S2} (Node 45)	$\frac{X_{S1}}{X_{S2}}$	Avvik frekvens %
1	0.9766	-0.89023	0.888027677	2	0.913	-2.90E-05	4.82E-04	-0.0601955	-6.5 %
2	1.172	-0.98127	1.103037202	4	0.933	-7.50E-07	1.25E-05	-0.0600755	-20.4 %
2	1.172	-0.98127	1.103037202	6	1.108	3.84E-10	-5.84E-09	-0.0656694	-5.5 %
2	1.172	-0.98127	1.103037202	8	1.126	5.80E-10	3.40E-09	0.17067515	-3.9 %
3	1.855	-0.94184	1.098928181	10	1.69	3.15E-05	1.53E-04	0.20521466	-8.9 %
5	2.832	-0.52814	0.712850965	14	2.712	2.83E-05	-8.50E-04	-0.0332632	-4.2 %
5	2.832	-0.52814	0.712850965	15	2.846	-6.39E-04	1.49E-04	-4.2809777	0.5 %
6	2.93	-0.73674	0.363255828	14	2.712	2.83E-05	-8.50E-04	-0.0332632	-7.4 %
6	2.93	-0.73674	0.363255828	15	2.846	-6.39E-04	1.49E-04	-4.2809777	-2.9 %
7	3.516	-0.96201	1.119402619	19	3.702	2.75E-04	1.44E-04	1.90868197	5.3 %
8	4.102	-0.85727	0.488001348	22	4.168	-3.15E-05	-1.37E-05	2.30248422	1.6 %
9	4.443	-0.83709	0.719142857	22	4.168	-3.15E-05	-1.37E-05	2.30248422	-6.2 %
12	6.006	0.64218	0.673315423	27	5.623	-4.78E-05	8.01E-04	-0.0596527	-6.4 %
12	6.006	0.64218	0.673315423	28	6.034	-4.41E-06	-1.41E-05	0.31246391	0.5 %
13	7.129	-0.39442	0.570045733	31	7.021	-2.81E-06	-1.05E-05	0.26793721	-1.5 %
13	7.129	-0.39442	0.570045733	32	7.045	2.08E-04	7.53E-04	0.27663982	-1.2 %
14	8.008	0.73318	0.548736787	33	7.844	1.11E-05	3.34E-05	0.33342332	-2.0 %
17	13.28	0.91582	0.276073898	48	13.012	-5.60E-04	1.19E-04	-4.7223393	-2.0 %
17	13.28	0.91582	0.276073898	49	13.354	3.47E-05	-1.79E-05	-1.9422393	0.6 %

Randbetingelsessituasjon 2, (se kapittel 5.4)

Frekvenstopp nr.	f (Spektra)	ρ	$\sqrt{\frac{S_{aB}(f)}{S_{aS}(f)}}$	Mode nr.	f (Abaqus)	X_{S1} (Node 20)	X_{S2} (Node 45)	$\frac{X_{S1}}{X_{S2}}$	Avvik frekvens %
1	0.9766	-0.89023	0.888027677	2	0.912	2.94E-05	-4.82E-04	-0.0609606	-6.6 %
2	1.172	-0.98127	1.103037202	3	0.935	-3.66E-08	6.00E-07	-0.0609856	-20.2 %
2	1.172	-0.98127	1.103037202	4	0.936	6.35E-07	-1.04E-05	-0.060829	-20.1 %
2	1.172	-0.98127	1.103037202	8	1.129	6.64E-10	1.87E-09	0.35510184	-3.7 %
3	1.855	-0.94184	1.098928181	10	1.689	3.10E-05	1.54E-04	0.20098676	-8.9 %
3	1.855	-0.94184	1.098928181	13	2.426	2.79E-05	-4.08E-04	-0.068318	30.8 %
5	2.832	-0.52814	0.712850965	13	2.426	2.79E-05	-4.08E-04	-0.068318	-14.3 %
5	2.832	-0.52814	0.712850965	14	2.711	3.66E-05	-8.50E-04	-0.0429966	-4.3 %
5	2.832	-0.52814	0.712850965	15	2.841	6.41E-04	-1.38E-04	-4.6494234	0.3 %
6	2.93	-0.73674	0.363255828	14	2.711	3.66E-05	-8.50E-04	-0.0429966	-7.5 %
6	2.93	-0.73674	0.363255828	15	2.841	6.41E-04	-1.38E-04	-4.6494234	-3.0 %
7	3.516	-0.96201	1.119402619	20	3.696	2.74E-04	1.48E-04	1.85046103	5.1 %
7	3.516	-0.96201	1.119402619	22	4.167	3.09E-05	1.37E-05	2.25703075	18.5 %
8	4.102	-0.85727	0.488001348	22	4.167	3.09E-05	1.37E-05	2.25703075	1.6 %
9	4.443	-0.83709	0.719142857	20	3.696	2.74E-04	1.48E-04	1.85046103	-16.8 %
9	4.443	-0.83709	0.719142857	22	4.167	3.09E-05	1.37E-05	2.25703075	-6.2 %
12	6.006	0.64218	0.673315423	27	5.621	4.80E-05	-8.01E-04	-0.0599832	-6.4 %
12	6.006	0.64218	0.673315423	28	6.033	-4.45E-06	-1.38E-05	0.32196339	0.4 %
13	7.129	-0.39442	0.570045733	32	7.042	2.08E-04	7.49E-04	0.27716835	-1.2 %
13	7.129	-0.39442	0.570045733	35	7.843	1.11E-05	3.34E-05	0.33332637	10.0 %
14	8.008	0.73318	0.548736787	35	7.843	1.11E-05	3.34E-05	0.33332637	-2.1 %
14	8.008	0.73318	0.548736787	39	9.343	-5.72E-06	-5.92E-05	0.09672315	16.7 %
17	13.28	0.91582	0.276073898	44	10.51	-2.37E-04	-6.47E-04	0.36680329	-20.9 %
17	13.28	0.91582	0.276073898	45	10.966	2.45E-05	3.79E-05	0.64724227	-17.4 %
17	13.28	0.91582	0.276073898	49	12.979	-7.69E-04	1.81E-04	-4.2544876	-2.3 %

Sammenligning av måledata og Abaqus-modell for svingningsforskjeller mellom sensorer (z-akse)

Randbetingelsessituasjon 1, (se kapittel 5.3)

Frekvenstopp nr.	f (Spektra)	ρ	$\sqrt{\frac{S_{aB}(f)}{S_{aS}(f)}}$	Mode nr.	f (Abaqus)	$X_{S1}(Node\ 20)$	$X_{S2}(Node\ 45)$	$\frac{X_{S1}}{X_{S2}}$	Avvik frekvens %
1	1.221	0.39424	0.022626648	3	0.933	2.37E-08	1.49E-06	0.01591433	-23.6 %
1	1.221	0.39424	0.022626648	5	1.107	-2.32E-08	-8.12E-06	0.00285635	-9.3 %
1	1.221	0.39424	0.022626648	7	1.126	-8.56E-08	-1.44E-05	0.00593314	-7.8 %
1	1.221	0.39424	0.022626648	9	1.248	-4.82E-06	-6.76E-04	0.00712571	2.2 %
2	2.051	0.90159	0.035392021	12	2.179	2.60E-06	1.12E-03	0.00233003	6.2 %
3	2.93	0.96962	0.159499712	17	3.331	5.77E-05	-4.72E-04	-0.1223433	13.7 %
3	2.93	0.96962	0.159499712	18	3.358	-9.69E-05	-1.15E-03	0.08421735	14.6 %
4	3.564	-0.56792	2.629843502	17	3.331	5.77E-05	-4.72E-04	-0.1223433	-6.5 %
4	3.564	-0.56792	2.629843502	18	3.358	-9.69E-05	-1.15E-03	0.08421735	-5.8 %
5	4.15	-0.71274	0.343338952	21	4.051	1.03E-03	-7.98E-05	-12.867809	-2.4 %
6	4.883	-0.89698	0.38865558	24	4.903	-1.65E-05	7.76E-04	-0.0212297	0.4 %
6	4.883	-0.89698	0.38865558	26	5.377	-6.11E-04	2.41E-04	-2.5392626	10.1 %
8	7.129	-0.64937	0.212420733	30	6.988	2.18E-04	2.22E-04	0.98089251	-2.0 %
9	12.11	-0.32046	0.320648873	43	11.439	4.96E-05	-7.31E-04	-0.0678555	-5.5 %
9	12.11	-0.32046	0.320648873	47	12.631	5.12E-05	-6.44E-05	-0.795724	4.3 %

Randbetingelsessituasjon 2, (se kapittel 5.4)

Frekvenstopp nr.	f (Spektra)	ρ	$\sqrt{\frac{S_{aB}(f)}{S_{aS}(f)}}$	Mode nr.	f (Abaqus)	$X_{S1}(Node\ 20)$	$X_{S2}(Node\ 45)$	$\frac{X_{S1}}{X_{S2}}$	Avvik frekvens %
1	1.221	0.39424	0.022626648	3	0.935	2.59E-08	1.45E-06	0.0179122	-23.4 %
1	1.221	0.39424	0.022626648	5	1.114	7.41E-08	9.26E-06	0.00800521	-8.8 %
1	1.221	0.39424	0.022626648	6	1.114	-1.39E-09	-1.74E-07	0.00801035	-8.8 %
1	1.221	0.39424	0.022626648	7	1.129	3.05E-07	1.65E-05	0.01846747	-7.5 %
1	1.221	0.39424	0.022626648	8	1.129	4.42E-09	2.39E-07	0.01846964	-7.5 %
1	1.221	0.39424	0.022626648	9	1.239	-1.39E-05	-7.04E-04	0.01980567	1.5 %
2	2.051	0.90159	0.035392021	12	2.116	6.20E-05	1.18E-03	0.05236271	3.2 %
3	2.93	0.96962	0.159499712	17	3.173	4.68E-04	9.39E-04	0.4984186	8.3 %
3	2.93	0.96962	0.159499712	18	3.3	2.27E-04	2.33E-04	0.97469476	12.6 %
4	3.564	-0.56792	2.629843502	19	3.516	9.53E-04	-6.47E-04	-1.4737075	-1.3 %
6	4.883	-0.89698	0.38865558	24	4.634	-7.74E-05	3.10E-04	-0.2495937	-5.1 %
6	4.883	-0.89698	0.38865558	25	5.146	3.76E-04	-6.59E-04	-0.5704902	5.4 %
7	6	0.30643	0.720203858	29	6.108	-8.88E-04	-3.66E-04	2.42755691	1.8 %
8	7.129	-0.64937	0.212420733	30	6.978	-2.31E-04	-2.16E-04	1.06701814	-2.1 %
9	12.11	-0.32046	0.320648873	47	11.796	5.07E-05	-5.61E-04	-0.0904812	-2.6 %
9	12.11	-0.32046	0.320648873	48	12.394	-3.54E-05	3.55E-05	-0.9958297	2.3 %
9	12.11	-0.32046	0.320648873	50	13.004	-7.16E-05	-2.23E-05	3.20382594	7.4 %

VEDLEGG F

Abaqus

```

***** Bybrua finite element model
*HEADING
*INCLUDE,INPUT=nodes.inp
*INCLUDE,INPUT=deck.inp
*INCLUDE,INPUT=cross_beam.inp
*INCLUDE,INPUT=cables.inp
*INCLUDE,INPUT=pylon.inp
*INCLUDE,INPUT=columns.inp
*INCLUDE,INPUT=connectors.inp
*INCLUDE,INPUT=crossbeam_mass.inp
*INCLUDE,INPUT=initial_stress.inp
**
**NSET,NSET=deck_nodes,generate
**1,70,1
*NSET,NSET=deck_nodes
20,45
**
*Nset,nset=analysis
232,46,54,58,62,66
** -----
** Load case 1
** -----
*Step,name=Step-1,nlgeom=yes
*Static
.01,1.,1e-5,1.
**** boundary conditions
*INCLUDE,INPUT=boundary_conditions.inp
**
**** Loads
*INCLUDE,INPUT=self_weight_loads.inp
*INCLUDE,INPUT=equivalent_loads.inp
**
** OUTPUT REQUESTS
*Restart,write,frequency=0
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
*Output,field,variable=PRESELECT
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
*Output,history,variable=PRESELECT
*End Step
**
** -----
** load case 2
** -----
** STEP: Step-2
**
*Step,name=Step-2,perturbation,nlgeom=yes
*Frequency,eigsolver=lanczos,normalization=mass
50,,,,,300
**
**
** OUTPUT REQUESTS
**
*Restart,write,frequency=0
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-2
**
*Output,field,variable=PRESELECT
**NODE PRINT,nset=deck_nodes
**U
*End Step
**

```

```
**
** -----
** ---- Cable elements -----
** -----
**
*ELEMENT, TYPE=t3d2, ELSET=cable_1
501,101,232
502,104,232
*ELEMENT, TYPE=t3d2, ELSET=cable_2
503,105,232
504,108,232
*ELEMENT, TYPE=t3d2, ELSET=cable_3
505,109,232
506,112,232
*ELEMENT, TYPE=t3d2, ELSET=cable_5
507,113,232
508,116,232
*ELEMENT, TYPE=t3d2, ELSET=cable_6
509,117,232
510,120,232
*ELEMENT, TYPE=t3d2, ELSET=cable_7
511,121,232
512,124,232
**
*MATERIAL, NAME=cable
*ELASTIC
165e+9, 0.3
*DENSITY
7850,
*SOLID SECTION, ELSET=cable_1, MATERIAL=cable
1.7088e-2,
*SOLID SECTION, ELSET=cable_2, MATERIAL=cable
1.7088e-2,
*SOLID SECTION, ELSET=cable_3, MATERIAL=cable
8.544e-3,
*SOLID SECTION, ELSET=cable_5, MATERIAL=cable
8.544e-3,
*SOLID SECTION, ELSET=cable_6, MATERIAL=cable
1.7088e-2,
*SOLID SECTION, ELSET=cable_7, MATERIAL=cable
1.7088e-2,
**
```

```
** -----
** ---- Column elements -----
** -----
**
**ELEMENT,TYPE=B31,ELSET=column
**columns in axis 10
301,301,302
302,302,303
303,303,304
304,304,305
**
305,306,307
306,307,308
307,308,309
308,309,310
**
**columns in axis 11
309,311,312
310,312,313
311,313,314
312,314,315
**
313,316,317
314,317,318
315,318,319
316,319,320
**
**BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, ELSET=column, POISSON=0.2, DENSITY=2500
** A, I11, I12, I22, J /n1 direction/ E, G, alpha
6.155, 1.619, 0., 6.713, 4.612
0,1,0
37.92e+9, 21e+9, 10e-6
**
```



```

**
** -----
** ---- Connector elements -----
** -----
**
*ELEMENT,TYPE=CONN3D2,ELSET=connection_pylon_deck
601,222,37
*CONNECTOR SECTION, ELSET=connection_pylon_deck
join, revolute
**join, universal
ori90xz,
*ORIENTATION, NAME=ori90xz
**Defines the local 1-direction along the join (required)
**Also defines the rotation axis for the revolute (required)
0, 0, 1, -1, 0, 0
**0, 0, 1, 0, 1, 0
**
*ELEMENT,TYPE=CONN3D2,ELSET=connection_column_deck
602,310,13
603,13,305
604,320,26
605,26,315
*CONNECTOR SECTION, ELSET=connection_column_deck
join, align
**join, universal
ori90xy,
*ORIENTATION, NAME=ori90xy
**Defines the local 1-direction along the join (required)
**Also defines the rotation axis for the align (required)
0, 1, 0, -1, 0, 0
**
*ELEMENT,TYPE=CONN3D2,ELSET=connection_decks
606,37,38
*CONNECTOR SECTION, ELSET=connection_decks
join, align
ori90x-z,
*ORIENTATION, NAME=ori90x-z
**Defines the local 1-direction along the join (required)
**Also defines the rotation axis for the align (required)
0, 0, -1, 0, 1, 0
**
*ELEMENT,TYPE=CONN3D2,ELSET=connection_crossbeam
607,102,12
608,12,103
**
609,106,14
610,14,107
**
611,110,26
612,26,111
**
613,114,46
614,46,115
**
615,118,54
616,54,119
**
617,122,62
618,62,123
**
*CONNECTOR SECTION, ELSET=connection_crossbeam
join, align
ori90xy
**
**

```

```
*ELEMENT,TYPE=CONN3D2,ELSET=connection_pylontop
619,233,232
620,232,231
**
*CONNECTOR SECTION, ELSET=connection_pylontop
join, align
ori90xy
**
```

```

**
** -----
** ---- Cross beam elements -----
** -----
** cross beams where the cables are attached to the deck
**
**
** *ELEMENT,TYPE=B31,ELSET=crossbeam_concrete10a
101,101,102
102,103,104
**
**
** *ELEMENT,TYPE=B31,ELSET=crossbeam_concrete10b
103,105,106
104,107,108
**
**
** *ELEMENT,TYPE=B31,ELSET=crossbeam_concrete11
105,109,110
106,111,112
**
**
** *BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=2500, ELSET=crossbeam_concrete10a, POISSON=0.2
** A, I11, I12, I22, J /n1 direction/ E, G, ALPHA
3.69,0.993,0.0,1.559,1.717
-1,0,0
40.151e+9, 21e+9, 10e-6
**
** *BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=2500, ELSET=crossbeam_concrete10b, POISSON=0.2
** A, I11, I12, I22, J /n1 direction/ E, G, ALPHA
3.69,1.008,0.0,1.544,1.717
-1,0,0
40.151e+9, 21e+9, 10e-6
**
** *BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=2500, ELSET=crossbeam_concrete11, POISSON=0.2
** A, I11, I12, I22, J /n1 direction/ E, G, ALPHA
3.69,1.414,0.0,1.139,1.717
-1,0,0
40.151e+9, 21e+9, 10e-6
**
**
**
** *ELEMENT,TYPE=B31,ELSET=crossbeam_steel_1
113,113,114
114,115,116
**
**
** *ELEMENT,TYPE=B31,ELSET=crossbeam_steel_2
115,117,118
116,119,120
**
**
** *ELEMENT,TYPE=B31,ELSET=crossbeam_steel_3
117,121,122
118,123,124
**
**
** *BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=crossbeam_steel_1, POISSON=0.3
** A, I11, I12, I22, J,,Cw /n1 direction/ E, G, ALPHA
0.154,0.303,0.0,0.276,3.653e-05,,0.027
-1,0,0
210e+9, 80.7e+9, 10e-6
**
** *BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=crossbeam_steel_2, POISSON=0.3
** A, I11, I12, I22, J,,Cw /n1 direction/ E, G, ALPHA
0.154,0.127,0.0,0.452,3.653e-05,,0.027

```

```
-1,0,0
210e+9, 80.7e+9, 10e-6
**
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=crossbeam_steel_3, POISSON=0.3
** A, I11, I12, I22, J,,Cw /n1 direction/ E, G, ALPHA
0.154,0.062,0.0,0.517,3.653e-05,,0.027
-1,0,0
210e+9, 80.7e+9, 10e-6
**
```

```
**
** -----
** ---- Lumped mass 'core' cross beam -----
** -----
**
** *ELEMENT, TYPE=MASS, ELSET=mass_concrete_crossbeam
901,12
902,14
903,26
** *MASS, ELSET=mass_concrete_crossbeam
9.686e+4
**
** *ELEMENT, TYPE=MASS, ELSET=mass_steel_crossbeam
904,46
905,54
906,62
** *MASS, ELSET=mass_steel_crossbeam
1.052e+4
**
```

```
**
** -----
** ---- BEAM deck elements -----
** -----
**
*ELEMENT,TYPE=B31,ELSET=deck_concrete
1,1,2
2,2,3
3,3,4
4,4,5
5,5,6
6,6,7
7,7,8
8,8,9
9,9,10
10,10,11
11,11,12
12,12,13
13,13,14
14,14,15
15,15,16
16,16,17
17,17,18
18,18,19
19,19,20
20,20,21
21,21,22
22,22,23
23,23,24
24,24,25
25,25,26
26,26,27
27,27,28
28,28,29
29,29,30
30,30,31
31,31,32
32,32,33
33,33,34
34,34,35
35,35,36
36,36,37
**
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=2719.3, ELSET=deck_concrete, POISSON=0.2
** A, I11, I12, I22, J / n1 direction / E, G, ALPHA
8.2075, 7.4778, 0., 126.2103, 360.6537
0,1,0
37.92e+9, 21e+9, 10e-6
**
*ELEMENT,TYPE=B31,ELSET=deck_steel
51,38,39
52,39,40
53,40,41
54,41,42
55,42,43
56,43,44
57,44,45
58,45,46
59,46,47
60,47,48
61,48,49
62,49,50
63,50,51
64,51,52
65,52,53
```

66,53,54
67,54,55
68,55,56
69,56,57
70,57,58
71,58,59
72,59,60
73,60,61
74,61,62
75,62,63
76,63,64
77,64,65
78,65,66
79,66,67
80,67,68
81,68,69
82,69,70

**

*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=13443, ELSET=deck_steel, POISSON=0.3

** A, I11, I12, I22, J / n1 direction / E, G, ALPHA

0.5633, 0.6111, 0., 8.1053, 0.8255

0,1,0

210e+9, 80.7e+9, 10e-6

**

```

**
** -----
** ---- Equivalent loads from prestressed concrete -----
** -----
**
**Line loads from main prestressing cables
*ELSET, ELSET=q1
1,2,3,4
**
*ELSET, ELSET=q2
5,6,7,8
**
*ELSET, ELSET=q3
9,10,11,12
**
*ELSET, ELSET=q4
13,14,15
**
*ELSET, ELSET=q5
16,17,18,19,20,21,22,23
**
*ELSET, ELSET=q6
24,25
**
*ELSET, ELSET=q7
26,27
**
*ELSET, ELSET=q8
28,29,30,31,32
**
*ELSET, ELSET=q9
33,34,35,36
**
*Dload
q1, PZ, 149.609e3
q2, PZ, 169.661e3
q3, PZ, -263.917e3
q4, PZ, -275.914e3
q5, PZ, 205.092e3
q6, PZ, -296.244e3
q7, PZ, -283.364e3
q8, PZ, 169.661e3
q9, PZ, 149.609e3
**
**
**Axial forces, primary cable
*Cload
1, 1, 1.3979e7
**
16, 1, -1.3979e7
**
16, 1, 1.5009e7
**
28, 1, -1.5009e7
**
28, 1, 1.3979e7
**
37, 1, -1.3979e7
**
**
**Vertical forces, primary cable
*Cload
1, 3, -2.2437e6
**
16, 3, 2.589e6

```



```
**
16, 3, -2.7797e6
**
28, 3, 2.8473e6
**
28, 3, -2.6519e6
**
37, 3, -2.2437e6
**
**
**Axial forces, straight cables
*Clload
**M10
3, 1, 3.7769e6
10, 1, -3.7769e6
**
**M11
9, 1, 6.2784e6
16, 1, -6.2784e6
**
**M12
24, 1, 3.6297e6
28, 1, -3.6297e6
**
**M13
29, 1, 1.5696e6
35, 1, -1.5696e6
**
**Moment loads from straight cables
*Clload
**M10
3, 5, -4.547e6
10, 5, 4.547e6
**
**M11
9, 5, 4.709e6
16, 5, -4.709e6
**
**M12
24, 5, 2.722e6
28, 5, -2.722e6
**
**M13
29, 5, -1.89e6
35, 5, 1.89e6
**
```

```
**Initial stress in the cables
*Initial Conditions, type=STRESS
501, 310.2158e+6, 0., 0.,
502, 310.2158e+6, 0., 0.,
**
503, 313.2259e+6, 0., 0.,
504, 313.2259e+6, 0., 0.,
**
505, 862.9947e+6, 0., 0.,
506, 862.9947e+6, 0., 0.,
**
507, 271.6491e+6, 0., 0.,
508, 271.6491e+6, 0., 0.,
**
509, 200.4405e+6, 0., 0.,
510, 200.4405e+6, 0., 0.,
**
511, 441.8283e+6, 0., 0.,
512, 441.8283e+6, 0., 0.,
**
```

*NODE,NSET=ALL

** deck nodes

**Origin (0,0,0) is placed in the deck node in axis 9 of the bridge

1	,	0	,	0	,	0
2	,	3.75	,	0	,	0.1001625
3	,	7.5	,	0	,	0.200325
4	,	11.25	,	0	,	0.3004875
5	,	15	,	0	,	0.40065
6	,	18.5	,	0	,	0.494135
7	,	22	,	0	,	0.58762
8	,	25.5	,	0	,	0.681105
9	,	29	,	0	,	0.77459
10	,	30	,	0	,	0.8013
11	,	33.3	,	0	,	0.889443
12	,	36.6	,	0	,	0.977586
13	,	38	,	0	,	1.01498
14	,	39.6	,	0	,	1.057716
15	,	43.3	,	0	,	1.156543
16	,	47	,	0	,	1.25537
17	,	50.25	,	0	,	1.3421775
18	,	53.5	,	0	,	1.428985
19	,	56.75	,	0	,	1.5157925
20	,	60	,	0	,	1.6026
21	,	63.25	,	0	,	1.6894075
22	,	66.5	,	0	,	1.77592565
23	,	69.75	,	0	,	1.860840881
24	,	73	,	0	,	1.943994618
25	,	77.5	,	0	,	2.056222529
26	,	82	,	0	,	2.165073374
27	,	86	,	0	,	2.258994611
28	,	90	,	0	,	2.350247547
29	,	90.5	,	0	,	2.36146655
30	,	94.125	,	0	,	2.441557459
31	,	97.75	,	0	,	2.519456922
32	,	101.375	,	0	,	2.595164939
33	,	105	,	0	,	2.66868151
34	,	108.75	,	0	,	2.742427037
35	,	112.5	,	0	,	2.813827377
36	,	116.25	,	0	,	2.882882532
37	,	120	,	0	,	2.949592501
38	,	120	,	0	,	2.945592501
39	,	125	,	0	,	3.030891059
40	,	130	,	0	,	3.112020398
41	,	135	,	0	,	3.188980518
42	,	140	,	0	,	3.261771419
43	,	145	,	0	,	3.3303931
44	,	150	,	0	,	3.394845563
45	,	155	,	0	,	3.455128806
46	,	159	,	0	,	3.500353563
47	,	164.5	,	0	,	3.558180769
48	,	170	,	0	,	3.61096322
49	,	175.5	,	0	,	3.658700916
50	,	181	,	0	,	3.701393856
51	,	186.5	,	0	,	3.739042042
52	,	192	,	0	,	3.771645472
53	,	197.5	,	0	,	3.799204147
54	,	203	,	0	,	3.821718067
55	,	209.125	,	0	,	3.840853158
56	,	215.25	,	0	,	3.853731814
57	,	221.375	,	0	,	3.860354036
58	,	227.5	,	0	,	3.860719823
59	,	233.625	,	0	,	3.854829176
60	,	239.75	,	0	,	3.842682094
61	,	245.875	,	0	,	3.824278577
62	,	252	,	0	,	3.799618626

63 , 258.625 , 0 , 3.765902243
64 , 265.25 , 0 , 3.724866275
65 , 271.875 , 0 , 3.676510721
66 , 278.5 , 0 , 3.620835581
67 , 285.125 , 0 , 3.55818075
68 , 291.75 , 0 , 3.493852
69 , 298.375 , 0 , 3.42952325
70 , 305 , 0 , 3.3651945

**

** cross beam nodes (where they are attached to the deck)

**the cross beams are 8.35m (steel) and 9,00m (concrete) from bridge deck to cable anchoring

101,36.6,-9.00,0.9776

102,36.6,-5.25,0.9776

103,36.6,5.25,0.9776

104,36.6,9.00,0.9776

**

105,39.6,-9.00,1.0577

106,39.6,-5.25,1.0577

107,39.6,5.25,1.0577

108,39.6,9.00,1.0577

**

109,82,-9.00,2.1651

110,82,-5.25,2.1651

111,82,5.25,2.1651

112,82,9.00,2.1651

**

113,159,-8.35,3.5004

114,159,-4.35,3.5004

115,159,4.35,3.5004

116,159,8.35,3.5004

**

117,203,-8.35,3.8217

118,203,-4.35,3.8217

119,203,4.35,3.8217

120,203,8.35,3.8217

**

121,252,-8.35,3.7996

122,252,-4.35,3.7996

123,252,4.35,3.7996

124,252,8.35,3.7996

**

** pylon nodes

**node 222 is the cable anchoring node

201,120,13.375,-22.1727

202,120,12.8054,-18.6727

203,120,11.3652,-9.8227

204,120,9.925,-0.9727

205,120,7.665,12.9148

206,120,5.405,26.8023

207,120,3.145,40.6898

208,120,0.885,54.5773

**

209,120,-13.375,-22.1727

210,120,-12.8054,-18.6727

211,120,-11.3652,-9.8227

212,120,-9.925,-0.9727

213,120,-7.665,12.9148

214,120,-5.405,26.8023

215,120,-3.145,40.6898

216,120,-0.885,54.5773

**

**tower cross beam nodes

221,120,4.9625,-0.9727

222,120,0,-0.9727

223,120,-4.9625,-0.9727

```
**
**tower top nodes
231,120,1.5563,50.4523
232,120,0,50.4523
233,120,-1.5563,50.4523
**
**column nodes
**columns in axis 10
301,38,3.3,-22.1727
302,38,3.3,-16.3758
303,38,3.3,-10.5788
304,38,3.3,-4.7819
305,38,3.3,1.0150
306,38,-3.3,-22.1727
307,38,-3.3,-16.3758
308,38,-3.3,-10.5788
309,38,-3.3,-4.7819
310,38,-3.3,1.0150
**
**columns in axis 11
311,82,3.3,-22.1727
312,82,3.3,-16.0882
313,82,3.3,-10.0038
314,82,3.3,-3.9193
315,82,3.3,2.1651
316,82,-3.3,-22.1727
317,82,-3.3,-16.0882
318,82,-3.3,-10.0038
319,82,-3.3,-3.9193
320,82,-3.3,2.1651
**
**
```

```

** -----
** ---- BEAM pylon elements -----
** -----
**
*ELEMENT,TYPE=B31,ELSET=pylon1
201,201,202
202,209,210
**
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, ELSET=pylon1, POISSON=0.2, DENSITY=2500
** A, I11, I12, I22, J /n1 direction/ E, G, alpha
9, 12, 0., 3.797, 9.85
0,1,0
40.151e+9, 21e+9, 10e-6
**
**
**
*ELEMENT,TYPE=B31,ELSET=pylon2
203,202,203
204,210,211
**
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, ELSET=pylon2, POISSON=0.2, DENSITY=2500
** A, I11, I12, I22, J /n1 direction/ E, G, alpha
5.934, 9.369, 0., 3.437, 7.174
0,1,0
40.151e+9, 21e+9, 10e-6
**
**
**
*ELEMENT,TYPE=B31,ELSET=pylon3
205,203,204
206,211,212
**
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, ELSET=pylon3, POISSON=0.2, DENSITY=2500
** A, I11, I12, I22, J /n1 direction/ E, G, alpha
5.796, 8.625, 0., 3.339, 6.84
0,1,0
40.151e+9, 21e+9, 10e-6
**
**
**
*ELEMENT,TYPE=B31,ELSET=pylon4
207,204,205
208,212,213
**
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, ELSET=pylon4, POISSON=0.2, DENSITY=2500
** A, I11, I12, I22, J /n1 direction/ E, G, alpha
5.62, 7.734, 0., 3.214, 6.419
0,1,0
40.151e+9, 21e+9, 10e-6
**
**
**
*ELEMENT,TYPE=B31,ELSET=pylon5
209,205,206
210,213,214
**
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, ELSET=pylon5, POISSON=0.2, DENSITY=2500
** A, I11, I12, I22, J /n1 direction/ E, G, alpha
5.4, 6.704, 0., 3.058, 5.898
0,1,0
40.151e+9, 21e+9, 10e-6
**
**
**
*ELEMENT,TYPE=B31,ELSET=pylon6

```

211,206,207

212,214,215

**

*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, ELSET=pylon6, POISSON=0.2, DENSITY=2500

** A, I11, I12, I22, J /n1 direction/ E, G, alpha

5.182, 5.772, 0., 2.903, 5.387

0,1,0

40.151e+9, 21e+9, 10e-6

**

**

**

*ELEMENT,TYPE=B31,ELSET=pylon7

213,207,231

214,231,208

215,215,233

216,233,216

**

*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, ELSET=pylon7, POISSON=0.2, DENSITY=2500

** A, I11, I12, I22, J /n1 direction/ E, G, alpha

4.992, 5.03, 0., 2.768, 4.948

0,1,0

40.151e+9, 21e+9, 10e-6

**

**

**PYLON CROSS BEAM ELEMENTS

**

*ELEMENT,TYPE=B31,ELSET=pylon_crossbeam

220,212,223

221,223,222

222,222,221

223,221,204

**

*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, ELSET=pylon_crossbeam, POISSON=0.2, DENSITY=2500

** A, I11, I12, I22, J /n1 direction/ E, G, alpha

7.548, 20.039, 0., 5.753, 13.193

-1,0,0

40.151e+9, 21e+9, 10e-6

**

**

```
**
** -----
** ---- Self weight loads -----
** -----
**
**Gravity load (self weight of all elements)
*Dload
, GRAV, 9.81, 0., 0., -1.
**
```



```
**
** -----
** ---- Cable beam elements -----
** -----
**
**ELEMENT, TYPE=B31, ELSET=cable_11
701,101,401
702,401,402
703,402,403
704,403,404
705,404,405
706,405,406
707,406,407
708,407,408
709,408,409
710,409,232
**
**ELEMENT, TYPE=B31, ELSET=cable_12
711,104,410
712,410,411
713,411,412
714,412,413
715,413,414
716,414,415
717,415,416
718,416,417
719,417,418
720,418,232
**
**ELEMENT, TYPE=B31, ELSET=cable_21
721,105,419
722,419,420
723,420,421
724,421,422
725,422,423
726,423,424
727,424,425
728,425,426
729,426,427
730,427,232
**
**ELEMENT, TYPE=B31, ELSET=cable_22
731,108,428
732,428,429
733,429,430
734,430,431
735,431,432
736,432,433
737,433,434
738,434,435
739,435,436
740,436,232
**
**ELEMENT, TYPE=B31, ELSET=cable_31
741,109,437
742,437,438
743,438,439
744,439,440
745,440,441
746,441,442
747,442,443
748,443,444
749,444,445
750,445,232
**
```

*ELEMENT, TYPE=B31, ELSET=cable_32

751,112,446

752,446,447

753,447,448

754,448,449

755,449,450

756,450,451

757,451,452

758,452,453

759,453,454

760,454,232

**

*ELEMENT, TYPE=B31, ELSET=cable_51

761,113,455

762,455,456

763,456,457

764,457,458

765,458,459

766,459,460

767,460,461

768,461,462

769,462,463

770,463,232

**

*ELEMENT, TYPE=B31, ELSET=cable_52

771,116,464

772,464,465

773,465,466

774,466,467

775,467,468

776,468,469

777,469,470

778,470,471

779,471,472

780,472,232

**

*ELEMENT, TYPE=B31, ELSET=cable_61

781,117,473

782,473,474

783,474,475

784,475,476

785,476,477

786,477,478

787,478,479

788,479,480

789,480,481

790,481,232

**

*ELEMENT, TYPE=B31, ELSET=cable_62

791,120,482

792,482,483

793,483,484

794,484,485

795,485,486

796,486,487

797,487,488

798,488,489

799,489,490

800,490,232

**

*ELEMENT, TYPE=B31, ELSET=cable_71

801,121,491

802,491,492

803,492,493

804,493,494

805,494,495
806,495,496
807,496,497
808,497,498
809,498,499
810,499,232

**

*ELEMENT, TYPE=B31, ELSET=cable_72

811,124,500
812,500,501
813,501,502
814,502,503
815,503,504
816,504,505
817,505,506
818,506,507
819,507,508
820,508,232

**

*MATERIAL, NAME=cable

*ELASTIC

165e+9, 0.3

*DENSITY

7850,

*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=cable_11, POISSON=0.3

** A, I11, I12, I22, J / n1 direction / E, G, ALPHA

1.7088e-2, 1.1618e-6, 0., 1.1618e-6, 2.3237e-6

-0.1073,0.9942,0

165e+9, 80.7e+9, 10e-6

**

*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=cable_12, POISSON=0.3

** A, I11, I12, I22, J / n1 direction / E, G, ALPHA

1.7088e-2, 1.1618e-6, 0., 1.1618e-6, 2.3237e-6

0.1073,0.9942,0

165e+9, 80.7e+9, 10e-6

**

*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=cable_21, POISSON=0.3

** A, I11, I12, I22, J / n1 direction / E, G, ALPHA

1.7088e-2, 1.1618e-6, 0., 1.1618e-6, 2.3237e-6

-0.1112,0.9938,0

165e+9, 80.7e+9, 10e-6

**

*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=cable_22, POISSON=0.3

** A, I11, I12, I22, J / n1 direction / E, G, ALPHA

1.7088e-2, 1.1618e-6, 0., 1.1618e-6, 2.3237e-6

0.1112,0.9938,0

165e+9, 80.7e+9, 10e-6

**

*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=cable_31, POISSON=0.3

** A, I11, I12, I22, J / n1 direction / E, G, ALPHA

8.544e-3, 2.9046e-7, 0., 2.9046e-7, 5.8092e-7

-0.2305,0.9731,0

165e+9, 80.7e+9, 10e-6

**

*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=cable_32, POISSON=0.3

** A, I11, I12, I22, J / n1 direction / E, G, ALPHA

8.544e-3, 2.9046e-7, 0., 2.9046e-7, 5.8092e-7

0.2305,0.9731,0

165e+9, 80.7e+9, 10e-6

**

*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=cable_51, POISSON=0.3

** A, I11, I12, I22, J / n1 direction / E, G, ALPHA

8.544e-3, 2.9046e-7, 0., 2.9046e-7, 5.8092e-7

-0.2094,-0.9778,0

165e+9, 80.7e+9, 10e-6

```
**
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=cable_52, POISSON=0.3
** A, I11, I12, I22, J / n1 direction / E, G, ALPHA
8.544e-3, 2.9046e-7, 0., 2.9046e-7, 5.8092e-7
0.2094, -0.9778, 0
165e+9, 80.7e+9, 10e-6
**
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=cable_61, POISSON=0.3
** A, I11, I12, I22, J / n1 direction / E, G, ALPHA
1.7088e-2, 1.1618e-6, 0., 1.1618e-6, 2.3237e-6
-0.1001, -0.995, 0
165e+9, 80.7e+9, 10e-6
**
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=cable_62, POISSON=0.3
** A, I11, I12, I22, J / n1 direction / E, G, ALPHA
1.7088e-2, 1.1618e-6, 0., 1.1618e-6, 2.3237e-6
0.1001, -0.995, 0
165e+9, 80.7e+9, 10e-6
**
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=cable_71, POISSON=0.3
** A, I11, I12, I22, J / n1 direction / E, G, ALPHA
1.7088e-2, 1.1618e-6, 0., 1.1618e-6, 2.3237e-6
-0.0631, -0.998, 0
165e+9, 80.7e+9, 10e-6
**
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=cable_72, POISSON=0.3
** A, I11, I12, I22, J / n1 direction / E, G, ALPHA
1.7088e-2, 1.1618e-6, 0., 1.1618e-6, 2.3237e-6
0.0631, -0.998, 0
165e+9, 80.7e+9, 10e-6
**
```

```
**Initial stress in the cables (axial force)
*Initial Conditions, type=STRESS
**
cable_11, 5.301e+6, 0., 0.,
cable_12, 5.301e+6, 0., 0.,
**
cable_21, 5.3524e+6, 0., 0.,
cable_22, 5.3524e+6, 0., 0.,
**
cable_31, 7.3734e+6, 0., 0.,
cable_32, 7.3734e+6, 0., 0.,
**
cable_51, 2.321e+6, 0., 0.,
cable_52, 2.321e+6, 0., 0.,
**
cable_61, 3.4251e+6, 0., 0.,
cable_62, 3.4251e+6, 0., 0.,
**
cable_71, 7.55e+6, 0., 0.,
cable_72, 7.55e+6, 0., 0.,
**
```

```
PROCESSING PART, INSTANCE, AND ASSEMBLY INFORMATION
*****
```

```
END PROCESSING PART, INSTANCE, AND ASSEMBLY INFORMATION
*****
```

```
*Initial Conditions, type=STRESS
```

```
OPTIONS BEING PROCESSED
*****
```

```
*HEADING
```

```
*INCLUDE,INPUT=nodes.inp
```

```
*** INPUT DATA IS READ FROM FILE
nodes.inp
```

```
*NODE,NSET=ALL
```

```
*INCLUDE,INPUT=deck.inp
```

```
*** INPUT DATA IS READ FROM FILE
deck.inp
```

```
*ELEMENT,TYPE=B31,ELSET=deck_concrete
```

```
*ELEMENT,TYPE=B31,ELSET=deck_steel
```

```
*INCLUDE,INPUT=cross_beam.inp
```

```
*** INPUT DATA IS READ FROM FILE
cross_beam.inp
```

```
*ELEMENT,TYPE=B31,ELSET=crossbeam_concrete10a
```

```
*ELEMENT,TYPE=B31,ELSET=crossbeam_concrete10b
```

```
*ELEMENT,TYPE=B31,ELSET=crossbeam_concrete11
```

```
*ELEMENT,TYPE=B31,ELSET=crossbeam_steel_1
```

```
*ELEMENT,TYPE=B31,ELSET=crossbeam_steel_2
```

```
*ELEMENT,TYPE=B31,ELSET=crossbeam_steel_3
```

```
*INCLUDE,INPUT=cables.inp
```

```
*** INPUT DATA IS READ FROM FILE
cables.inp
```

```
*ELEMENT, TYPE=t3d2, ELSET=cable_1
```

```
*ELEMENT, TYPE=t3d2, ELSET=cable_2
```

```
*ELEMENT, TYPE=t3d2, ELSET=cable_3
```

```
*ELEMENT, TYPE=t3d2, ELSET=cable_5
```

```
*ELEMENT, TYPE=t3d2, ELSET=cable_6
```

*ELEMENT, TYPE=t3d2, ELSET=cable_7
*INCLUDE, INPUT=pylon.inp

*** INPUT DATA IS READ FROM FILE
pylon.inp

*ELEMENT, TYPE=B31, ELSET=pylon1
*ELEMENT, TYPE=B31, ELSET=pylon2
*ELEMENT, TYPE=B31, ELSET=pylon3
*ELEMENT, TYPE=B31, ELSET=pylon4
*ELEMENT, TYPE=B31, ELSET=pylon5
*ELEMENT, TYPE=B31, ELSET=pylon6
*ELEMENT, TYPE=B31, ELSET=pylon7
*ELEMENT, TYPE=B31, ELSET=pylon_crossbeam
*INCLUDE, INPUT=columns.inp

*** INPUT DATA IS READ FROM FILE
columns.inp

*ELEMENT, TYPE=B31, ELSET=column
*INCLUDE, INPUT=connectors.inp

*** INPUT DATA IS READ FROM FILE
connectors.inp

*ELEMENT, TYPE=CONN3D2, ELSET=connection_pylon_deck
*ELEMENT, TYPE=CONN3D2, ELSET=connection_column_deck
*ELEMENT, TYPE=CONN3D2, ELSET=connection_decks
*ELEMENT, TYPE=CONN3D2, ELSET=connection_crossbeam
*ELEMENT, TYPE=CONN3D2, ELSET=connection_pylontop
*INCLUDE, INPUT=crossbeam_mass.inp

*** INPUT DATA IS READ FROM FILE
crossbeam_mass.inp

*ELEMENT, TYPE=MASS, ELSET=mass_concrete_crossbeam
*ELEMENT, TYPE=MASS, ELSET=mass_steel_crossbeam
*INCLUDE, INPUT=initial_stress.inp

*** INPUT DATA IS READ FROM FILE
initial_stress.inp

*NSET, NSET=deck_nodes
*Nset, nset=analysis
*INCLUDE, INPUT=boundary_conditions.inp

*** INPUT DATA IS READ FROM FILE
boundary_conditions.inp

*INCLUDE, INPUT=self_weight_loads.inp

*** INPUT DATA IS READ FROM FILE
self_weight_loads.inp

*INCLUDE, INPUT=equivalent_loads.inp

*** INPUT DATA IS READ FROM FILE
equivalent_loads.inp

*ELSET, ELSET=q1
*ELSET, ELSET=q2
*ELSET, ELSET=q3
*ELSET, ELSET=q4
*ELSET, ELSET=q5
*ELSET, ELSET=q6
*ELSET, ELSET=q7
*ELSET, ELSET=q8
*ELSET, ELSET=q9
*MATERIAL, NAME=cable
*ELASTIC
*DENSITY
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=2719.3, ELSET=deck_concrete, POISSON=0.2
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=13443, ELSET=deck_steel, POISSON=0.3
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=2500, ELSET=crossbeam_concrete10a, POISSON=0.2
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=2500, ELSET=crossbeam_concrete10b, POISSON=0.2
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=2500, ELSET=crossbeam_concrete11, POISSON=0.2
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=crossbeam_steel_1, POISSON=0.3
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=crossbeam_steel_2, POISSON=0.3
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=crossbeam_steel_3, POISSON=0.3
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, ELSET=pylon1, POISSON=0.2, DENSITY=2500
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, ELSET=pylon2, POISSON=0.2, DENSITY=2500
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, ELSET=pylon3, POISSON=0.2, DENSITY=2500
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, ELSET=pylon4, POISSON=0.2, DENSITY=2500
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, ELSET=pylon5, POISSON=0.2, DENSITY=2500
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, ELSET=pylon6, POISSON=0.2, DENSITY=2500
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, ELSET=pylon7, POISSON=0.2, DENSITY=2500
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, ELSET=pylon_crossbeam, POISSON=0.2, DENSITY=2500
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, ELSET=column, POISSON=0.2, DENSITY=2500
*MASS, ELSET=mass_concrete_crossbeam
*MASS, ELSET=mass_steel_crossbeam
*Initial Conditions, type=STRESS
*CONNECTOR SECTION, ELSET=connection_pylon_deck
*CONNECTOR SECTION, ELSET=connection_column_deck
*CONNECTOR SECTION, ELSET=connection_decks
*CONNECTOR SECTION, ELSET=connection_crossbeam
*CONNECTOR SECTION, ELSET=connection_pylontop
*ORIENTATION, NAME=ori90xz

***WARNING: LOCAL DIRECTION ABOUT WHICH THE ADDITIONAL ROTATION IS GIVEN HAS NOT BEEN SPECIFIED. THE LOCAL 1 DIRECTION WITH NO ADDITIONAL ROTATION HAS BEEN CHOSEN AS THE DEFAULT. THE TANGENTIAL DIRECTIONS ON A SURFACE, THE MATERIAL AXES IN THE SHELL, MEMBRANE, OR BEHAVIOR DIRECTIONS IN A GASKET MID-SURFACE ARE THE LOCAL 2 AND 3 DIRECTIONS.

*ORIENTATION, NAME=ori90xy

***WARNING: LOCAL DIRECTION ABOUT WHICH THE ADDITIONAL ROTATION IS GIVEN HAS NOT BEEN SPECIFIED. THE LOCAL 1 DIRECTION WITH NO ADDITIONAL ROTATION HAS BEEN CHOSEN AS THE DEFAULT. THE TANGENTIAL DIRECTIONS ON A SURFACE, THE MATERIAL AXES IN THE SHELL, MEMBRANE, OR BEHAVIOR DIRECTIONS IN A GASKET MID-SURFACE ARE THE LOCAL 2 AND 3 DIRECTIONS.

*ORIENTATION, NAME=ori90x-z

***WARNING: LOCAL DIRECTION ABOUT WHICH THE ADDITIONAL ROTATION IS GIVEN HAS NOT BEEN SPECIFIED. THE LOCAL 1 DIRECTION WITH NO ADDITIONAL ROTATION HAS BEEN CHOSEN AS THE DEFAULT. THE TANGENTIAL DIRECTIONS ON A SURFACE, THE MATERIAL AXES IN THE SHELL, MEMBRANE, OR BEHAVIOR DIRECTIONS IN A GASKET MID-SURFACE ARE THE LOCAL 2 AND 3 DIRECTIONS.

*SOLID SECTION, ELSET=cable_1, MATERIAL=cable
*SOLID SECTION, ELSET=cable_2, MATERIAL=cable
*SOLID SECTION, ELSET=cable_3, MATERIAL=cable
*SOLID SECTION, ELSET=cable_5, MATERIAL=cable
*SOLID SECTION, ELSET=cable_6, MATERIAL=cable
*SOLID SECTION, ELSET=cable_7, MATERIAL=cable
*SOLID SECTION, ELSET=cable_1, MATERIAL=cable

***WARNING: FOR TWO-DIMENSIONAL MODELS, IF A NON-UNITY THICKNESS IS SPECIFIED FOR TWO-DIMENSIONAL SOLID ELEMENTS AND THESE ELEMENTS ARE INVOLVED IN AN INTERACTION SUCH AS CONTACT, THE SAME THICKNESS SHOULD BE SPECIFIED FOR THE OUT-OF-PLANE THICKNESS OF THE CORRESPONDING SURFACE UNDER *SURFACE INTERACTION.

*SOLID SECTION, ELSET=cable_2, MATERIAL=cable
*SOLID SECTION, ELSET=cable_3, MATERIAL=cable
*SOLID SECTION, ELSET=cable_5, MATERIAL=cable
*SOLID SECTION, ELSET=cable_6, MATERIAL=cable
*SOLID SECTION, ELSET=cable_7, MATERIAL=cable
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=2719.3, ELSET=deck_concrete, POISSON=0.2
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=13443, ELSET=deck_steel, POISSON=0.3
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=2500, ELSET=crossbeam_concrete10a, POISSON=0.2
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=2500, ELSET=crossbeam_concrete10b, POISSON=0.2
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=2500, ELSET=crossbeam_concrete11, POISSON=0.2
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=crossbeam_steel_1, POISSON=0.3
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=crossbeam_steel_2, POISSON=0.3
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=crossbeam_steel_3, POISSON=0.3
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, ELSET=pylon1, POISSON=0.2, DENSITY=2500
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, ELSET=pylon2, POISSON=0.2, DENSITY=2500
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, ELSET=pylon3, POISSON=0.2, DENSITY=2500
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, ELSET=pylon4, POISSON=0.2, DENSITY=2500
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, ELSET=pylon5, POISSON=0.2, DENSITY=2500
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, ELSET=pylon6, POISSON=0.2, DENSITY=2500
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, ELSET=pylon7, POISSON=0.2, DENSITY=2500
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, ELSET=pylon_crossbeam, POISSON=0.2, DENSITY=2500
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, ELSET=column, POISSON=0.2, DENSITY=2500
*MASS, ELSET=mass_concrete_crossbeam
*MASS, ELSET=mass_steel_crossbeam
*Initial Conditions, type=STRESS
*CONNECTOR SECTION, ELSET=connection_pylon_deck
*CONNECTOR SECTION, ELSET=connection_column_deck
*CONNECTOR SECTION, ELSET=connection_decks
*CONNECTOR SECTION, ELSET=connection_crossbeam
*CONNECTOR SECTION, ELSET=connection_pylontop
*BOUNDARY
*BOUNDARY
*BOUNDARY
*BOUNDARY
*BOUNDARY
*BOUNDARY
*CONNECTOR SECTION, ELSET=connection_pylon_deck
*CONNECTOR SECTION, ELSET=connection_column_deck
*CONNECTOR SECTION, ELSET=connection_decks
*CONNECTOR SECTION, ELSET=connection_crossbeam
*CONNECTOR SECTION, ELSET=connection_pylontop
*Output, field, variable=PRESELECT
*Output, history, variable=PRESELECT
*Output, field, variable=PRESELECT
*Initial Conditions, type=STRESS
*Output, field, variable=PRESELECT

```
*Output, history, variable=PRESELECT
*Output, field, variable=PRESELECT
*Initial Conditions, type=STRESS
*Initial Conditions, type=STRESS
*Output, field, variable=PRESELECT
*Output, history, variable=PRESELECT
*Output, field, variable=PRESELECT
*Step, name=Step-1, nlgeom=yes
*Output, field, variable=PRESELECT
*Output, history, variable=PRESELECT
*Step, name=Step-2, perturbation, nlgeom=yes
*Frequency, eigensolver=lanczos, normalization=mass
*Output, field, variable=PRESELECT
*Step, name=Step-1, nlgeom=yes
*Step, name=Step-2, perturbation, nlgeom=yes
*Step, name=Step-1, nlgeom=yes
*Static
*BOUNDARY
*BOUNDARY
*BOUNDARY
*Dload
```

***WARNING: ELEMENT 601 IS A CONNECTOR ELEMENT AND CANNOT BE ASSOCIATED WITH LOAD TYPE GRAV. THIS WILL BE IGNORED

***WARNING: ELEMENT 602 IS A CONNECTOR ELEMENT AND CANNOT BE ASSOCIATED WITH LOAD TYPE GRAV. THIS WILL BE IGNORED

***WARNING: ELEMENT 603 IS A CONNECTOR ELEMENT AND CANNOT BE ASSOCIATED WITH LOAD TYPE GRAV. THIS WILL BE IGNORED

***WARNING: ELEMENT 604 IS A CONNECTOR ELEMENT AND CANNOT BE ASSOCIATED WITH LOAD TYPE GRAV. THIS WILL BE IGNORED

***WARNING: ELEMENT 605 IS A CONNECTOR ELEMENT AND CANNOT BE ASSOCIATED WITH LOAD TYPE GRAV. THIS WILL BE IGNORED

***WARNING: ELEMENT 606 IS A CONNECTOR ELEMENT AND CANNOT BE ASSOCIATED WITH LOAD TYPE GRAV. THIS WILL BE IGNORED

***WARNING: ELEMENT 607 IS A CONNECTOR ELEMENT AND CANNOT BE ASSOCIATED WITH LOAD TYPE GRAV. THIS WILL BE IGNORED

***WARNING: ELEMENT 608 IS A CONNECTOR ELEMENT AND CANNOT BE ASSOCIATED WITH LOAD TYPE GRAV. THIS WILL BE IGNORED

***WARNING: ELEMENT 609 IS A CONNECTOR ELEMENT AND CANNOT BE ASSOCIATED WITH LOAD TYPE GRAV. THIS WILL BE IGNORED

***WARNING: ELEMENT 610 IS A CONNECTOR ELEMENT AND CANNOT BE ASSOCIATED WITH LOAD TYPE GRAV. THIS WILL BE IGNORED

***WARNING: ELEMENT 611 IS A CONNECTOR ELEMENT AND CANNOT BE ASSOCIATED WITH LOAD TYPE GRAV. THIS WILL BE IGNORED

***WARNING: ELEMENT 612 IS A CONNECTOR ELEMENT AND CANNOT BE ASSOCIATED WITH LOAD TYPE GRAV. THIS WILL BE IGNORED

***WARNING: ELEMENT 613 IS A CONNECTOR ELEMENT AND CANNOT BE ASSOCIATED WITH LOAD TYPE GRAV. THIS WILL BE IGNORED

***WARNING: ELEMENT 614 IS A CONNECTOR ELEMENT AND CANNOT BE ASSOCIATED WITH LOAD TYPE GRAV. THIS WILL BE IGNORED

***WARNING: ELEMENT 615 IS A CONNECTOR ELEMENT AND CANNOT BE ASSOCIATED WITH

LOAD TYPE GRAV. THIS WILL BE IGNORED

***WARNING: ELEMENT 616 IS A CONNECTOR ELEMENT AND CANNOT BE ASSOCIATED WITH
LOAD TYPE GRAV. THIS WILL BE IGNORED

***WARNING: ELEMENT 617 IS A CONNECTOR ELEMENT AND CANNOT BE ASSOCIATED WITH
LOAD TYPE GRAV. THIS WILL BE IGNORED

***WARNING: ELEMENT 618 IS A CONNECTOR ELEMENT AND CANNOT BE ASSOCIATED WITH
LOAD TYPE GRAV. THIS WILL BE IGNORED

***WARNING: ELEMENT 619 IS A CONNECTOR ELEMENT AND CANNOT BE ASSOCIATED WITH
LOAD TYPE GRAV. THIS WILL BE IGNORED

***WARNING: ELEMENT 620 IS A CONNECTOR ELEMENT AND CANNOT BE ASSOCIATED WITH
LOAD TYPE GRAV. THIS WILL BE IGNORED

***NOTE: ALL VALID ELEMENTS HAVE BEEN COLLECTED IN ELEMENT SET
_Whole_Model_GRAV_Elset FOR APPLICATION OF LOAD TYPE GRAV.

***WARNING: THIS OPTION WILL NOT BE STEP-DEPENDENT.
LINE IMAGE: *ELSET, ELSET=q1

***WARNING: THIS OPTION WILL NOT BE STEP-DEPENDENT.
LINE IMAGE: *ELSET, ELSET=q2

***WARNING: THIS OPTION WILL NOT BE STEP-DEPENDENT.
LINE IMAGE: *ELSET, ELSET=q3

***WARNING: THIS OPTION WILL NOT BE STEP-DEPENDENT.
LINE IMAGE: *ELSET, ELSET=q4

***WARNING: THIS OPTION WILL NOT BE STEP-DEPENDENT.
LINE IMAGE: *ELSET, ELSET=q5

***WARNING: THIS OPTION WILL NOT BE STEP-DEPENDENT.
LINE IMAGE: *ELSET, ELSET=q6

***WARNING: THIS OPTION WILL NOT BE STEP-DEPENDENT.
LINE IMAGE: *ELSET, ELSET=q7

***WARNING: THIS OPTION WILL NOT BE STEP-DEPENDENT.
LINE IMAGE: *ELSET, ELSET=q8

***WARNING: THIS OPTION WILL NOT BE STEP-DEPENDENT.
LINE IMAGE: *ELSET, ELSET=q9

*Dload

*Output, field, variable=PRESELECT

*Output, history, variable=PRESELECT

*End Step

*Step, name=Step-2, perturbation, nlgeom=yes

*Frequency, eigensolver=lanczos, normalization=mass

*Frequency, eigensolver=lanczos, normalization=mass

*Output, field, variable=PRESELECT

*End Step

*Step, name=Step-1, nlgeom=yes

*Static

*BOUNDARY

*BOUNDARY

*BOUNDARY

*Cload

*Cload

*Cload

*Cload

*End Step

*Step, name=Step-2, perturbation, nlgeom=yes
*Frequency, eigensolver=lanczos, normalization=mass
*Frequency, eigensolver=lanczos, normalization=mass
*End Step

P R O B L E M S I Z E

NUMBER OF ELEMENTS IS 154
NUMBER OF NODES IS 448
NUMBER OF NODES DEFINED BY THE USER 136
NUMBER OF INTERNAL NODES GENERATED BY THE PROGRAM 312
TOTAL NUMBER OF VARIABLES IN THE MODEL 936
(DEGREES OF FREEDOM PLUS MAX NO. OF ANY LAGRANGE MULTIPLIER
VARIABLES. INCLUDE *PRINT,SOLVE=YES TO GET THE ACTUAL NUMBER.)

END OF USER INPUT PROCESSING

JOB TIME SUMMARY

USER TIME (SEC) = 0.20000
SYSTEM TIME (SEC) = 0.10000
TOTAL CPU TIME (SEC) = 0.30000
WALLCLOCK TIME (SEC) = 2

1

Abaqus Student Edition 2019

Date 06-jul-2020 Time 11:12:29

STEP 1 INCREMENT 1

COMPLETED IN THIS STEP 0.00

TIME

S T E P 1 S T A T I C A N A L Y S I S

AUTOMATIC TIME CONTROL WITH -

A SUGGESTED INITIAL TIME INCREMENT OF 1.000E-02
AND A TOTAL TIME PERIOD OF 1.00
THE MINIMUM TIME INCREMENT ALLOWED IS 1.000E-05
THE MAXIMUM TIME INCREMENT ALLOWED IS 1.00

LINEAR EQUATION SOLVER TYPE DIRECT SPARSE

LARGE DISPLACEMENT THEORY WILL BE USED

TOTAL MASS OF MODEL

8783787.

LOCATION OF THE CENTER OF MASS OF THE MODEL

103.4831 1.9880149E-17 3.271174

MOMENTS OF INERTIA ABOUT THE ORIGIN
 I (XX) I (YY) I (ZZ)
 2.2780884E+09 1.3201227E+11 1.3026200E+11

PRODUCTS OF INERTIA ABOUT THE ORIGIN
 I (XY) I (XZ) I (YZ)
 -1.1175871E-08 -4.6475625E+09 -6.9849193E-10

MOMENTS OF INERTIA ABOUT THE CENTER OF MASS
 I (XX) I (YY) I (ZZ)
 2.1840968E+09 3.7854850E+10 3.6198569E+10

PRODUCTS OF INERTIA ABOUT THE CENTER OF MASS
 I (XY) I (XZ) I (YZ)
 6.8946606E-09 -1.6741517E+09 -1.2726981E-10

M E M O R Y E S T I M A T E

PROCESS	FLOATING PT OPERATIONS PER ITERATION	MINIMUM MEMORY REQUIRED (MB)	MEMORY TO MINIMIZE I/O (MB)
1	3.72E+05	17	65

NOTE:

- (1) SINCE ABAQUS DOES NOT PRE-ALLOCATE MEMORY AND ONLY ALLOCATES MEMORY AS NEEDED DURING THE ANALYSIS, THE MEMORY REQUIREMENT PRINTED HERE CAN ONLY BE VIEWED AS A GENERAL GUIDELINE BASED ON THE BEST KNOWLEDGE AVAILABLE AT THE BEGINNING OF A STEP BEFORE THE SOLUTION PROCESS HAS BEGUN.
- (2) THE ESTIMATE IS NORMALLY UPDATED AT THE BEGINNING OF EVERY STEP. IT IS THE MAXIMUM VALUE OF THE ESTIMATE FROM THE CURRENT STEP TO THE LAST STEP OF THE ANALYSIS, WITH UNSYMMETRIC SOLUTION TAKEN INTO ACCOUNT IF APPLICABLE.
- (3) SINCE THE ESTIMATE IS BASED ON THE ACTIVE DEGREES OF FREEDOM IN THE FIRST ITERATION OF THE CURRENT STEP, THE MEMORY ESTIMATE MIGHT BE SIGNIFICANTLY DIFFERENT THAN ACTUAL USAGE FOR PROBLEMS WITH SUBSTANTIAL CHANGES IN ACTIVE DEGREES OF FREEDOM BETWEEN STEPS (OR EVEN WITHIN THE SAME STEP). EXAMPLES ARE: PROBLEMS WITH SIGNIFICANT CONTACT CHANGES, PROBLEMS WITH MODEL CHANGE, PROBLEMS WITH BOTH STATIC STEP AND STEADY STATE DYNAMIC PROCEDURES WHERE ACOUSTIC ELEMENTS WILL ONLY BE ACTIVATED IN THE STEADY STATE DYNAMIC STEPS.
- (4) FOR MULTI-PROCESS EXECUTION, THE ESTIMATED VALUE OF FLOATING POINT OPERATIONS FOR EACH PROCESS IS BASED ON AN INITIAL SCHEDULING OF OPERATIONS AND MIGHT NOT REFLECT THE ACTUAL FLOATING POINT OPERATIONS COMPLETED ON EACH PROCESS. OPERATIONS ARE DYNAMICALLY BALANCED DURING EXECUTION, SO THE ACTUAL BALANCE OF OPERATIONS BETWEEN PROCESSES IS EXPECTED TO BE BETTER THAN THE ESTIMATE PRINTED HERE.
- (5) THE UPPER LIMIT OF MEMORY THAT CAN BE ALLOCATED BY ABAQUS WILL IN GENERAL DEPEND ON

THE VALUE OF THE "MEMORY" PARAMETER AND THE AMOUNT OF PHYSICAL MEMORY AVAILABLE ON THE MACHINE. PLEASE SEE THE "ABAQUS ANALYSIS USER'S MANUAL" FOR MORE DETAILS. THE ACTUAL USAGE OF MEMORY AND OF DISK SPACE FOR SCRATCH DATA WILL DEPEND ON THIS UPPER LIMIT AS WELL AS THE MEMORY REQUIRED TO MINIMIZE I/O. IF THE MEMORY UPPER LIMIT IS GREATER THAN THE MEMORY REQUIRED TO MINIMIZE I/O, THEN THE ACTUAL MEMORY USAGE WILL BE CLOSE TO THE ESTIMATED "MEMORY TO MINIMIZE I/O" VALUE, AND THE SCRATCH DISK USAGE WILL BE CLOSE-TO-ZERO; OTHERWISE, THE ACTUAL MEMORY USED WILL BE CLOSE TO THE PREVIOUSLY MENTIONED MEMORY LIMIT, AND THE SCRATCH DISK USAGE WILL BE ROUGHLY PROPORTIONAL TO THE DIFFERENCE BETWEEN THE ESTIMATED "MEMORY TO MINIMIZE I/O" AND THE MEMORY UPPER LIMIT. HOWEVER ACCURATE ESTIMATE OF THE SCRATCH DISK SPACE IS NOT POSSIBLE.

(6) USING "*RESTART, WRITE" CAN GENERATE A LARGE AMOUNT OF DATA WRITTEN IN THE WORK DIRECTORY.

1

Abaqus Student Edition 2019

Date 06-jul-2020 Time 11:12:31

STEP 2 INCREMENT 1
 COMPLETED IN THIS STEP 0.00 TIME

S T E P 2 C A L C U L A T I O N O F E I G E N V A L U E S
 F O R N A T U R A L F R E Q U E N C I E S

THE LANCZOS EIGENSOLVER IS USED FOR THIS ANALYSIS
 SYSTEM DATA WILL BE WRITTEN TO THE .SIM FILE

Abaqus WILL COMPUTE UNCOUPLED
 STRUCTURAL AND ACOUSTIC MODES
 NUMBER OF EIGENVALUES 50
 HIGHEST FREQUENCY OF INTEREST 1.00000E+18
 MAXIMUM NUMBER OF STEPS WITHIN RUN 300
 BLOCK SIZE FOR LANCZOS PROCEDURE 7
 THE EIGENVECTORS ARE SCALED SO THAT
 THE GENERALIZED MASS IN EACH VECTOR IS UNITY
 INITIAL STRESS AND DISPLACEMENT EFFECTS ARE
 INCLUDED IN THE STIFFNESS MATRIX

THIS IS A LINEAR PERTURBATION STEP.
 ALL LOADS ARE DEFINED AS CHANGE IN LOAD TO THE REFERENCE STATE

LARGE DISPLACEMENT THEORY WILL BE USED

M E M O R Y E S T I M A T E

PROCESS	FLOATING PT OPERATIONS PER ITERATION	MINIMUM MEMORY REQUIRED (MB)	MEMORY TO MINIMIZE I/O (MB)
1	3.72E+05	18	66

NOTE:

- (1) SINCE ABAQUS DOES NOT PRE-ALLOCATE MEMORY AND ONLY ALLOCATES MEMORY AS NEEDED DURING THE ANALYSIS, THE MEMORY REQUIREMENT PRINTED HERE CAN ONLY BE VIEWED AS A GENERAL GUIDELINE BASED ON THE BEST KNOWLEDGE AVAILABLE AT THE BEGINNING OF A STEP BEFORE THE SOLUTION PROCESS HAS BEGUN.
- (2) THE ESTIMATE IS NORMALLY UPDATED AT THE BEGINNING OF EVERY STEP. IT IS THE MAXIMUM VALUE OF THE ESTIMATE FROM THE CURRENT STEP TO THE LAST STEP OF THE ANALYSIS, WITH UNSYMMETRIC SOLUTION TAKEN INTO ACCOUNT IF APPLICABLE.
- (3) SINCE THE ESTIMATE IS BASED ON THE ACTIVE DEGREES OF FREEDOM IN THE FIRST ITERATION OF THE CURRENT STEP, THE MEMORY ESTIMATE MIGHT BE SIGNIFICANTLY DIFFERENT THAN ACTUAL USAGE FOR PROBLEMS WITH SUBSTANTIAL CHANGES IN ACTIVE DEGREES OF FREEDOM BETWEEN STEPS (OR EVEN WITHIN THE SAME STEP). EXAMPLES ARE: PROBLEMS WITH SIGNIFICANT CONTACT CHANGES, PROBLEMS WITH MODEL CHANGE, PROBLEMS WITH BOTH STATIC STEP AND STEADY STATE DYNAMIC PROCEDURES WHERE ACOUSTIC ELEMENTS WILL ONLY BE ACTIVATED IN THE STEADY STATE DYNAMIC STEPS.
- (4) FOR MULTI-PROCESS EXECUTION, THE ESTIMATED VALUE OF FLOATING POINT OPERATIONS FOR EACH PROCESS IS BASED ON AN INITIAL SCHEDULING OF OPERATIONS AND MIGHT NOT REFLECT THE ACTUAL FLOATING POINT OPERATIONS COMPLETED ON EACH PROCESS. OPERATIONS ARE DYNAMICALLY BALANCED DURING EXECUTION, SO THE ACTUAL BALANCE OF OPERATIONS BETWEEN PROCESSES IS EXPECTED TO BE BETTER THAN THE ESTIMATE PRINTED HERE.
- (5) THE UPPER LIMIT OF MEMORY THAT CAN BE ALLOCATED BY ABAQUS WILL IN GENERAL DEPEND ON THE VALUE OF THE "MEMORY" PARAMETER AND THE AMOUNT OF PHYSICAL MEMORY AVAILABLE ON THE MACHINE. PLEASE SEE THE "ABAQUS ANALYSIS USER'S MANUAL" FOR MORE DETAILS. THE ACTUAL USAGE OF MEMORY AND OF DISK SPACE FOR SCRATCH DATA WILL DEPEND ON THIS UPPER LIMIT AS WELL AS THE MEMORY REQUIRED TO MINIMIZE I/O. IF THE MEMORY UPPER LIMIT IS GREATER THAN THE MEMORY REQUIRED TO MINIMIZE I/O, THEN THE ACTUAL MEMORY USAGE WILL BE CLOSE TO THE ESTIMATED "MEMORY TO MINIMIZE I/O" VALUE, AND THE SCRATCH DISK USAGE WILL BE CLOSE-TO-ZERO; OTHERWISE, THE ACTUAL MEMORY USED WILL BE CLOSE TO THE PREVIOUSLY MENTIONED MEMORY LIMIT, AND THE SCRATCH DISK USAGE WILL BE ROUGHLY PROPORTIONAL TO THE DIFFERENCE BETWEEN THE ESTIMATED "MEMORY TO MINIMIZE I/O" AND THE MEMORY UPPER LIMIT. HOWEVER ACCURATE ESTIMATE OF THE SCRATCH DISK SPACE IS NOT POSSIBLE.
- (6) USING "*RESTART, WRITE" CAN GENERATE A LARGE AMOUNT OF DATA WRITTEN IN THE WORK DIRECTORY.

E I G E N V A L U E O U T P U T

MODE NO DAMPING	EIGENVALUE	FREQUENCY (RAD/TIME)	GENERALIZED MASS (CYCLES/TIME)	COMPOSITE MODAL
1	14.363	3.7898	0.60317	1.0000
2	32.935	5.7389	0.91338	1.0000
3	34.356	5.8614	0.93287	1.0000

4	34.359	5.8616	0.93291	1.0000	0.0000
5	48.426	6.9588	1.1075	1.0000	0.0000
6	48.430	6.9592	1.1076	1.0000	0.0000
7	50.085	7.0771	1.1264	1.0000	0.0000
8	50.091	7.0775	1.1264	1.0000	0.0000
9	61.494	7.8418	1.2481	1.0000	0.0000
10	112.71	10.616	1.6897	1.0000	0.0000
11	141.39	11.891	1.8925	1.0000	0.0000
12	187.49	13.693	2.1793	1.0000	0.0000
13	232.50	15.248	2.4268	1.0000	0.0000
14	290.44	17.042	2.7124	1.0000	0.0000
15	319.73	17.881	2.8459	1.0000	0.0000
16	339.71	18.431	2.9334	1.0000	0.0000
17	438.00	20.928	3.3308	1.0000	0.0000
18	445.28	21.102	3.3584	1.0000	0.0000
19	541.14	23.262	3.7023	1.0000	0.0000
20	620.44	24.909	3.9643	1.0000	0.0000
21	647.90	25.454	4.0511	1.0000	0.0000
22	685.93	26.190	4.1683	1.0000	0.0000
23	837.71	28.943	4.6064	1.0000	0.0000
24	949.17	30.809	4.9033	1.0000	0.0000
25	1077.1	32.819	5.2233	1.0000	0.0000
26	1141.2	33.781	5.3765	1.0000	0.0000
27	1248.3	35.331	5.6232	1.0000	0.0000
28	1437.5	37.914	6.0342	1.0000	0.0000
29	1660.4	40.748	6.4852	1.0000	0.0000
30	1927.9	43.907	6.9881	1.0000	0.0000
31	1945.8	44.111	7.0205	1.0000	0.0000
32	1959.4	44.265	7.0450	1.0000	0.0000
33	2429.2	49.287	7.8442	1.0000	0.0000
34	3068.2	55.392	8.8158	1.0000	0.0000
35	3447.5	58.715	9.3449	1.0000	0.0000
36	3467.1	58.882	9.3714	1.0000	0.0000
37	3892.3	62.388	9.9294	1.0000	0.0000
38	4128.6	64.254	10.226	1.0000	0.0000
39	4320.6	65.731	10.461	1.0000	0.0000
40	4352.2	65.971	10.500	1.0000	0.0000
41	4749.0	68.913	10.968	1.0000	0.0000
42	4820.9	69.433	11.051	1.0000	0.0000
43	5165.9	71.874	11.439	1.0000	0.0000
44	5596.5	74.810	11.906	1.0000	0.0000
45	5732.4	75.713	12.050	1.0000	0.0000
46	6032.7	77.670	12.362	1.0000	0.0000
47	6298.8	79.365	12.631	1.0000	0.0000
48	6684.1	81.756	13.012	1.0000	0.0000
49	7040.6	83.908	13.354	1.0000	0.0000
50	7497.8	86.590	13.781	1.0000	0.0000

P A R T I C I P A T I O N F A C T O R S

MODE NO	X-COMPONENT	Y-COMPONENT	Z-COMPONENT	X-ROTATION	Y-ROTATION
1	-196.29	1.22767E-10	1011.9	-4.08710E-09	-2.40729E+05
1.75007E-08					
2	9.73676E-12	1198.7	-2.71723E-11	-6303.5	6.18874E-09
2.53640E+05					
3	-3.1453	-4.84954E-09	4.3705	2.69420E-08	-1284.4
-1.02248E-06					
4	-4.80778E-10	31.080	6.63517E-10	-171.59	-1.94601E-07
6554.2					
5	2.7327	-1.09394E-09	-1.3731	-2.24389E-08	-104.25
-2.05911E-07					
6	-2.31010E-07	-1.38106E-02	1.16146E-07	-0.21634	8.79337E-06

-2.5747					
7	5.5153	3.89658E-10	-7.8213	-8.44425E-09	976.44
7.69291E-08					
8	-3.37574E-09	0.19354	4.78344E-09	-1.3560	-6.00408E-07
40.505					
9	333.74	-2.68681E-10	-236.76	9.26806E-09	16991.
-3.10280E-08					
10	2.76084E-10	1363.3	-1.18974E-10	-34922.	1.90922E-08
1.44809E+05					
11	2411.1	-7.44773E-11	79.759	7.82674E-10	15067.
-7.38767E-09					
12	599.21	-2.22850E-10	434.74	1.30521E-09	-80640.
-1.95117E-08					
13	-3.67405E-10	-148.67	-1.42023E-10	-7584.4	2.27203E-08
-4238.0					
14	1.63851E-10	-378.36	-7.06129E-11	-8270.1	1.00578E-08
-19146.					
15	-1.01869E-12	-1974.0	-4.95102E-11	-4304.5	8.21977E-09
-1.41371E+05					
16	3.85808E-11	8.1399	8.72763E-10	49.245	-1.11533E-07
-8278.2					
17	-895.49	-3.67457E-12	73.953	-1.02166E-09	-5610.4
1.30807E-08					
18	339.42	2.99011E-12	-137.05	5.11061E-10	-7450.8
-3.49000E-09					
19	-6.04790E-11	-35.433	-4.14860E-10	-7998.8	5.03088E-08
-76801.					
20	-76.273	-3.58020E-10	239.32	-9.82056E-09	-25488.
-1.32838E-07					
21	192.67	-1.29165E-10	70.136	-2.24984E-09	-21175.
-4.19700E-08					
22	1.35772E-10	6.7000	-6.60730E-11	459.81	9.92079E-09
7610.9					
23	192.80	6.42004E-12	86.081	5.81536E-10	-3897.3
7.72686E-10					
24	77.231	1.77806E-11	265.96	-2.28245E-09	-40792.
6.36101E-09					
25	-8.53726E-11	114.86	1.18107E-10	-12606.	-5.53245E-08
37945.					
26	50.077	-5.05523E-11	-532.16	8.63461E-09	-17420.
-2.30677E-08					
27	8.93349E-12	445.58	1.25251E-10	-3336.1	-1.18413E-08
41820.					
28	7.53176E-11	9.5373	6.68145E-11	707.95	-1.53246E-09
-2132.4					
29	-96.834	4.79006E-12	1315.5	1.20238E-09	-1.04264E+05
-4.47197E-09					
30	42.381	-2.08862E-11	584.90	2.22574E-09	-40223.
-6.62738E-08					
31	-2.07132E-10	2.1131	-3.21614E-09	-5.2079	2.30516E-07
-5442.1					
32	2.55612E-10	-158.86	3.12262E-10	486.17	-1.67778E-09
21431.					
33	2.68226E-10	-7.7816	-2.32480E-10	-276.86	4.98583E-08
196.58					
34	-415.30	5.47533E-11	-178.04	3.83708E-10	18539.
5.86786E-09					
35	-4.56348E-11	5.2218	-2.67383E-10	1043.6	3.10165E-08
838.00					
36	-82.640	-2.92676E-11	370.15	2.19600E-09	-56287.
-1.01542E-08					
37	266.04	8.02460E-11	-24.694	-1.51633E-09	498.85
6.98951E-09					
38	-7.33246E-12	-165.08	6.30715E-11	6603.6	-3.09085E-08
-34239.					

39	1.61651E-09	-2.0748	-2.37215E-09	-67.563	3.53414E-07
3074.3					
40	4.54133E-10	-144.42	-3.03689E-10	-7121.9	7.94325E-08
-23080.					
41	5.41230E-11	14.199	-1.58323E-09	45.519	1.73188E-07
2294.2					
42	295.83	2.27473E-10	-333.48	-1.87868E-08	45409.
8.57402E-10					
43	154.24	-2.09723E-09	228.31	-8.48583E-08	-17799.
-1.75361E-07					
44	6.7616	2.25261E-09	-221.78	7.87079E-08	17519.
4.65003E-07					
45	-292.43	2.16266E-09	176.54	3.05755E-08	-25667.
3.34537E-07					
46	2.46329E-09	-88.526	8.35685E-09	1388.4	-4.46835E-07
7946.7					
47	-100.14	-3.78631E-09	-1186.8	-1.06257E-07	1.48762E+05
-6.49287E-07					
48	5.07597E-08	-142.44	2.74671E-07	1255.2	-1.47422E-05
9653.6					
49	1.55531E-07	-8.0210	6.86807E-07	-823.35	-3.76435E-05
1916.5					
50	50.873	-1.11121E-06	49.735	-3.65364E-05	-5289.9
-1.75896E-04					

E F F E C T I V E M A S S

MODE NO	X-COMPONENT	Y-COMPONENT	Z-COMPONENT	X-ROTATION	Y-ROTATION
1	38531.	1.50718E-20	1.02388E+06	1.67044E-17	5.79504E+10
3.06276E-16					
2	9.48044E-23	1.43695E+06	7.38336E-22	3.97345E+07	3.83006E-17
6.43333E+10					
3	9.8932	2.35180E-17	19.101	7.25869E-16	1.64962E+06
1.04546E-12					
4	2.31147E-19	966.00	4.40255E-19	29443.	3.78697E-14
4.29574E+07					
5	7.4679	1.19671E-18	1.8855	5.03504E-16	10869.
4.23993E-14					
6	5.33656E-14	1.90732E-04	1.34898E-14	4.68037E-02	7.73234E-11
6.6291					
7	30.418	1.51833E-19	61.172	7.13054E-17	9.53426E+05
5.91809E-15					
8	1.13956E-17	3.74566E-02	2.28813E-17	1.8388	3.60490E-13
1640.7					
9	1.11385E+05	7.21895E-20	56053.	8.58969E-17	2.88703E+08
9.62738E-16					
10	7.62226E-20	1.85850E+06	1.41548E-20	1.21956E+09	3.64511E-16
2.09695E+10					
11	5.81337E+06	5.54686E-21	6361.5	6.12578E-19	2.27007E+08
5.45776E-17					
12	3.59056E+05	4.96623E-20	1.88996E+05	1.70358E-18	6.50284E+09
3.80708E-16					
13	1.34986E-19	22103.	2.01706E-20	5.75224E+07	5.16213E-16
1.79610E+07					
14	2.68473E-20	1.43157E+05	4.98618E-21	6.83941E+07	1.01160E-16
3.66565E+08					
15	1.03773E-24	3.89661E+06	2.45126E-21	1.85285E+07	6.75646E-17
1.99856E+10					
16	1.48848E-21	66.257	7.61715E-19	2425.0	1.24395E-14
6.85281E+07					
17	8.01895E+05	1.35025E-23	5469.1	1.04379E-18	3.14763E+07
1.71105E-16					

18	1.15204E+05 1.21801E-17	8.94073E-24	18783.	2.61183E-19	5.55145E+07
19	3.65771E-21 5.89845E+09	1255.5	1.72109E-19	6.39816E+07	2.53098E-15
20	5817.5 1.76459E-14	1.28179E-19	57274.	9.64433E-17	6.49637E+08
21	37123. 1.76148E-15	1.66836E-20	4919.0	5.06179E-18	4.48399E+08
22	1.84341E-20 5.79252E+07	44.890	4.36564E-21	2.11426E+05	9.84221E-17
23	37172. 5.97043E-19	4.12169E-23	7409.9	3.38185E-19	1.51886E+07
24	5964.6 4.04624E-17	3.16149E-22	70737.	5.20958E-18	1.66399E+09
25	7.28849E-21 1.43979E+09	13193.	1.39492E-20	1.58900E+08	3.06080E-15
26	2507.7 5.32119E-16	2.55553E-21	2.83199E+05	7.45566E-17	3.03447E+08
27	7.98073E-23 1.74892E+09	1.98542E+05	1.56877E-20	1.11297E+07	1.40217E-16
28	5.67274E-21 4.54711E+06	90.960	4.46418E-21	5.01187E+05	2.34843E-18
29	9376.8 1.99985E-17	2.29447E-23	1.73050E+06	1.44572E-18	1.08709E+10
30	1796.1 4.39222E-15	4.36235E-22	3.42110E+05	4.95392E-18	1.61791E+09
31	4.29038E-20 2.96167E+07	4.4651	1.03436E-17	27.122	5.31376E-14
32	6.53377E-20 4.59285E+08	25237.	9.75075E-20	2.36358E+05	2.81495E-18
33	7.19451E-20 38644.	60.554	5.40472E-20	76649.	2.48585E-15
34	1.72475E+05 3.44317E-17	2.99792E-21	31698.	1.47232E-19	3.43694E+08
35	2.08253E-21 7.02237E+05	27.267	7.14935E-20	1.08908E+06	9.62023E-16
36	6829.4 1.03107E-16	8.56590E-22	1.37009E+05	4.82241E-18	3.16826E+09
37	70778. 4.88533E-17	6.43941E-21	609.77	2.29927E-18	2.48856E+05
38	5.37650E-23 1.17228E+09	27251.	3.97801E-21	4.36078E+07	9.55336E-16
39	2.61310E-18 9.45138E+06	4.3050	5.62709E-18	4564.7	1.24902E-13
40	2.06237E-19 5.32692E+08	20858.	9.22272E-20	5.07221E+07	6.30952E-15
41	2.92930E-21 5.26331E+06	201.62	2.50662E-18	2072.0	2.99941E-14
42	87515. 7.35138E-19	5.17439E-20	1.11206E+05	3.52946E-16	2.06195E+09
43	23790. 3.07516E-14	4.39836E-18	52124.	7.20093E-15	3.16795E+08
44	45.719 2.16228E-13	5.07425E-18	49188.	6.19493E-15	3.06900E+08
45	85513. 1.11915E-13	4.67708E-18	31167.	9.34859E-16	6.58793E+08
46	6.06779E-18 6.31495E+07	7836.9	6.98369E-17	1.92772E+06	1.99661E-13
47	10029. 4.21573E-13	1.43361E-17	1.40843E+06	1.12905E-14	2.21302E+10
48	2.57655E-15 9.31929E+07	20289.	7.54440E-14	1.57550E+06	2.17333E-10
49	2.41899E-14 3.67290E+06	64.337	4.71703E-13	6.77900E+05	1.41703E-09
50	2588.1	1.23478E-12	2473.6	1.33491E-09	2.79834E+07

3.09395E-08

TOTAL 7.79881E+06 7.67331E+06 5.61968E+06 1.73841E+09 1.09643E+11
1.17303E+11

THE ANALYSIS HAS BEEN COMPLETED

ANALYSIS COMPLETE
WITH 33 WARNING MESSAGES ON THE DAT FILE
AND 10 WARNING MESSAGES ON THE MSG FILE
 10 WARNINGS ARE FOR NEGATIVE EIGENVALUES

JOB TIME SUMMARY

USER TIME (SEC) = 1.4000
SYSTEM TIME (SEC) = 0.30000
TOTAL CPU TIME (SEC) = 1.7000
WALLCLOCK TIME (SEC) = 4

PROCESSING PART, INSTANCE, AND ASSEMBLY INFORMATION

END PROCESSING PART, INSTANCE, AND ASSEMBLY INFORMATION

*Initial Conditions, type=STRESS

OPTIONS BEING PROCESSED

*HEADING

*INCLUDE,INPUT=nodes.inp

*** INPUT DATA IS READ FROM FILE
nodes.inp

*NODE,NSET=ALL

*INCLUDE,INPUT=deck.inp

*** INPUT DATA IS READ FROM FILE
deck.inp

*ELEMENT,TYPE=B31,ELSET=deck_concrete

*ELEMENT,TYPE=B31,ELSET=deck_steel

*INCLUDE,INPUT=cross_beam.inp

*** INPUT DATA IS READ FROM FILE
cross_beam.inp

*ELEMENT,TYPE=B31,ELSET=crossbeam_concrete10a

*ELEMENT,TYPE=B31,ELSET=crossbeam_concrete10b

*ELEMENT,TYPE=B31,ELSET=crossbeam_concrete11

*ELEMENT,TYPE=B31,ELSET=crossbeam_steel_1

*ELEMENT,TYPE=B31,ELSET=crossbeam_steel_2

*ELEMENT,TYPE=B31,ELSET=crossbeam_steel_3

*INCLUDE,INPUT=cables_beam.inp

*** INPUT DATA IS READ FROM FILE
cables_beam.inp

*ELEMENT, TYPE=B31, ELSET=cable_11

*ELEMENT, TYPE=B31, ELSET=cable_12

*ELEMENT, TYPE=B31, ELSET=cable_21

*ELEMENT, TYPE=B31, ELSET=cable_22

*ELEMENT, TYPE=B31, ELSET=cable_31

```
*ELEMENT, TYPE=B31, ELSET=cable_32
*ELEMENT, TYPE=B31, ELSET=cable_51
*ELEMENT, TYPE=B31, ELSET=cable_52
*ELEMENT, TYPE=B31, ELSET=cable_61
*ELEMENT, TYPE=B31, ELSET=cable_62
*ELEMENT, TYPE=B31, ELSET=cable_71
*ELEMENT, TYPE=B31, ELSET=cable_72
*INCLUDE, INPUT=pylon.inp
```

```
*** INPUT DATA IS READ FROM FILE
pylon.inp
```

```
*ELEMENT, TYPE=B31, ELSET=pylon1
*ELEMENT, TYPE=B31, ELSET=pylon2
*ELEMENT, TYPE=B31, ELSET=pylon3
*ELEMENT, TYPE=B31, ELSET=pylon4
*ELEMENT, TYPE=B31, ELSET=pylon5
*ELEMENT, TYPE=B31, ELSET=pylon6
*ELEMENT, TYPE=B31, ELSET=pylon7
*ELEMENT, TYPE=B31, ELSET=pylon_crossbeam
*INCLUDE, INPUT=columns.inp
```

```
*** INPUT DATA IS READ FROM FILE
columns.inp
```

```
*ELEMENT, TYPE=B31, ELSET=column
*INCLUDE, INPUT=connectors.inp
```

```
*** INPUT DATA IS READ FROM FILE
connectors.inp
```

```
*ELEMENT, TYPE=CONN3D2, ELSET=connection_pylon_deck
*ELEMENT, TYPE=CONN3D2, ELSET=connection_column_deck
*ELEMENT, TYPE=CONN3D2, ELSET=connection_decks
*ELEMENT, TYPE=CONN3D2, ELSET=connection_crossbeam
*ELEMENT, TYPE=CONN3D2, ELSET=connection_pylontop
*INCLUDE, INPUT=crossbeam_mass.inp
```

```
*** INPUT DATA IS READ FROM FILE
crossbeam_mass.inp
```

```
*ELEMENT, TYPE=MASS, ELSET=mass_concrete_crossbeam
*ELEMENT, TYPE=MASS, ELSET=mass_steel_crossbeam
*INCLUDE, INPUT=initial_stress_beam.inp
```

```
*** INPUT DATA IS READ FROM FILE
initial_stress_beam.inp
```

```
*NSET, NSET=deck_nodes, generate
*Nset, nset=analysis
*INCLUDE, INPUT=boundary_conditions.inp
```

```
*** INPUT DATA IS READ FROM FILE
boundary_conditions.inp
```

*INCLUDE,INPUT=self_weight_loads.inp

*** INPUT DATA IS READ FROM FILE
self_weight_loads.inp

*INCLUDE,INPUT=equivalent_loads.inp

*** INPUT DATA IS READ FROM FILE
equivalent_loads.inp

*ELSET, ELSET=q1

*ELSET, ELSET=q2

*ELSET, ELSET=q3

*ELSET, ELSET=q4

*ELSET, ELSET=q5

*ELSET, ELSET=q6

*ELSET, ELSET=q7

*ELSET, ELSET=q8

*ELSET, ELSET=q9

*MATERIAL, NAME=cable

*ELASTIC

*DENSITY

*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=2719.3, ELSET=deck_concrete, POISSON=0.2

*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=13443, ELSET=deck_steel, POISSON=0.3

*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=2500, ELSET=crossbeam_concrete10a, POISSON=0.2

*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=2500, ELSET=crossbeam_concrete10b, POISSON=0.2

*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=2500, ELSET=crossbeam_concrete11, POISSON=0.2

*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=crossbeam_steel_1, POISSON=0.3

*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=crossbeam_steel_2, POISSON=0.3

*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=crossbeam_steel_3, POISSON=0.3

*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=cable_11, POISSON=0.3

*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=cable_12, POISSON=0.3

*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=cable_21, POISSON=0.3

*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=cable_22, POISSON=0.3

*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=cable_31, POISSON=0.3

*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=cable_32, POISSON=0.3

*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=cable_51, POISSON=0.3

*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=cable_52, POISSON=0.3

*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=cable_61, POISSON=0.3

*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=cable_62, POISSON=0.3

*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=cable_71, POISSON=0.3

*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=cable_72, POISSON=0.3

*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, ELSET=pylon1, POISSON=0.2, DENSITY=2500

*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, ELSET=pylon2, POISSON=0.2, DENSITY=2500

*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, ELSET=pylon3, POISSON=0.2, DENSITY=2500

*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, ELSET=pylon4, POISSON=0.2, DENSITY=2500

*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, ELSET=pylon5, POISSON=0.2, DENSITY=2500

*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, ELSET=pylon6, POISSON=0.2, DENSITY=2500

*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, ELSET=pylon7, POISSON=0.2, DENSITY=2500

*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, ELSET=pylon_crossbeam, POISSON=0.2, DENSITY=2500

*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, ELSET=column, POISSON=0.2, DENSITY=2500

*MASS, ELSET=mass_concrete_crossbeam

*MASS, ELSET=mass_steel_crossbeam

*Initial Conditions, type=STRESS

*CONNECTOR SECTION, ELSET=connection_pylon_deck

*CONNECTOR SECTION, ELSET=connection_column_deck

*CONNECTOR SECTION, ELSET=connection_decks

*CONNECTOR SECTION, ELSET=connection_crossbeam

*CONNECTOR SECTION, ELSET=connection_pylontop

*ORIENTATION, NAME=ori90xz

***WARNING: LOCAL DIRECTION ABOUT WHICH THE ADDITIONAL ROTATION IS GIVEN HAS NOT BEEN SPECIFIED. THE LOCAL 1 DIRECTION WITH NO ADDITIONAL ROTATION HAS BEEN CHOSEN AS THE DEFAULT. THE TANGENTIAL DIRECTIONS ON A SURFACE, THE MATERIAL AXES IN THE SHELL, MEMBRANE, OR BEHAVIOR DIRECTIONS IN A GASKET MID-SURFACE ARE THE LOCAL 2 AND 3 DIRECTIONS.

*ORIENTATION, NAME=ori90xy

***WARNING: LOCAL DIRECTION ABOUT WHICH THE ADDITIONAL ROTATION IS GIVEN HAS NOT BEEN SPECIFIED. THE LOCAL 1 DIRECTION WITH NO ADDITIONAL ROTATION HAS BEEN CHOSEN AS THE DEFAULT. THE TANGENTIAL DIRECTIONS ON A SURFACE, THE MATERIAL AXES IN THE SHELL, MEMBRANE, OR BEHAVIOR DIRECTIONS IN A GASKET MID-SURFACE ARE THE LOCAL 2 AND 3 DIRECTIONS.

*ORIENTATION, NAME=ori90x-z

***WARNING: LOCAL DIRECTION ABOUT WHICH THE ADDITIONAL ROTATION IS GIVEN HAS NOT BEEN SPECIFIED. THE LOCAL 1 DIRECTION WITH NO ADDITIONAL ROTATION HAS BEEN CHOSEN AS THE DEFAULT. THE TANGENTIAL DIRECTIONS ON A SURFACE, THE MATERIAL AXES IN THE SHELL, MEMBRANE, OR BEHAVIOR DIRECTIONS IN A GASKET MID-SURFACE ARE THE LOCAL 2 AND 3 DIRECTIONS.

*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=2719.3, ELSET=deck_concrete, POISSON=0.2
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=13443, ELSET=deck_steel, POISSON=0.3
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=2500, ELSET=crossbeam_concretel0a, POISSON=0.2
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=2500, ELSET=crossbeam_concretel0b, POISSON=0.2
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=2500, ELSET=crossbeam_concretel1, POISSON=0.2
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=crossbeam_steel_1, POISSON=0.3
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=crossbeam_steel_2, POISSON=0.3
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=crossbeam_steel_3, POISSON=0.3
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=cable_11, POISSON=0.3
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=cable_12, POISSON=0.3
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=cable_21, POISSON=0.3
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=cable_22, POISSON=0.3
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=cable_31, POISSON=0.3
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=cable_32, POISSON=0.3
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=cable_51, POISSON=0.3
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=cable_52, POISSON=0.3
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=cable_61, POISSON=0.3
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=cable_62, POISSON=0.3
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=cable_71, POISSON=0.3
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, DENSITY=7850, ELSET=cable_72, POISSON=0.3
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, ELSET=pylon1, POISSON=0.2, DENSITY=2500
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, ELSET=pylon2, POISSON=0.2, DENSITY=2500
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, ELSET=pylon3, POISSON=0.2, DENSITY=2500
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, ELSET=pylon4, POISSON=0.2, DENSITY=2500
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, ELSET=pylon5, POISSON=0.2, DENSITY=2500
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, ELSET=pylon6, POISSON=0.2, DENSITY=2500
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, ELSET=pylon7, POISSON=0.2, DENSITY=2500
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, ELSET=pylon_crossbeam, POISSON=0.2, DENSITY=2500
*BEAM GENERAL SECTION, SECTION=GENERAL, ELSET=column, POISSON=0.2, DENSITY=2500
*MASS, ELSET=mass_concrete_crossbeam
*MASS, ELSET=mass_steel_crossbeam
*Initial Conditions, type=STRESS
*CONNECTOR SECTION, ELSET=connection_pylon_deck
*CONNECTOR SECTION, ELSET=connection_column_deck
*CONNECTOR SECTION, ELSET=connection_decks
*CONNECTOR SECTION, ELSET=connection_crossbeam
*CONNECTOR SECTION, ELSET=connection_pylontop
*BOUNDARY
*BOUNDARY
*BOUNDARY
*BOUNDARY

*BOUNDARY
*BOUNDARY
*CONNECTOR SECTION, ELSET=connection_pylon_deck
*CONNECTOR SECTION, ELSET=connection_column_deck
*CONNECTOR SECTION, ELSET=connection_decks
*CONNECTOR SECTION, ELSET=connection_crossbeam
*CONNECTOR SECTION, ELSET=connection_pylontop
*Output, field, variable=PRESELECT
*Output, history, variable=PRESELECT
*Output, field, variable=PRESELECT
*Initial Conditions, type=STRESS
*Output, field, variable=PRESELECT
*Output, history, variable=PRESELECT
*Output, field, variable=PRESELECT
*Initial Conditions, type=STRESS
*Initial Conditions, type=STRESS
*Output, field, variable=PRESELECT
*Output, history, variable=PRESELECT
*Output, field, variable=PRESELECT
*Step, name=Step-1, nlgeom=yes
*Output, field, variable=PRESELECT
*Output, history, variable=PRESELECT
*Step, name=Step-2, perturbation, nlgeom=yes
*Frequency, eigensolver=lanczos, normalization=mass
*Output, field, variable=PRESELECT
*Step, name=Step-1, nlgeom=yes
*Step, name=Step-2, perturbation, nlgeom=yes
*Step, name=Step-1, nlgeom=yes
*Static
*BOUNDARY
*BOUNDARY
*BOUNDARY
*Dload

***WARNING: ELEMENT 601 IS A CONNECTOR ELEMENT AND CANNOT BE ASSOCIATED WITH LOAD TYPE GRAV. THIS WILL BE IGNORED

***WARNING: ELEMENT 602 IS A CONNECTOR ELEMENT AND CANNOT BE ASSOCIATED WITH LOAD TYPE GRAV. THIS WILL BE IGNORED

***WARNING: ELEMENT 603 IS A CONNECTOR ELEMENT AND CANNOT BE ASSOCIATED WITH LOAD TYPE GRAV. THIS WILL BE IGNORED

***WARNING: ELEMENT 604 IS A CONNECTOR ELEMENT AND CANNOT BE ASSOCIATED WITH LOAD TYPE GRAV. THIS WILL BE IGNORED

***WARNING: ELEMENT 605 IS A CONNECTOR ELEMENT AND CANNOT BE ASSOCIATED WITH LOAD TYPE GRAV. THIS WILL BE IGNORED

***WARNING: ELEMENT 606 IS A CONNECTOR ELEMENT AND CANNOT BE ASSOCIATED WITH LOAD TYPE GRAV. THIS WILL BE IGNORED

***WARNING: ELEMENT 607 IS A CONNECTOR ELEMENT AND CANNOT BE ASSOCIATED WITH LOAD TYPE GRAV. THIS WILL BE IGNORED

***WARNING: ELEMENT 608 IS A CONNECTOR ELEMENT AND CANNOT BE ASSOCIATED WITH LOAD TYPE GRAV. THIS WILL BE IGNORED

***WARNING: ELEMENT 609 IS A CONNECTOR ELEMENT AND CANNOT BE ASSOCIATED WITH LOAD TYPE GRAV. THIS WILL BE IGNORED

***WARNING: ELEMENT 610 IS A CONNECTOR ELEMENT AND CANNOT BE ASSOCIATED WITH LOAD TYPE GRAV. THIS WILL BE IGNORED

***WARNING: ELEMENT 611 IS A CONNECTOR ELEMENT AND CANNOT BE ASSOCIATED WITH

LOAD TYPE GRAV. THIS WILL BE IGNORED

***WARNING: ELEMENT 612 IS A CONNECTOR ELEMENT AND CANNOT BE ASSOCIATED WITH LOAD TYPE GRAV. THIS WILL BE IGNORED

***WARNING: ELEMENT 613 IS A CONNECTOR ELEMENT AND CANNOT BE ASSOCIATED WITH LOAD TYPE GRAV. THIS WILL BE IGNORED

***WARNING: ELEMENT 614 IS A CONNECTOR ELEMENT AND CANNOT BE ASSOCIATED WITH LOAD TYPE GRAV. THIS WILL BE IGNORED

***WARNING: ELEMENT 615 IS A CONNECTOR ELEMENT AND CANNOT BE ASSOCIATED WITH LOAD TYPE GRAV. THIS WILL BE IGNORED

***WARNING: ELEMENT 616 IS A CONNECTOR ELEMENT AND CANNOT BE ASSOCIATED WITH LOAD TYPE GRAV. THIS WILL BE IGNORED

***WARNING: ELEMENT 617 IS A CONNECTOR ELEMENT AND CANNOT BE ASSOCIATED WITH LOAD TYPE GRAV. THIS WILL BE IGNORED

***WARNING: ELEMENT 618 IS A CONNECTOR ELEMENT AND CANNOT BE ASSOCIATED WITH LOAD TYPE GRAV. THIS WILL BE IGNORED

***WARNING: ELEMENT 619 IS A CONNECTOR ELEMENT AND CANNOT BE ASSOCIATED WITH LOAD TYPE GRAV. THIS WILL BE IGNORED

***WARNING: ELEMENT 620 IS A CONNECTOR ELEMENT AND CANNOT BE ASSOCIATED WITH LOAD TYPE GRAV. THIS WILL BE IGNORED

***NOTE: ALL VALID ELEMENTS HAVE BEEN COLLECTED IN ELEMENT SET
_Whole_Model_GRAV_Elset FOR APPLICATION OF LOAD TYPE GRAV.

***WARNING: THIS OPTION WILL NOT BE STEP-DEPENDENT.
LINE IMAGE: *ELSET, ELSET=q1

***WARNING: THIS OPTION WILL NOT BE STEP-DEPENDENT.
LINE IMAGE: *ELSET, ELSET=q2

***WARNING: THIS OPTION WILL NOT BE STEP-DEPENDENT.
LINE IMAGE: *ELSET, ELSET=q3

***WARNING: THIS OPTION WILL NOT BE STEP-DEPENDENT.
LINE IMAGE: *ELSET, ELSET=q4

***WARNING: THIS OPTION WILL NOT BE STEP-DEPENDENT.
LINE IMAGE: *ELSET, ELSET=q5

***WARNING: THIS OPTION WILL NOT BE STEP-DEPENDENT.
LINE IMAGE: *ELSET, ELSET=q6

***WARNING: THIS OPTION WILL NOT BE STEP-DEPENDENT.
LINE IMAGE: *ELSET, ELSET=q7

***WARNING: THIS OPTION WILL NOT BE STEP-DEPENDENT.
LINE IMAGE: *ELSET, ELSET=q8

***WARNING: THIS OPTION WILL NOT BE STEP-DEPENDENT.
LINE IMAGE: *ELSET, ELSET=q9

*Dload

*Output, field, variable=PRESELECT

*Output, history, variable=PRESELECT

*End Step

*Step, name=Step-2, perturbation, nlgeom=yes

*Frequency, eigensolver=lanczos, normalization=mass

*Frequency, eigensolver=lanczos, normalization=mass

```

*Output, field, variable=PRESELECT
*End Step
*Step, name=Step-1, nlgeom=yes
*Static
*BOUNDARY
*BOUNDARY
*BOUNDARY
*Clload
*Clload
*Clload
*Clload
*End Step
*Step, name=Step-2, perturbation, nlgeom=yes
*Frequency, eigensolver=lanczos, normalization=mass
*Frequency, eigensolver=lanczos, normalization=mass
*End Step

```

***WARNING: For 10 beam elements either the average curvature about the local 1-direction differs by more than 0.1 degrees per unit length as compared to the default curvature or the approximate integrated curvature for the entire beam differs by more than 5 degrees as compared to the approximate integrated default curvature. This may be due to a user-specified normal or due to the nodal averaging routine used by Abaqus. This difference may cause unexpected behavior of the beam and you may want to verify that the beam normals are correct for your problem. The elements have been identified in element set WarnBeamCurvature1.

***WARNING: For 12 beam elements either the average curvature about the beam tangent differs by more than 0.1 degrees per unit length as compared to the default curvature or the approximate integrated curvature for the entire beam differs by more than 5 degrees as compared to the approximate integrated default curvature. This may be due to a user-specified normal or due to the nodal averaging routine used by Abaqus. This difference may cause unexpected behavior of the beam and you may want to verify that the beam normals are correct for your problem. The elements have been identified in element set WarnBeamTwist.

P R O B L E M S I Z E

NUMBER OF ELEMENTS IS	262
NUMBER OF NODES IS	796
NUMBER OF NODES DEFINED BY THE USER	244
NUMBER OF INTERNAL NODES GENERATED BY THE PROGRAM	552
TOTAL NUMBER OF VARIABLES IN THE MODEL	1584
(DEGREES OF FREEDOM PLUS MAX NO. OF ANY LAGRANGE MULTIPLIER VARIABLES. INCLUDE *PRINT,SOLVE=YES TO GET THE ACTUAL NUMBER.)	

END OF USER INPUT PROCESSING

JOB TIME SUMMARY

USER TIME (SEC)	=	0.20000	
SYSTEM TIME (SEC)	=	0.10000	
TOTAL CPU TIME (SEC)	=	0.30000	
WALLCLOCK TIME (SEC)	=		1

STEP 1 INCREMENT 1
 COMPLETED IN THIS STEP 0.00 TIME

S T E P 1 S T A T I C A N A L Y S I S

AUTOMATIC TIME CONTROL WITH -
 A SUGGESTED INITIAL TIME INCREMENT OF 1.000E-02
 AND A TOTAL TIME PERIOD OF 1.00
 THE MINIMUM TIME INCREMENT ALLOWED IS 1.000E-05
 THE MAXIMUM TIME INCREMENT ALLOWED IS 1.00

LINEAR EQUATION SOLVER TYPE DIRECT SPARSE

LARGE DISPLACEMENT THEORY WILL BE USED

TOTAL MASS OF MODEL

8783787.

LOCATION OF THE CENTER OF MASS OF THE MODEL

103.4831 1.5570195E-17 3.271174

MOMENTS OF INERTIA ABOUT THE ORIGIN

I (XX) I (YY) I (ZZ)

2.2267535E+09 1.3176408E+11 1.3006189E+11

PRODUCTS OF INERTIA ABOUT THE ORIGIN

I (XY) I (XZ) I (YZ)

-1.4508259E-08 -4.6676911E+09 -7.0576789E-10

MOMENTS OF INERTIA ABOUT THE CENTER OF MASS

I (XX) I (YY) I (ZZ)

2.1327619E+09 3.7606652E+10 3.5998460E+10

PRODUCTS OF INERTIA ABOUT THE CENTER OF MASS

I (XY) I (XZ) I (YZ)

-3.5536278E-10 -1.6942803E+09 -2.5838493E-10

M E M O R Y E S T I M A T E

PROCESS	FLOATING PT OPERATIONS PER ITERATION	MINIMUM MEMORY REQUIRED (MB)	MEMORY TO MINIMIZE I/O (MB)
---------	--------------------------------------	------------------------------	-----------------------------

NOTE:

- (1) SINCE ABAQUS DOES NOT PRE-ALLOCATE MEMORY AND ONLY ALLOCATES MEMORY AS NEEDED DURING THE ANALYSIS, THE MEMORY REQUIREMENT PRINTED HERE CAN ONLY BE VIEWED AS A GENERAL GUIDELINE BASED ON THE BEST KNOWLEDGE AVAILABLE AT THE BEGINNING OF A STEP BEFORE THE SOLUTION PROCESS HAS BEGUN.
- (2) THE ESTIMATE IS NORMALLY UPDATED AT THE BEGINNING OF EVERY STEP. IT IS THE MAXIMUM VALUE OF THE ESTIMATE FROM THE CURRENT STEP TO THE LAST STEP OF THE ANALYSIS, WITH UNSYMMETRIC SOLUTION TAKEN INTO ACCOUNT IF APPLICABLE.
- (3) SINCE THE ESTIMATE IS BASED ON THE ACTIVE DEGREES OF FREEDOM IN THE FIRST ITERATION OF THE CURRENT STEP, THE MEMORY ESTIMATE MIGHT BE SIGNIFICANTLY DIFFERENT THAN ACTUAL USAGE FOR PROBLEMS WITH SUBSTANTIAL CHANGES IN ACTIVE DEGREES OF FREEDOM BETWEEN STEPS (OR EVEN WITHIN THE SAME STEP). EXAMPLES ARE: PROBLEMS WITH SIGNIFICANT CONTACT CHANGES, PROBLEMS WITH MODEL CHANGE, PROBLEMS WITH BOTH STATIC STEP AND STEADY STATE DYNAMIC PROCEDURES WHERE ACOUSTIC ELEMENTS WILL ONLY BE ACTIVATED IN THE STEADY STATE DYNAMIC STEPS.
- (4) FOR MULTI-PROCESS EXECUTION, THE ESTIMATED VALUE OF FLOATING POINT OPERATIONS FOR EACH PROCESS IS BASED ON AN INITIAL SCHEDULING OF OPERATIONS AND MIGHT NOT REFLECT THE ACTUAL FLOATING POINT OPERATIONS COMPLETED ON EACH PROCESS. OPERATIONS ARE DYNAMICALLY BALANCED DURING EXECUTION, SO THE ACTUAL BALANCE OF OPERATIONS BETWEEN PROCESSES IS EXPECTED TO BE BETTER THAN THE ESTIMATE PRINTED HERE.
- (5) THE UPPER LIMIT OF MEMORY THAT CAN BE ALLOCATED BY ABAQUS WILL IN GENERAL DEPEND ON THE VALUE OF THE "MEMORY" PARAMETER AND THE AMOUNT OF PHYSICAL MEMORY AVAILABLE ON THE MACHINE. PLEASE SEE THE "ABAQUS ANALYSIS USER'S MANUAL" FOR MORE DETAILS. THE ACTUAL USAGE OF MEMORY AND OF DISK SPACE FOR SCRATCH DATA WILL DEPEND ON THIS UPPER LIMIT AS WELL AS THE MEMORY REQUIRED TO MINIMIZE I/O. IF THE MEMORY UPPER LIMIT IS GREATER THAN THE MEMORY REQUIRED TO MINIMIZE I/O, THEN THE ACTUAL MEMORY USAGE WILL BE CLOSE TO THE ESTIMATED "MEMORY TO MINIMIZE I/O" VALUE, AND THE SCRATCH DISK USAGE WILL BE CLOSE-TO-ZERO; OTHERWISE, THE ACTUAL MEMORY USED WILL BE CLOSE TO THE PREVIOUSLY MENTIONED MEMORY LIMIT, AND THE SCRATCH DISK USAGE WILL BE ROUGHLY PROPORTIONAL TO THE DIFFERENCE BETWEEN THE ESTIMATED "MEMORY TO MINIMIZE I/O" AND THE MEMORY UPPER LIMIT. HOWEVER ACCURATE ESTIMATE OF THE SCRATCH DISK SPACE IS NOT POSSIBLE.
- (6) USING "*RESTART, WRITE" CAN GENERATE A LARGE AMOUNT OF DATA WRITTEN IN THE WORK DIRECTORY.

1

Abaqus Student Edition 2019

Date 06-jul-2020 Time 11:36:53

STEP 2 INCREMENT 1

COMPLETED IN THIS STEP 0.00

TIME

STEP 2 CALCULATION OF EIGENVALUES
FOR NATURAL FREQUENCIES

THE LANCZOS EIGENSOLVER IS USED FOR THIS ANALYSIS
SYSTEM DATA WILL BE WRITTEN TO THE .SIM FILE

Abaqus WILL COMPUTE UNCOUPLED
STRUCTURAL AND ACOUSTIC MODES
NUMBER OF EIGENVALUES 250
HIGHEST FREQUENCY OF INTEREST 1.00000E+18
MAXIMUM NUMBER OF STEPS WITHIN RUN 300
BLOCK SIZE FOR LANCZOS PROCEDURE 7
THE EIGENVECTORS ARE SCALED SO THAT
THE GENERALIZED MASS IN EACH VECTOR IS UNITY
INITIAL STRESS AND DISPLACEMENT EFFECTS ARE
INCLUDED IN THE STIFFNESS MATRIX

THIS IS A LINEAR PERTURBATION STEP.
ALL LOADS ARE DEFINED AS CHANGE IN LOAD TO THE REFERENCE STATE

LARGE DISPLACEMENT THEORY WILL BE USED

MEMORY ESTIMATE

PROCESS	FLOATING PT OPERATIONS PER ITERATION	MINIMUM MEMORY REQUIRED (MB)	MEMORY TO MINIMIZE I/O (MB)
1	5.91E+05	18	98

NOTE:

- (1) SINCE ABAQUS DOES NOT PRE-ALLOCATE MEMORY AND ONLY ALLOCATES MEMORY AS NEEDED DURING THE ANALYSIS, THE MEMORY REQUIREMENT PRINTED HERE CAN ONLY BE VIEWED AS A GENERAL GUIDELINE BASED ON THE BEST KNOWLEDGE AVAILABLE AT THE BEGINNING OF A STEP BEFORE THE SOLUTION PROCESS HAS BEGUN.
- (2) THE ESTIMATE IS NORMALLY UPDATED AT THE BEGINNING OF EVERY STEP. IT IS THE MAXIMUM VALUE OF THE ESTIMATE FROM THE CURRENT STEP TO THE LAST STEP OF THE ANALYSIS, WITH UNSYMMETRIC SOLUTION TAKEN INTO ACCOUNT IF APPLICABLE.
- (3) SINCE THE ESTIMATE IS BASED ON THE ACTIVE DEGREES OF FREEDOM IN THE FIRST ITERATION OF THE CURRENT STEP, THE MEMORY ESTIMATE MIGHT BE SIGNIFICANTLY DIFFERENT THAN ACTUAL USAGE FOR PROBLEMS WITH SUBSTANTIAL CHANGES IN ACTIVE DEGREES OF FREEDOM BETWEEN STEPS (OR EVEN WITHIN THE SAME STEP). EXAMPLES ARE: PROBLEMS WITH SIGNIFICANT CONTACT CHANGES, PROBLEMS WITH MODEL CHANGE, PROBLEMS WITH BOTH STATIC STEP AND STEADY STATE DYNAMIC PROCEDURES WHERE ACOUSTIC ELEMENTS WILL ONLY BE ACTIVATED IN THE STEADY STATE DYNAMIC STEPS.
- (4) FOR MULTI-PROCESS EXECUTION, THE ESTIMATED VALUE OF FLOATING POINT OPERATIONS FOR EACH PROCESS IS BASED ON AN INITIAL SCHEDULING OF OPERATIONS AND MIGHT NOT REFLECT THE ACTUAL FLOATING POINT OPERATIONS COMPLETED ON EACH PROCESS. OPERATIONS ARE DYNAMICALLY BALANCED DURING EXECUTION, SO THE ACTUAL BALANCE OF OPERATIONS BETWEEN PROCESSES IS EXPECTED TO BE BETTER THAN THE ESTIMATE

PRINTED HERE.

- (5) THE UPPER LIMIT OF MEMORY THAT CAN BE ALLOCATED BY ABAQUS WILL IN GENERAL DEPEND ON THE VALUE OF THE "MEMORY" PARAMETER AND THE AMOUNT OF PHYSICAL MEMORY AVAILABLE ON THE MACHINE. PLEASE SEE THE "ABAQUS ANALYSIS USER'S MANUAL" FOR MORE DETAILS. THE ACTUAL USAGE OF MEMORY AND OF DISK SPACE FOR SCRATCH DATA WILL DEPEND ON THIS UPPER LIMIT AS WELL AS THE MEMORY REQUIRED TO MINIMIZE I/O. IF THE MEMORY UPPER LIMIT IS GREATER THAN THE MEMORY REQUIRED TO MINIMIZE I/O, THEN THE ACTUAL MEMORY USAGE WILL BE CLOSE TO THE ESTIMATED "MEMORY TO MINIMIZE I/O" VALUE, AND THE SCRATCH DISK USAGE WILL BE CLOSE-TO-ZERO; OTHERWISE, THE ACTUAL MEMORY USED WILL BE CLOSE TO THE PREVIOUSLY MENTIONED MEMORY LIMIT, AND THE SCRATCH DISK USAGE WILL BE ROUGHLY PROPORTIONAL TO THE DIFFERENCE BETWEEN THE ESTIMATED "MEMORY TO MINIMIZE I/O" AND THE MEMORY UPPER LIMIT. HOWEVER ACCURATE ESTIMATE OF THE SCRATCH DISK SPACE IS NOT POSSIBLE.
- (6) USING "*RESTART, WRITE" CAN GENERATE A LARGE AMOUNT OF DATA WRITTEN IN THE WORK DIRECTORY.

E I G E N V A L U E O U T P U T

MODE NO DAMPING	EIGENVALUE	FREQUENCY (RAD/TIME)	GENERALIZED MASS (CYCLES/TIME)	COMPOSITE MODAL	
1	14.171	3.7644	0.59912	1.0000	0.0000
2	25.006	5.0006	0.79588	1.0000	0.0000
3	25.702	5.0697	0.80686	1.0000	0.0000
4	27.030	5.1990	0.82745	1.0000	0.0000
5	27.591	5.2527	0.83600	1.0000	0.0000
6	28.023	5.2937	0.84252	1.0000	0.0000
7	28.155	5.3061	0.84450	1.0000	0.0000
8	29.012	5.3863	0.85726	1.0000	0.0000
9	29.059	5.3906	0.85794	1.0000	0.0000
10	33.840	5.8172	0.92584	1.0000	0.0000
11	33.905	5.8228	0.92673	1.0000	0.0000
12	34.842	5.9027	0.93944	1.0000	0.0000
13	34.947	5.9116	0.94086	1.0000	0.0000
14	35.124	5.9265	0.94324	1.0000	0.0000
15	36.122	6.0101	0.95654	1.0000	0.0000
16	36.189	6.0157	0.95743	1.0000	0.0000
17	37.099	6.0909	0.96939	1.0000	0.0000
18	37.229	6.1016	0.97109	1.0000	0.0000
19	44.464	6.6681	1.0613	1.0000	0.0000
20	44.803	6.6935	1.0653	1.0000	0.0000
21	52.677	7.2579	1.1551	1.0000	0.0000
22	52.682	7.2583	1.1552	1.0000	0.0000
23	60.320	7.7666	1.2361	1.0000	0.0000
24	60.354	7.7688	1.2364	1.0000	0.0000
25	62.551	7.9089	1.2587	1.0000	0.0000
26	88.631	9.4144	1.4983	1.0000	0.0000
27	89.018	9.4349	1.5016	1.0000	0.0000
28	89.525	9.4618	1.5059	1.0000	0.0000
29	89.539	9.4625	1.5060	1.0000	0.0000
30	106.28	10.309	1.6408	1.0000	0.0000
31	106.80	10.334	1.6448	1.0000	0.0000
32	107.49	10.368	1.6501	1.0000	0.0000
33	107.69	10.377	1.6516	1.0000	0.0000
34	108.03	10.394	1.6542	1.0000	0.0000

35	108.31	10.407	1.6563	1.0000	0.0000
36	108.56	10.419	1.6583	1.0000	0.0000
37	109.71	10.474	1.6670	1.0000	0.0000
38	118.82	10.900	1.7348	1.0000	0.0000
39	132.24	11.499	1.8302	1.0000	0.0000
40	132.31	11.503	1.8307	1.0000	0.0000
41	132.33	11.503	1.8308	1.0000	0.0000
42	132.97	11.531	1.8353	1.0000	0.0000
43	140.88	11.869	1.8891	1.0000	0.0000
44	141.23	11.884	1.8914	1.0000	0.0000
45	141.24	11.885	1.8915	1.0000	0.0000
46	141.69	11.903	1.8945	1.0000	0.0000
47	142.44	11.935	1.8995	1.0000	0.0000
48	188.18	13.718	2.1832	1.0000	0.0000
49	226.78	15.059	2.3968	1.0000	0.0000
50	232.30	15.242	2.4258	1.0000	0.0000
51	232.54	15.249	2.4270	1.0000	0.0000
52	232.59	15.251	2.4272	1.0000	0.0000
53	232.79	15.258	2.4283	1.0000	0.0000
54	232.98	15.264	2.4293	1.0000	0.0000
55	233.39	15.277	2.4314	1.0000	0.0000
56	233.98	15.296	2.4345	1.0000	0.0000
57	256.40	16.013	2.5485	1.0000	0.0000
58	257.45	16.045	2.5537	1.0000	0.0000
59	257.49	16.046	2.5539	1.0000	0.0000
60	257.71	16.053	2.5550	1.0000	0.0000
61	260.89	16.152	2.5707	1.0000	0.0000
62	285.46	16.896	2.6890	1.0000	0.0000
63	285.71	16.903	2.6902	1.0000	0.0000
64	285.79	16.905	2.6906	1.0000	0.0000
65	285.82	16.906	2.6907	1.0000	0.0000
66	302.71	17.399	2.7691	1.0000	0.0000
67	304.96	17.463	2.7794	1.0000	0.0000
68	305.03	17.465	2.7797	1.0000	0.0000
69	305.07	17.466	2.7798	1.0000	0.0000
70	306.21	17.499	2.7850	1.0000	0.0000
71	323.70	17.992	2.8635	1.0000	0.0000
72	339.73	18.432	2.9335	1.0000	0.0000
73	347.18	18.633	2.9655	1.0000	0.0000
74	347.27	18.635	2.9659	1.0000	0.0000
75	347.46	18.640	2.9667	1.0000	0.0000
76	348.86	18.678	2.9727	1.0000	0.0000
77	389.18	19.728	3.1397	1.0000	0.0000
78	389.48	19.735	3.1410	1.0000	0.0000
79	390.07	19.750	3.1433	1.0000	0.0000
80	390.17	19.753	3.1437	1.0000	0.0000
81	390.30	19.756	3.1443	1.0000	0.0000
82	391.14	19.777	3.1476	1.0000	0.0000
83	391.28	19.781	3.1482	1.0000	0.0000
84	393.14	19.828	3.1557	1.0000	0.0000
85	447.28	21.149	3.3660	1.0000	0.0000
86	453.88	21.304	3.3907	1.0000	0.0000
87	479.16	21.890	3.4839	1.0000	0.0000
88	479.19	21.890	3.4840	1.0000	0.0000
89	479.25	21.892	3.4842	1.0000	0.0000
90	479.64	21.901	3.4856	1.0000	0.0000
91	511.46	22.616	3.5994	1.0000	0.0000
92	511.49	22.616	3.5995	1.0000	0.0000
93	511.53	22.617	3.5996	1.0000	0.0000
94	511.73	22.621	3.6003	1.0000	0.0000
95	551.32	23.480	3.7370	1.0000	0.0000
96	563.44	23.737	3.7778	1.0000	0.0000
97	564.93	23.768	3.7828	1.0000	0.0000
98	565.15	23.773	3.7836	1.0000	0.0000
99	565.50	23.780	3.7847	1.0000	0.0000

100	565.52	23.781	3.7848	1.0000	0.0000
101	565.74	23.785	3.7855	1.0000	0.0000
102	565.91	23.789	3.7861	1.0000	0.0000
103	568.35	23.840	3.7943	1.0000	0.0000
104	620.49	24.910	3.9645	1.0000	0.0000
105	648.32	25.462	4.0524	1.0000	0.0000
106	693.97	26.343	4.1927	1.0000	0.0000
107	694.06	26.345	4.1930	1.0000	0.0000
108	694.06	26.345	4.1930	1.0000	0.0000
109	694.20	26.348	4.1934	1.0000	0.0000
110	729.56	27.010	4.2988	1.0000	0.0000
111	739.47	27.193	4.3279	1.0000	0.0000
112	740.09	27.205	4.3297	1.0000	0.0000
113	740.31	27.209	4.3304	1.0000	0.0000
114	740.67	27.215	4.3314	1.0000	0.0000
115	740.75	27.217	4.3317	1.0000	0.0000
116	740.88	27.219	4.3321	1.0000	0.0000
117	740.88	27.219	4.3321	1.0000	0.0000
118	741.00	27.221	4.3324	1.0000	0.0000
119	741.07	27.223	4.3326	1.0000	0.0000
120	741.13	27.224	4.3328	1.0000	0.0000
121	741.18	27.225	4.3329	1.0000	0.0000
122	747.84	27.347	4.3524	1.0000	0.0000
123	749.80	27.382	4.3581	1.0000	0.0000
124	750.20	27.390	4.3592	1.0000	0.0000
125	750.29	27.391	4.3595	1.0000	0.0000
126	773.64	27.814	4.4268	1.0000	0.0000
127	872.80	29.543	4.7019	1.0000	0.0000
128	897.55	29.959	4.7681	1.0000	0.0000
129	897.71	29.962	4.7686	1.0000	0.0000
130	897.87	29.965	4.7690	1.0000	0.0000
131	898.76	29.979	4.7714	1.0000	0.0000
132	900.81	30.014	4.7768	1.0000	0.0000
133	900.86	30.014	4.7769	1.0000	0.0000
134	901.09	30.018	4.7775	1.0000	0.0000
135	901.12	30.019	4.7776	1.0000	0.0000
136	909.28	30.154	4.7992	1.0000	0.0000
137	909.63	30.160	4.8001	1.0000	0.0000
138	909.66	30.160	4.8002	1.0000	0.0000
139	910.33	30.172	4.8020	1.0000	0.0000
140	969.22	31.132	4.9549	1.0000	0.0000
141	970.48	31.153	4.9581	1.0000	0.0000
142	971.05	31.162	4.9595	1.0000	0.0000
143	971.07	31.162	4.9596	1.0000	0.0000
144	971.47	31.168	4.9606	1.0000	0.0000
145	1002.6	31.663	5.0394	1.0000	0.0000
146	1004.6	31.695	5.0444	1.0000	0.0000
147	1004.7	31.697	5.0447	1.0000	0.0000
148	1008.1	31.751	5.0533	1.0000	0.0000
149	1023.2	31.988	5.0910	1.0000	0.0000
150	1023.3	31.990	5.0913	1.0000	0.0000
151	1023.6	31.994	5.0920	1.0000	0.0000
152	1023.8	31.997	5.0925	1.0000	0.0000
153	1029.2	32.081	5.1058	1.0000	0.0000
154	1029.3	32.083	5.1062	1.0000	0.0000
155	1029.3	32.083	5.1062	1.0000	0.0000
156	1029.4	32.085	5.1064	1.0000	0.0000
157	1104.1	33.228	5.2883	1.0000	0.0000
158	1104.3	33.231	5.2888	1.0000	0.0000
159	1104.4	33.232	5.2890	1.0000	0.0000
160	1104.4	33.232	5.2890	1.0000	0.0000
161	1104.9	33.240	5.2903	1.0000	0.0000
162	1105.3	33.246	5.2912	1.0000	0.0000
163	1105.3	33.246	5.2913	1.0000	0.0000
164	1105.4	33.247	5.2914	1.0000	0.0000

165	1113.1	33.363	5.3098	1.0000	0.0000
166	1113.2	33.364	5.3101	1.0000	0.0000
167	1113.2	33.364	5.3101	1.0000	0.0000
168	1113.2	33.365	5.3102	1.0000	0.0000
169	1142.4	33.799	5.3793	1.0000	0.0000
170	1163.3	34.107	5.4283	1.0000	0.0000
171	1180.0	34.351	5.4671	1.0000	0.0000
172	1180.0	34.351	5.4672	1.0000	0.0000
173	1180.1	34.352	5.4673	1.0000	0.0000
174	1181.1	34.367	5.4696	1.0000	0.0000
175	1257.6	35.463	5.6442	1.0000	0.0000
176	1258.5	35.475	5.6460	1.0000	0.0000
177	1258.9	35.481	5.6469	1.0000	0.0000
178	1259.8	35.493	5.6490	1.0000	0.0000
179	1262.0	35.525	5.6539	1.0000	0.0000
180	1262.0	35.525	5.6539	1.0000	0.0000
181	1262.0	35.525	5.6540	1.0000	0.0000
182	1262.7	35.535	5.6556	1.0000	0.0000
183	1286.8	35.872	5.7092	1.0000	0.0000
184	1347.4	36.708	5.8422	1.0000	0.0000
185	1347.5	36.708	5.8422	1.0000	0.0000
186	1347.5	36.708	5.8423	1.0000	0.0000
187	1347.8	36.712	5.8429	1.0000	0.0000
188	1363.9	36.931	5.8778	1.0000	0.0000
189	1363.9	36.931	5.8778	1.0000	0.0000
190	1363.9	36.931	5.8778	1.0000	0.0000
191	1364.0	36.933	5.8780	1.0000	0.0000
192	1456.4	38.163	6.0738	1.0000	0.0000
193	1456.4	38.163	6.0738	1.0000	0.0000
194	1456.4	38.163	6.0738	1.0000	0.0000
195	1456.4	38.163	6.0739	1.0000	0.0000
196	1530.3	39.119	6.2259	1.0000	0.0000
197	1665.8	40.814	6.4957	1.0000	0.0000
198	1823.1	42.697	6.7955	1.0000	0.0000
199	1823.2	42.700	6.7958	1.0000	0.0000
200	1823.5	42.703	6.7964	1.0000	0.0000
201	1824.0	42.708	6.7972	1.0000	0.0000
202	1945.8	44.112	7.0206	1.0000	0.0000
203	1963.0	44.305	7.0514	1.0000	0.0000
204	1988.6	44.594	7.0974	1.0000	0.0000
205	2168.6	46.568	7.4115	1.0000	0.0000
206	2168.8	46.570	7.4118	1.0000	0.0000
207	2169.4	46.576	7.4129	1.0000	0.0000
208	2170.5	46.588	7.4148	1.0000	0.0000
209	2389.7	48.884	7.7802	1.0000	0.0000
210	2389.9	48.887	7.7806	1.0000	0.0000
211	2390.0	48.887	7.7806	1.0000	0.0000
212	2390.5	48.893	7.7816	1.0000	0.0000
213	2540.6	50.405	8.0222	1.0000	0.0000
214	2904.7	53.895	8.5777	1.0000	0.0000
215	2904.9	53.897	8.5779	1.0000	0.0000
216	2905.0	53.898	8.5781	1.0000	0.0000
217	2905.0	53.898	8.5782	1.0000	0.0000
218	3081.1	55.507	8.8343	1.0000	0.0000
219	3317.9	57.601	9.1675	1.0000	0.0000
220	3318.1	57.603	9.1678	1.0000	0.0000
221	3318.1	57.603	9.1678	1.0000	0.0000
222	3318.2	57.603	9.1679	1.0000	0.0000
223	3482.6	59.013	9.3922	1.0000	0.0000
224	3587.3	59.894	9.5325	1.0000	0.0000
225	3587.3	59.894	9.5325	1.0000	0.0000
226	3587.3	59.894	9.5325	1.0000	0.0000
227	3587.4	59.895	9.5326	1.0000	0.0000
228	3635.9	60.298	9.5968	1.0000	0.0000
229	3636.2	60.301	9.5972	1.0000	0.0000

230	3636.4	60.303	9.5975	1.0000	0.0000
231	3636.7	60.305	9.5979	1.0000	0.0000
232	3760.8	61.326	9.7603	1.0000	0.0000
233	3952.7	62.871	10.006	1.0000	0.0000
234	4221.0	64.969	10.340	1.0000	0.0000
235	4320.7	65.732	10.462	1.0000	0.0000
236	4436.2	66.605	10.600	1.0000	0.0000
237	4828.6	69.488	11.059	1.0000	0.0000
238	5237.5	72.370	11.518	1.0000	0.0000
239	5256.0	72.498	11.538	1.0000	0.0000
240	5256.0	72.499	11.539	1.0000	0.0000
241	5263.8	72.552	11.547	1.0000	0.0000
242	5264.1	72.554	11.547	1.0000	0.0000
243	5264.5	72.557	11.548	1.0000	0.0000
244	5265.4	72.563	11.549	1.0000	0.0000
245	5283.8	72.690	11.569	1.0000	0.0000
246	5662.9	75.252	11.977	1.0000	0.0000
247	5739.1	75.757	12.057	1.0000	0.0000
248	6049.7	77.780	12.379	1.0000	0.0000
249	6503.2	80.642	12.835	1.0000	0.0000
250	6712.8	81.932	13.040	1.0000	0.0000

PARTICIPATION FACTORS

MODE NO	X-COMPONENT	Y-COMPONENT	Z-COMPONENT	X-ROTATION	Y-ROTATION
1	-188.30 -4.30212E-10	-3.44849E-12	988.96	7.35980E-11	-2.36342E+05
2	-3.44709E-11 1.07501E+05	542.79	1.98473E-11	-7269.0	-5.33457E-09
3	-16.065 -1.05839E-07	-5.27582E-10	31.339	5.60249E-09	-7402.9
4	-2.58947E-10 65219.	340.46	-6.61311E-11	-3673.6	8.26334E-09
5	-16.862 -1.19381E-06	-6.13565E-09	-1.8867	5.87696E-08	95.050
6	-1.25266E-11 -108.80	-10.196	-1.96907E-12	1760.4	5.32526E-09
7	67.444 6.11399E-08	3.00019E-10	90.474	1.19160E-09	-9916.0
8	1.5042 -3.20759E-06	-1.52061E-08	-146.44	-1.26112E-07	31825.
9	-4.79260E-11 -9800.7	-46.438	4.86151E-08	-383.29	-1.05057E-05
10	-8.26323E-10 -21187.	-212.35	8.40343E-11	4679.8	-1.26688E-08
11	-20.321 7.67624E-07	7.66244E-09	-4.0887	-1.69293E-07	476.99
12	-80.329 -1.79150E-06	-8.02122E-09	185.19	4.05102E-08	-25585.
13	-2.34959E-09 1.02161E+05	469.39	5.35947E-09	-2195.0	-7.40742E-07
14	-5.36864E-10 -1.92920E+05	-901.20	1.13737E-09	3054.9	-1.56158E-07
15	4.86019E-10 5871.0	134.43	-1.97266E-10	-4201.9	1.85771E-08
16	-21.846 9.36370E-08	1.82276E-09	-2.8411	-5.73305E-08	277.68
17	-70.011 3.36152E-07	1.92038E-09	150.05	8.97393E-09	-20328.
18	-2.37638E-09 -9030.3	-49.071	5.00663E-09	-328.58	-6.76696E-07
19	-104.90	4.31577E-09	71.840	4.82197E-08	-11393.

1.04724E-06					
20	3.80745E-09	106.70	-2.55123E-09	1429.8	4.00126E-07
26757.					
21	5.2353	1.03626E-08	-2.3087	1.45567E-07	-61.930
2.26177E-06					
22	-3.38582E-07	0.20576	1.50143E-07	2.1660	3.97711E-06
37.768					
23	37.338	2.28787E-08	-29.688	-1.05307E-07	2165.9
4.11485E-06					
24	1.21353E-06	-7.22178E-02	-9.50024E-07	12.666	6.94184E-05
6.0355					
25	324.21	-1.01540E-08	-237.50	-8.92979E-08	16372.
-1.49208E-06					
26	-7.25555E-09	196.32	-6.12041E-09	-6035.1	-2.45501E-06
18660.					
27	41.861	-2.86195E-09	5.9226	2.68149E-07	-148.13
1.24733E-07					
28	-3.04095E-08	22.394	-1.57384E-08	-197.92	1.36662E-06
2888.6					
29	106.41	6.51974E-09	61.507	-4.87170E-08	-5715.3
7.03216E-07					
30	2.21223E-09	621.40	7.26617E-10	-16424.	2.70574E-07
70792.					
31	3.18790E-09	117.98	-2.39023E-09	-2379.9	2.46576E-07
12503.					
32	-7.17557E-10	18.764	-1.40612E-09	-314.40	1.09602E-07
2282.3					
33	-9.5213	-6.32457E-09	-0.81139	-3.10776E-07	-82.914
1.12541E-06					
34	49.593	-5.89437E-10	-69.557	7.09633E-08	8973.1
8.91230E-08					
35	-76.205	4.64161E-10	-36.855	-9.43738E-09	6022.1
3.63052E-08					
36	8.22383E-11	-278.79	-2.52889E-10	7127.1	8.59553E-09
-28478.					
37	-10.813	-2.01986E-09	-0.84445	8.46046E-08	-332.85
-3.99035E-07					
38	-1.16508E-09	-1077.4	8.89295E-10	26660.	-9.09023E-08
-1.13958E+05					
39	149.46	-6.83911E-10	12.789	1.07680E-07	3357.6
-2.37434E-09					
40	-5.52339E-08	-0.14087	-4.23224E-09	284.10	-1.08466E-06
170.34					
41	-2.4410	1.01904E-08	-0.33064	-2.09737E-07	348.94
9.37626E-07					
42	-2.25264E-09	309.55	2.12119E-09	-4966.0	-1.43928E-07
29125.					
43	-1052.3	1.02809E-10	-41.305	2.28680E-09	-8548.0
1.28013E-08					
44	3.15434E-08	-0.35215	-2.34355E-09	281.02	3.54820E-07
162.52					
45	9.9052	1.07650E-09	0.35227	-5.94988E-08	-369.79
6.91389E-08					
46	-2.59325E-10	250.95	-2.86752E-09	-3054.8	1.62743E-07
22391.					
47	2161.4	3.90194E-10	68.145	-1.42986E-10	12292.
1.46651E-08					
48	-594.01	8.25075E-11	-432.59	-1.60245E-09	80510.
9.48074E-09					
49	-3.79183E-09	61.300	2.64210E-09	3204.9	-1.71202E-07
1529.1					
50	-1.14562E-08	-10.539	9.01697E-09	-749.88	-6.76334E-07
505.31					
51	7.1099	8.71636E-09	4.70737E-02	4.10574E-09	-37.390
1.28772E-06					

52	-5.00854E-08	-39.535	3.82220E-08	50.879	-2.69132E-06
-6034.7					
53	4.7317	-1.33088E-09	-26.418	-2.50130E-08	4830.7
-1.24386E-07					
54	11.540	-5.88404E-11	-26.957	-2.16388E-09	1581.4
-4.26228E-09					
55	-4.86123E-09	77.235	3.37024E-09	1555.6	-2.15059E-07
6018.6					
56	12.182	5.20503E-10	1.5894	1.18115E-08	-357.56
3.65624E-08					
57	7.12536E-08	-21.796	-5.24476E-08	3841.9	3.61946E-06
-3361.4					
58	-9.1516	1.55430E-09	12.782	7.54025E-09	-1302.9
1.72649E-07					
59	4.89918E-09	11.298	5.93636E-10	61.500	-6.01937E-08
1248.7					
60	94.572	-4.84974E-10	50.659	5.94430E-09	-5358.5
-5.79019E-08					
61	-3.11305E-08	238.28	2.27105E-08	7336.2	-1.56241E-06
11085.					
62	-2.46994E-09	96.700	1.85565E-09	-291.63	-1.23258E-07
4866.4					
63	-6.0344	6.03654E-09	3.3346	-1.72573E-08	-273.96
3.06990E-07					
64	-4.93718E-09	-19.153	2.13529E-08	-220.93	-1.69271E-06
-1602.6					
65	-13.253	-6.40051E-09	-42.779	-7.49388E-08	3601.3
-5.36823E-07					
66	1.05136E-08	-179.99	-7.81282E-09	-4491.2	5.44711E-07
-9757.6					
67	-5.8331	-5.26852E-09	3.4504	-4.85567E-08	-284.53
-3.36930E-07					
68	-7.81072E-09	80.123	-2.67963E-09	523.27	3.03038E-07
5506.3					
69	-12.494	-1.29383E-08	-41.560	-8.24353E-08	3569.9
-8.93746E-07					
70	-8.54828E-09	-544.74	6.12816E-09	-4569.5	-4.17736E-07
-32894.					
71	4.10532E-09	1893.0	-3.09225E-09	3737.2	2.00340E-07
1.36757E+05					
72	1.03190E-09	-9.9837	3.24109E-10	-55.021	7.14409E-08
8130.6					
73	58.533	-1.94492E-08	-25.825	4.12621E-06	3844.2
-4.15233E-06					
74	-1.36822E-08	-28.486	-8.26706E-08	-41.843	-5.49662E-06
-1095.5					
75	1.6735	-4.94612E-08	3.9760	7.43433E-06	-916.59
-1.62389E-05					
76	-1.08210E-08	-14.507	-9.09164E-09	-894.39	-3.90040E-06
226.02					
77	2.14930E-07	-1.3590	-1.80385E-06	-39.396	4.03889E-04
528.56					
78	-8.9781	-1.97660E-08	-6.1305	9.35430E-08	-2410.8
-5.74427E-06					
79	24.405	-5.37935E-08	-10.932	5.58787E-07	1194.7
-9.16432E-06					
80	-47.752	7.04274E-08	32.550	-4.20119E-07	-3930.3
1.03130E-05					
81	1.26242E-08	17.034	-5.33543E-09	200.48	-1.79618E-06
3011.2					
82	2.5351	5.16447E-08	-0.98274	-6.63597E-07	125.53
3.95642E-06					
83	-8.22518E-10	-52.044	2.41277E-08	816.38	-4.83332E-06
-1029.7					
84	1.62460E-07	2.9916	-1.36371E-06	-103.87	3.06125E-04

-70.960					
85	881.49	-2.20091E-10	-62.320	2.07637E-09	3516.5
-5.37437E-08					
86	-304.12	-2.47379E-10	136.18	2.10865E-09	6269.0
-4.38698E-08					
87	-7.82306E-09	-1.3456	9.15839E-10	-132.65	-1.07930E-07
-378.82					
88	-1.4028	1.81927E-08	0.11415	-8.67164E-08	-279.08
1.73487E-06					
89	1.28828E-09	41.107	-5.91477E-11	-228.49	1.21525E-07
3852.3					
90	116.97	-3.00331E-10	-12.509	-4.66694E-09	1092.5
-5.09506E-08					
91	1.15029E-09	-2.4238	-1.57547E-10	-145.63	2.99649E-08
-740.76					
92	-2.0085	4.54934E-09	0.26365	-4.70021E-08	-247.56
4.70484E-07					
93	8.31349E-10	-36.937	-1.90940E-10	261.52	-1.98854E-08
-3735.7					
94	66.573	1.32449E-10	-5.4057	-6.53813E-09	960.50
1.94310E-08					
95	-1.14450E-09	-35.909	5.82643E-10	-6728.8	-5.40079E-08
-69994.					
96	2.80339E-09	-0.74870	-1.22163E-09	-265.68	2.31129E-07
-2245.8					
97	-11.886	1.13574E-08	-11.618	7.52065E-08	1109.3
3.89507E-07					
98	2.5797	2.49305E-08	-4.75515E-02	6.03098E-08	-0.66524
1.82814E-07					
99	11.149	1.99763E-08	16.676	2.89192E-07	-1606.0
4.47044E-07					
100	-4.0056	1.62394E-08	-0.66489	4.64918E-08	31.359
6.44048E-07					
101	-1.85828E-08	10.380	7.13856E-09	-135.26	-9.13501E-07
2620.7					
102	-1.68666E-08	0.99669	4.53531E-09	-268.59	-7.31588E-07
-1449.3					
103	1.00811E-08	-20.037	-3.03822E-09	-2902.1	3.82099E-07
-32839.					
104	78.776	-4.89858E-10	-238.01	-2.23220E-08	25350.
-1.73746E-07					
105	-197.09	-1.47082E-09	-68.200	2.37061E-09	20926.
-1.12151E-07					
106	0.51980	-2.19684E-08	-18.660	-7.61654E-07	1706.4
1.58088E-06					
107	1.2965	-2.43519E-08	6.2564	1.05806E-06	-562.44
-8.48394E-06					
108	5.59962E-08	1.5470	-1.70871E-08	-84.331	2.82366E-06
160.78					
109	-1.49534E-08	-4.7989	1.25690E-07	112.13	-3.05599E-05
-3299.8					
110	3.90568E-10	2.3343	6.54748E-10	142.05	-1.00095E-07
3482.9					
111	-8.2997	1.59776E-08	-22.042	6.76936E-08	3130.0
1.38361E-06					
112	0.94202	1.63092E-08	0.17764	-1.93377E-07	-51.586
3.81538E-06					
113	-8.54044E-10	10.604	1.11063E-10	-237.73	3.39056E-09
3798.1					
114	7.6396	-1.43126E-09	-14.825	1.73637E-08	1245.6
-1.53479E-07					
115	-2.21601E-10	-11.003	8.28174E-10	437.25	-7.37401E-08
-2624.3					
116	8.88791E-11	-1.2082	3.53131E-09	65.212	-2.87581E-07
-29.733					

117	-0.34362	-2.66602E-09	-5.7945	3.50199E-08	471.76
	-1.48851E-07				
118	-1.5324	-1.47551E-08	-3.2444	-3.11054E-08	300.63
	-1.67935E-06				
119	-4.4022	-6.38323E-09	-11.509	-2.33528E-08	1258.8
	-6.72831E-07				
120	1.61429E-09	2.2467	3.26901E-09	-95.809	-3.53779E-07
	-1371.2				
121	1.07996E-09	-0.91292	1.72684E-09	1.4291	-1.83726E-07
	1372.9				
122	-1.37898E-10	1.5386	-2.39922E-10	-150.62	3.27083E-08
	-1330.0				
123	18.161	6.66400E-11	17.678	-1.59150E-09	-2034.2
	7.14069E-09				
124	1.70164E-10	-15.952	4.03844E-10	424.05	-5.68124E-08
	-4472.9				
125	1.5680	1.47673E-09	4.8810	-2.96633E-08	-704.63
	3.41927E-07				
126	-9.69778E-12	-5.7612	-3.76619E-11	32.720	4.77849E-09
	-5313.9				
127	-165.39	-2.67386E-11	-88.385	4.33293E-10	3193.3
	-1.62833E-08				
128	-22.278	-2.86771E-08	-24.419	1.10674E-07	3091.4
	-2.07977E-06				
129	1.10509E-09	8.9400	1.43660E-08	-489.51	3.22793E-06
	1195.1				
130	-10.370	-1.73592E-08	-10.002	1.41043E-07	1083.5
	-1.33060E-06				
131	-4.75906E-09	-0.63142	-2.88040E-08	21.545	-2.74288E-06
	-490.46				
132	2.05734E-08	2.1165	1.06344E-07	-283.73	9.74990E-06
	1480.4				
133	0.95463	-1.41340E-07	3.7867	1.43760E-06	-470.90
	-1.66484E-05				
134	-3.37039E-08	0.88668	1.75563E-07	-74.965	1.41903E-05
	582.65				
135	-11.422	5.27002E-08	4.5009	1.77681E-07	-1306.4
	1.86180E-06				
136	1.32041E-08	-8.7684	4.31207E-08	613.12	9.54671E-06
	-1930.2				
137	8.97091E-09	0.79060	2.77272E-08	-76.505	7.63010E-06
	60.584				
138	0.14195	2.29560E-07	-0.12576	-4.13145E-07	-142.64
	2.02793E-05				
139	-16.088	-4.02621E-08	-8.9710	2.71393E-07	758.44
	-4.56267E-06				
140	-75.423	-2.78189E-11	-262.53	1.69603E-09	38338.
	-6.89494E-09				
141	-2.07312E-11	-10.920	-8.27095E-11	831.83	1.05212E-08
	-2559.9				
142	9.03815E-10	-1.1140	2.86203E-09	77.067	-4.39110E-07
	-91.170				
143	0.30571	-2.96160E-10	1.4571	2.17080E-08	-66.716
	-5.12781E-08				
144	-21.290	-1.71021E-11	-67.482	8.35271E-10	10008.
	2.15707E-09				
145	-1.62901E-11	-54.733	-4.72204E-11	1523.3	8.35478E-09
	-7701.5				
146	-1.60893E-10	1.1007	-2.59635E-10	103.22	4.26895E-08
	-350.44				
147	1.26288E-02	-3.12255E-11	0.12082	7.17144E-09	-183.16
	-3.11539E-08				
148	-11.746	-1.05336E-11	-32.221	6.68267E-10	3687.7
	-1.38714E-09				
149	9.49871E-11	3.4524	-1.52497E-10	-442.37	1.79332E-08

1772.3					
150	-7.33375E-02	1.09476E-09	0.58945	-1.25613E-07	-86.005
4.94234E-07					
151	-1.56521E-09	0.15003	-4.09516E-09	-8.7495	4.64069E-07
153.56					
152	-8.7688	1.64322E-10	-23.938	-1.09630E-08	2689.1
1.56985E-08					
153	6.89473E-11	8.6208	2.62954E-11	-425.23	1.30684E-09
1478.9					
154	-0.43645	2.32916E-09	-1.3826	-1.58189E-07	175.75
5.59427E-07					
155	-1.06637E-09	0.62221	1.77830E-09	20.868	-3.17586E-07
-119.63					
156	-1.6695	-1.10952E-09	7.3326	5.74811E-08	-1226.6
-1.77268E-07					
157	-2.08168E-09	9.7683	-1.08846E-09	-871.17	1.42568E-07
2630.4					
158	5.29573E-02	-4.23258E-09	1.0075	2.49488E-07	-67.649
-8.87852E-07					
159	0.66412	5.17224E-09	13.129	-3.83312E-07	-610.91
1.48483E-06					
160	3.41613E-10	0.27902	-3.72238E-08	-30.866	1.61730E-06
165.84					
161	-3.90483E-09	11.955	-1.75602E-09	-829.64	2.64350E-07
3017.2					
162	-3.91609E-09	1.2483	-2.77570E-08	-27.208	1.55369E-06
17.146					
163	-7.70683E-02	5.50211E-10	-4.6532	-1.67358E-07	234.92
7.48748E-07					
164	-3.3613	-4.84118E-09	-18.305	2.75670E-07	1075.5
-8.60883E-07					
165	4.74488E-09	-0.56331	2.26092E-09	-538.44	-3.69594E-07
1265.3					
166	-1.38291E-09	-0.32552	-2.63125E-09	18.198	1.54209E-07
-106.43					
167	4.65789E-02	-4.13756E-09	0.12132	-4.84534E-07	-21.511
8.42937E-07					
168	0.13154	2.52664E-09	0.36265	-1.70730E-07	-14.627
3.31109E-07					
169	-52.878	3.41621E-10	528.19	-5.47196E-09	18097.
3.67489E-08					
170	-1.89659E-10	-20.257	1.31323E-09	-10295.	-3.79810E-09
21828.					
171	-3.08399E-10	-5.1428	5.36210E-09	-16.164	-2.86284E-07
-237.65					
172	-0.17456	1.58897E-09	-4.0568	-3.27740E-07	298.16
8.77858E-07					
173	2.9428	9.90423E-10	17.375	2.03234E-08	-1189.2
-7.97888E-09					
174	-1.97812E-10	34.353	-3.86060E-10	2571.2	2.28000E-08
-3028.6					
175	3.20671E-10	-7.1240	-7.43809E-10	106.24	-1.69849E-07
-594.42					
176	0.71440	-1.47899E-09	0.56761	2.73649E-07	-279.71
-7.71384E-07					
177	-0.33689	-1.62030E-09	4.2436	9.01186E-08	927.88
-2.03508E-07					
178	2.66334E-10	13.812	2.58006E-10	-1303.5	-4.87566E-09
4712.6					
179	-4.31043E-09	-4.9596	2.30661E-08	73.085	-2.03744E-06
-453.32					
180	5.54690E-02	-1.49221E-08	-0.73807	5.67948E-07	81.500
-2.16212E-06					
181	-0.87316	2.57162E-08	4.5088	-4.00814E-07	-396.29
2.49186E-06					

182	3.78557E-10	-29.318	4.94521E-10	-787.75	3.11138E-08
-191.26					
183	1.97870E-10	446.48	4.28169E-10	-5942.0	-5.35775E-09
48541.					
184	-5.78991E-08	2.0067	2.80147E-08	16.187	-9.51469E-06
214.84					
185	-7.43493E-02	-5.85384E-10	0.20561	-5.37392E-08	-94.473
-2.59345E-06					
186	0.93007	-3.80889E-08	-1.9615	6.91312E-07	413.43
-2.14328E-06					
187	-3.21002E-08	9.3525	1.90626E-08	-524.24	-6.39491E-06
2042.4					
188	2.30036E-08	0.23425	-8.00573E-08	16.715	4.19444E-06
26.708					
189	3.60174E-02	4.23120E-08	1.1068	6.15742E-07	-103.43
6.03065E-06					
190	-0.66176	-9.85982E-09	-4.8266	-1.32075E-07	430.09
-1.02365E-05					
191	-4.26790E-07	13.434	2.17040E-07	-279.04	-8.79779E-05
1733.0					
192	1.66599E-08	-0.19396	8.42685E-08	-15.930	-8.33242E-06
-27.399					
193	3.52522E-02	6.26249E-09	1.6048	9.84589E-08	-132.61
1.23550E-06					
194	0.54558	-1.45437E-08	6.2474	-5.84919E-08	-505.15
-9.73029E-07					
195	-5.43928E-07	5.7951	1.71021E-07	-143.54	-1.14065E-04
840.90					
196	2.51024E-06	-13.302	1.43763E-06	-716.91	-2.39871E-04
1090.8					
197	-93.128	1.16136E-05	1336.7	-6.43023E-04	-1.06033E+05
1.18466E-04					
198	-0.14406	-4.43064E-10	-4.8605	4.02508E-09	370.51
-1.09186E-08					
199	-1.6736	-1.22680E-10	14.506	-3.71707E-09	-1089.2
1.45290E-09					
200	-8.14613E-09	-14.127	1.17602E-07	228.24	-9.32422E-06
-398.08					
201	-6.31628E-09	-8.7357	9.04808E-08	58.010	-7.17289E-06
-375.19					
202	-5.56812E-10	-0.74003	7.94140E-09	1.5672	-6.31644E-07
5261.5					
203	39.620	1.95170E-10	525.86	7.05015E-10	-34965.
-3.93481E-08					
204	7.23294E-09	-159.71	-1.01950E-07	713.12	8.10582E-06
21336.					
205	2.14375E-08	-0.66868	-2.89012E-07	-94.598	2.27344E-05
-309.80					
206	0.12428	1.59909E-09	5.5593	4.16082E-08	-637.32
1.40880E-07					
207	2.2710	-2.80384E-09	14.809	-1.06449E-07	-1609.8
2.82304E-07					
208	-1.00945E-07	3.3844	1.45019E-06	-157.95	-1.15024E-04
902.16					
209	2.58731E-07	-0.94139	-3.73314E-06	-28.757	2.95111E-04
-128.10					
210	0.12890	-3.48442E-09	2.2987	-6.57477E-07	-307.48
7.48313E-07					
211	1.5110	-1.09640E-08	-9.5485	-1.06709E-06	1307.8
1.81578E-06					
212	-1.41664E-06	-2.6679	2.03396E-05	38.830	-1.61339E-03
848.71					
213	-8.19152E-08	-4.5678	1.17580E-06	-19.087	-9.32680E-05
200.59					
214	-11.298	-6.21898E-08	-2.4437	-3.20122E-06	112.15

4.67405E-06					
215	-1.0911	1.44959E-08	-0.59737	1.19668E-06	83.522
-2.37553E-06					
216	3.46884E-07	0.34796	-4.98255E-06	-8.2823	3.95227E-04
154.25					
217	-9.20123E-07	-2.0357	1.32050E-05	-13.831	-1.04745E-03
-468.87					
218	416.71	1.54639E-08	172.11	3.51294E-07	-17730.
1.09263E-07					
219	-6.3181	2.06722E-08	15.589	7.35052E-07	-2277.9
-4.16216E-07					
220	0.38201	1.29650E-08	0.42955	-2.79118E-07	-61.258
4.39618E-06					
221	-3.97244E-06	-0.83483	5.69282E-05	1.77420E-02	-4.51793E-03
-196.66					
222	-6.18312E-07	-0.81105	8.93781E-06	33.045	-7.08839E-04
-367.21					
223	77.902	1.53493E-08	-360.73	8.78115E-07	55279.
-1.40750E-06					
224	2.11022E-06	-0.55986	-3.03087E-05	-10.462	2.40373E-03
-95.590					
225	0.18284	-1.72227E-08	0.59046	-5.82319E-07	-78.251
-2.37355E-07					
226	8.85540E-08	0.75546	-1.26306E-06	23.790	9.99577E-05
156.08					
227	-3.2286	1.28575E-08	9.6534	3.70634E-07	-1486.4
-1.02294E-07					
228	-1.52792E-07	2.8248	2.18453E-06	116.74	-1.73268E-04
177.78					
229	3.9031	1.14407E-09	2.6938	1.55825E-07	-383.40
-3.43154E-07					
230	14.515	1.27961E-09	4.6134	-2.59996E-07	-603.82
8.40850E-07					
231	1.72749E-06	-0.79507	-2.47969E-05	244.92	1.96695E-03
-795.99					
232	2.69574E-07	1.0033	-3.86931E-06	-1158.7	3.06923E-04
258.87					
233	-257.76	5.00533E-09	48.457	3.37845E-07	-3678.2
-6.04311E-07					
234	5.74844E-07	178.15	-8.25241E-06	-6235.9	6.54597E-04
35115.					
235	-3.55344E-07	-1.1938	5.10055E-06	-2.6096	-4.04591E-04
3209.8					
236	-4.31792E-07	127.58	6.20008E-06	7841.8	-4.91794E-04
19213.					
237	301.36	2.86894E-09	-301.22	1.54748E-07	41705.
-2.86425E-07					
238	-146.27	-3.09782E-09	-195.37	-2.61900E-07	16076.
4.64898E-07					
239	2.22160E-08	-0.25402	-3.20881E-07	-4.8446	2.54428E-05
-23.131					
240	0.41666	-7.47116E-10	0.55273	6.23602E-08	-46.642
-2.99076E-08					
241	1.33990E-07	1.4009	-1.92067E-06	32.760	1.52238E-04
-243.90					
242	3.4186	-8.55221E-09	-5.0495	-2.89014E-07	746.10
1.90454E-07					
243	10.588	-1.27348E-09	-0.86011	-5.81138E-09	625.00
-6.91744E-08					
244	2.51150E-07	0.32684	-3.60466E-06	290.73	2.86023E-04
-243.16					
245	4.16475E-07	-10.883	-5.98212E-06	34.038	4.74517E-04
-1144.7					
246	63.106	1.16998E-08	197.03	3.90432E-07	-12888.
-3.32207E-07					

247	284.59	6.67808E-09	-218.30	3.08906E-07	28444.
	-3.90622E-07				
248	7.33961E-07	83.452	-1.05754E-05	-1365.9	8.38995E-04
	-7587.0				
249	98.256	-3.09143E-08	1177.3	-1.51895E-06	-1.47491E+05
	-4.88030E-07				
250	1.48996E-07	146.22	1.44534E-06	-1254.2	-1.19367E-04
	-9560.1				

E F F E C T I V E M A S S

MODE NO	X-COMPONENT	Y-COMPONENT	Z-COMPONENT	X-ROTATION	Y-ROTATION
1	35457.	1.18921E-23	9.78048E+05	5.41667E-21	5.58577E+10
	1.85083E-19				
2	1.18824E-21	2.94618E+05	3.93917E-22	5.28381E+07	2.84576E-17
	1.15564E+10				
3	258.10	2.78343E-19	982.13	3.13879E-17	5.48035E+07
	1.12020E-14				
4	6.70535E-20	1.15911E+05	4.37332E-21	1.34956E+07	6.82827E-17
	4.25351E+09				
5	284.33	3.76462E-17	3.5597	3.45386E-15	9034.5
	1.42518E-12				
6	1.56916E-22	103.95	3.87725E-24	3.09915E+06	2.83584E-17
	11836.				
7	4548.7	9.00114E-20	8185.6	1.41990E-18	9.83262E+07
	3.73808E-15				
8	2.2627	2.31226E-16	21445.	1.59041E-14	1.01285E+09
	1.02886E-11				
9	2.29690E-21	2156.5	2.36342E-15	1.46915E+05	1.10369E-10
	9.60546E+07				
10	6.82810E-19	45092.	7.06176E-21	2.19002E+07	1.60499E-16
	4.48904E+08				
11	412.93	5.87130E-17	16.718	2.86601E-14	2.27518E+05
	5.89247E-13				
12	6452.7	6.43399E-17	34295.	1.64108E-15	6.54569E+08
	3.20946E-12				
13	5.52055E-18	2.20326E+05	2.87239E-17	4.81797E+06	5.48699E-13
	1.04368E+10				
14	2.88223E-19	8.12159E+05	1.29362E-18	9.33224E+06	2.43853E-14
	3.72181E+10				
15	2.36215E-19	18072.	3.89140E-20	1.76558E+07	3.45107E-16
	3.44690E+07				
16	477.26	3.32246E-18	8.0719	3.28678E-15	77107.
	8.76789E-15				
17	4901.5	3.68787E-18	22516.	8.05314E-17	4.13213E+08
	1.12998E-13				
18	5.64719E-18	2408.0	2.50663E-17	1.07968E+05	4.57917E-13
	8.15456E+07				
19	11003.	1.86259E-17	5161.0	2.32514E-15	1.29797E+08
	1.09672E-12				
20	1.44966E-17	11385.	6.50879E-18	2.04442E+06	1.60101E-13
	7.15952E+08				
21	27.408	1.07383E-16	5.3302	2.11898E-14	3835.3
	5.11561E-12				
22	1.14638E-13	4.23380E-02	2.25430E-14	4.6917	1.58174E-11
	1426.4				
23	1394.2	5.23435E-16	881.39	1.10897E-14	4.69133E+06
	1.69320E-11				
24	1.47266E-12	5.21541E-03	9.02546E-13	160.43	4.81892E-09
	36.427				
25	1.05109E+05	1.03104E-16	56406.	7.97411E-15	2.68031E+08
	2.22631E-12				

26	5.26430E-17	38543.	3.74594E-17	3.64224E+07	6.02705E-12
	3.48194E+08				
27	1752.3	8.19077E-18	35.077	7.19040E-14	21943.
	1.55582E-14				
28	9.24739E-16	501.49	2.47696E-16	39171.	1.86765E-12
	8.34428E+06				
29	11324.	4.25070E-17	3783.1	2.37335E-15	3.26641E+07
	4.94512E-13				
30	4.89395E-18	3.86142E+05	5.27972E-19	2.69732E+08	7.32103E-14
	5.01153E+09				
31	1.01627E-17	13919.	5.71319E-18	5.66410E+06	6.07999E-14
	1.56336E+08				
32	5.14888E-19	352.10	1.97717E-18	98849.	1.20127E-14
	5.20906E+06				
33	90.655	4.00002E-17	0.65835	9.65814E-14	6874.8
	1.26655E-12				
34	2459.5	3.47435E-19	4838.2	5.03580E-15	8.05163E+07
	7.94291E-15				
35	5807.2	2.15445E-19	1358.3	8.90642E-17	3.62654E+07
	1.31807E-15				
36	6.76314E-21	77721.	6.39528E-20	5.07952E+07	7.38832E-17
	8.11011E+08				
37	116.93	4.07985E-18	0.71310	7.15794E-15	1.10788E+05
	1.59229E-13				
38	1.35741E-18	1.16082E+06	7.90846E-19	7.10740E+08	8.26323E-15
	1.29864E+10				
39	22339.	4.67734E-19	163.56	1.15949E-14	1.12733E+07
	5.63747E-18				
40	3.05078E-15	1.98446E-02	1.79118E-17	80712.	1.17648E-12
	29014.				
41	5.9584	1.03844E-16	0.10932	4.39897E-14	1.21758E+05
	8.79142E-13				
42	5.07441E-18	95824.	4.49946E-18	2.46607E+07	2.07153E-14
	8.48242E+08				
43	1.10734E+06	1.05696E-20	1706.1	5.22945E-18	7.30691E+07
	1.63874E-16				
44	9.94984E-16	0.12401	5.49221E-18	78974.	1.25897E-13
	26412.				
45	98.113	1.15885E-18	0.12409	3.54011E-15	1.36748E+05
	4.78018E-15				
46	6.72496E-20	62977.	8.22268E-18	9.33187E+06	2.64853E-14
	5.01335E+08				
47	4.67178E+06	1.52251E-19	4643.7	2.04450E-20	1.51095E+08
	2.15064E-16				
48	3.52848E+05	6.80750E-21	1.87137E+05	2.56783E-18	6.48184E+09
	8.98844E-17				
49	1.43780E-17	3757.7	6.98069E-18	1.02716E+07	2.93102E-14
	2.33802E+06				
50	1.31244E-16	111.08	8.13058E-17	5.62315E+05	4.57428E-13
	2.55337E+05				
51	50.551	7.59749E-17	2.21593E-03	1.68571E-17	1398.0
	1.65823E-12				
52	2.50855E-15	1563.0	1.46092E-15	2588.6	7.24321E-12
	3.64179E+07				
53	22.389	1.77123E-18	697.89	6.25648E-16	2.33353E+07
	1.54719E-14				
54	133.17	3.46220E-21	726.69	4.68239E-18	2.50081E+06
	1.81671E-17				
55	2.36316E-17	5965.3	1.13585E-17	2.41987E+06	4.62502E-14
	3.62233E+07				
56	148.40	2.70923E-19	2.5261	1.39512E-16	1.27848E+05
	1.33681E-15				
57	5.07708E-15	475.07	2.75075E-15	1.47606E+07	1.31005E-11
	1.12992E+07				
58	83.753	2.41584E-18	163.39	5.68553E-17	1.69756E+06

2.98075E-14					
59	2.40019E-17	127.64	3.52404E-19	3782.3	3.62328E-15
	1.55917E+06				
60	8943.9	2.35200E-19	2566.4	3.53347E-17	2.87138E+07
	3.35263E-15				
61	9.69110E-16	56780.	5.15766E-16	5.38196E+07	2.44113E-12
	1.22867E+08				
62	6.10060E-18	9350.8	3.44345E-18	85048.	1.51924E-14
	2.36814E+07				
63	36.414	3.64398E-17	11.120	2.97814E-16	75053.
	9.42426E-14				
64	2.43758E-17	366.82	4.55945E-16	48811.	2.86528E-12
	2.56824E+06				
65	175.64	4.09665E-17	1830.1	5.61582E-15	1.29696E+07
	2.88179E-13				
66	1.10535E-16	32397.	6.10402E-17	2.01708E+07	2.96711E-13
	9.52101E+07				
67	34.025	2.77573E-17	11.905	2.35775E-15	80956.
	1.13522E-13				
68	6.10074E-17	6419.7	7.18040E-18	2.73811E+05	9.18319E-14
	3.03189E+07				
69	156.11	1.67400E-16	1727.2	6.79558E-15	1.27441E+07
	7.98781E-13				
70	7.30730E-17	2.96746E+05	3.75543E-17	2.08799E+07	1.74503E-13
	1.08199E+09				
71	1.68536E-17	3.58353E+06	9.56199E-18	1.39665E+07	4.01361E-14
	1.87025E+10				
72	1.06481E-18	99.674	1.05047E-19	3027.3	5.10380E-15
	6.61071E+07				
73	3426.1	3.78273E-16	666.96	1.70256E-11	1.47777E+07
	1.72418E-11				
74	1.87204E-16	811.43	6.83443E-15	1750.8	3.02128E-11
	1.20010E+06				
75	2.8005	2.44641E-15	15.808	5.52692E-11	8.40136E+05
	2.63701E-10				
76	1.17093E-16	210.44	8.26579E-17	7.99939E+05	1.52131E-11
	51086.				
77	4.61950E-14	1.8469	3.25387E-12	1552.1	1.63126E-07
	2.79380E+05				
78	80.607	3.90695E-16	37.583	8.75028E-15	5.81185E+06
	3.29966E-11				
79	595.60	2.89374E-15	119.50	3.12243E-13	1.42742E+06
	8.39849E-11				
80	2280.2	4.96002E-15	1059.5	1.76500E-13	1.54476E+07
	1.06358E-10				
81	1.59370E-16	290.15	2.84669E-17	40194.	3.22627E-12
	9.06727E+06				
82	6.4266	2.66717E-15	0.96577	4.40361E-13	15757.
	1.56533E-11				
83	6.76536E-19	2708.6	5.82145E-16	6.66478E+05	2.33610E-11
	1.06030E+06				
84	2.63934E-14	8.9495	1.85970E-12	10790.	9.37125E-08
	5035.4				
85	7.77028E+05	4.84402E-20	3883.7	4.31129E-18	1.23658E+07
	2.88839E-15				
86	92487.	6.11963E-20	18545.	4.44642E-18	3.93009E+07
	1.92456E-15				
87	6.12002E-17	1.8106	8.38761E-19	17596.	1.16489E-14
	1.43503E+05				
88	1.9679	3.30973E-16	1.30304E-02	7.51973E-15	77886.
	3.00979E-12				
89	1.65966E-18	1689.8	3.49845E-21	52209.	1.47684E-14
	1.48398E+07				
90	13682.	9.01985E-20	156.49	2.17803E-17	1.19358E+06
	2.59596E-15				

91	1.32317E-18 5.48731E+05	5.8749	2.48210E-20	21208.	8.97895E-16
92	4.0339 2.21356E-13	2.06965E-17	6.95092E-02	2.20919E-15	61288.
93	6.91142E-19 1.39555E+07	1364.3	3.64581E-20	68394.	3.95431E-16
94	4432.0 3.77564E-16	1.75427E-20	29.222	4.27471E-17	9.22553E+05
95	1.30987E-18 4.89911E+09	1289.4	3.39473E-19	4.52773E+07	2.91685E-15
96	7.85898E-18 5.04345E+06	0.56056	1.49237E-18	70585.	5.34206E-14
97	141.27 1.51716E-13	1.28990E-16	134.98	5.65602E-15	1.23045E+06
98	6.6550 3.34209E-14	6.21528E-16	2.26115E-03	3.63727E-15	0.44255
99	124.30 1.99848E-13	3.99053E-16	278.08	8.36319E-14	2.57934E+06
100	16.045 4.14797E-13	2.63718E-16	0.44208	2.16149E-15	983.38
101	3.45321E-16 6.86797E+06	107.75	5.09591E-17	18296.	8.34484E-13
102	2.84481E-16 2.10037E+06	0.99340	2.05691E-17	72142.	5.35220E-13
103	1.01629E-16 1.07837E+09	401.49	9.23079E-18	8.42221E+06	1.46000E-13
104	6205.7 3.01878E-14	2.39961E-19	56650.	4.98272E-16	6.42611E+08
105	38846. 1.25778E-14	2.16330E-18	4651.2	5.61979E-18	4.37896E+08
106	0.27019 2.49917E-12	4.82612E-16	348.20	5.80118E-13	2.91164E+06
107	1.6808 7.19773E-11	5.93013E-16	39.142	1.11950E-12	3.16341E+05
108	3.13557E-15 25849.	2.3931	2.91970E-16	7111.7	7.97305E-12
109	2.23603E-16 1.08885E+07	23.029	1.57980E-14	12573.	9.33907E-10
110	1.52544E-19 1.21303E+07	5.4491	4.28695E-19	20179.	1.00190E-14
111	68.885 1.91439E-12	2.55285E-16	485.87	4.58243E-15	9.79683E+06
112	0.88741 1.45571E-11	2.65990E-16	3.15544E-02	3.73945E-14	2661.2
113	7.29391E-19 1.44257E+07	112.43	1.23350E-20	56518.	1.14959E-17
114	58.364 2.35557E-14	2.04849E-18	219.79	3.01499E-16	1.55143E+06
115	4.91070E-20 6.88712E+06	121.08	6.85872E-19	1.91191E+05	5.43760E-15
116	7.89949E-21 884.03	1.4597	1.24702E-17	4252.7	8.27030E-14
117	0.11808 2.21567E-14	7.10768E-18	33.576	1.22639E-15	2.22556E+05
118	2.3482 2.82022E-12	2.17714E-16	10.526	9.67549E-16	90381.
119	19.379 4.52702E-13	4.07456E-17	132.46	5.45355E-16	1.58469E+06
120	2.60593E-18 1.88018E+06	5.0478	1.06864E-17	9179.4	1.25160E-13
121	1.16632E-18 1.88472E+06	0.83342	2.98198E-18	2.0424	3.37553E-14
122	1.90157E-20 1.76898E+06	2.3672	5.75628E-20	22685.	1.06983E-15
123	329.83	4.44089E-21	312.51	2.53287E-18	4.13799E+06

5.09895E-17					
124	2.89558E-20	254.46	1.63090E-19	1.79819E+05	3.22765E-15
2.00070E+07					
125	2.4586	2.18073E-18	23.824	8.79909E-16	4.96499E+05
1.16914E-13					
126	9.40470E-23	33.192	1.41842E-21	1070.6	2.28339E-17
2.82376E+07					
127	27355.	7.14953E-22	7811.8	1.87742E-19	1.01971E+07
2.65145E-16					
128	496.32	8.22375E-16	596.28	1.22487E-14	9.55660E+06
4.32544E-12					
129	1.22122E-18	79.924	2.06383E-16	2.39623E+05	1.04195E-11
1.42815E+06					
130	107.54	3.01343E-16	100.05	1.98932E-14	1.17404E+06
1.77050E-12					
131	2.26487E-17	0.39869	8.29672E-16	464.20	7.52340E-12
2.40556E+05					
132	4.23266E-16	4.4796	1.13090E-14	80504.	9.50606E-11
2.19147E+06					
133	0.91131	1.99771E-14	14.339	2.06668E-12	2.21746E+05
2.77169E-10					
134	1.13595E-15	0.78620	3.08225E-14	5619.7	2.01364E-10
3.39480E+05					
135	130.46	2.77731E-15	20.258	3.15705E-14	1.70657E+06
3.46629E-12					
136	1.74348E-16	76.885	1.85940E-15	3.75914E+05	9.11396E-11
3.72574E+06					
137	8.04773E-17	0.62504	7.68796E-16	5853.1	5.82184E-11
3670.4					
138	2.01511E-02	5.26979E-14	1.58161E-02	1.70689E-13	20346.
4.11248E-10					
139	258.82	1.62103E-15	80.479	7.36544E-14	5.75233E+05
2.08180E-11					
140	5688.6	7.73889E-22	68923.	2.87652E-18	1.46980E+09
4.75401E-17					
141	4.29782E-22	119.26	6.84085E-21	6.91941E+05	1.10695E-16
6.55317E+06					
142	8.16881E-19	1.2410	8.19120E-18	5939.3	1.92818E-13
8312.0					
143	9.34614E-02	8.77105E-20	2.1230	4.71238E-16	4451.0
2.62944E-15					
144	453.28	2.92482E-22	4553.9	6.97678E-19	1.00154E+08
4.65293E-18					
145	2.65366E-22	2995.7	2.22977E-21	2.32052E+06	6.98023E-17
5.93138E+07					
146	2.58865E-20	1.2115	6.74102E-20	10654.	1.82239E-15
1.22806E+05					
147	1.59487E-04	9.75032E-22	1.45970E-02	5.14295E-17	33549.
9.70566E-16					
148	137.97	1.10957E-22	1038.2	4.46581E-19	1.35989E+07
1.92417E-18					
149	9.02255E-21	11.919	2.32554E-20	1.95694E+05	3.21600E-16
3.14120E+06					
150	5.37839E-03	1.19850E-18	0.34745	1.57787E-14	7396.8
2.44267E-13					
151	2.44989E-18	2.25096E-02	1.67703E-17	76.553	2.15360E-13
23582.					
152	76.891	2.70016E-20	573.02	1.20186E-16	7.23145E+06
2.46441E-16					
153	4.75373E-21	74.318	6.91446E-22	1.80817E+05	1.70783E-18
2.18707E+06					
154	0.19049	5.42498E-18	1.9115	2.50236E-14	30887.
3.12959E-13					
155	1.13714E-18	0.38715	3.16235E-18	435.46	1.00861E-13
14311.					

156	2.7871	1.23103E-18	53.767	3.30408E-15	1.50462E+06
3.14240E-14					
157	4.33341E-18	95.420	1.18474E-18	7.58939E+05	2.03256E-14
6.91882E+06					
158	2.80447E-03	1.79148E-17	1.0150	6.22443E-14	4576.4
7.88281E-13					
159	0.44106	2.67520E-17	172.38	1.46928E-13	3.73211E+05
2.20471E-12					
160	1.16700E-19	7.78534E-02	1.38561E-15	952.69	2.61566E-12
27502.					
161	1.52477E-17	142.91	3.08362E-18	6.88300E+05	6.98807E-14
9.10371E+06					
162	1.53358E-17	1.5583	7.70450E-16	740.27	2.41397E-12
293.97					
163	5.93952E-03	3.02732E-19	21.652	2.80088E-14	55187.
5.60624E-13					
164	11.298	2.34370E-17	335.07	7.59942E-14	1.15663E+06
7.41120E-13					
165	2.25139E-17	0.31732	5.11175E-18	2.89921E+05	1.36600E-13
1.60090E+06					
166	1.91245E-18	0.10596	6.92349E-18	331.15	2.37805E-14
11327.					
167	2.16959E-03	1.71194E-17	1.47196E-02	2.34773E-13	462.74
7.10543E-13					
168	1.73022E-02	6.38391E-18	0.13151	2.91486E-14	213.95
1.09633E-13					
169	2796.1	1.16705E-19	2.78984E+05	2.99424E-17	3.27491E+08
1.35048E-15					
170	3.59705E-20	410.36	1.72458E-18	1.05987E+08	1.44255E-17
4.76447E+08					
171	9.51099E-20	26.449	2.87521E-17	261.29	8.19586E-14
56479.					
172	3.04729E-02	2.52482E-18	16.458	1.07414E-13	88901.
7.70635E-13					
173	8.6602	9.80937E-19	301.90	4.13039E-16	1.41419E+06
6.36626E-17					
174	3.91294E-20	1180.1	1.49042E-19	6.61090E+06	5.19838E-16
9.17259E+06					
175	1.02830E-19	50.752	5.53252E-19	11287.	2.88485E-14
3.53334E+05					
176	0.51037	2.18741E-18	0.32218	7.48835E-14	78237.
5.95034E-13					
177	0.11350	2.62537E-18	18.008	8.12137E-15	8.60971E+05
4.14154E-14					
178	7.09336E-20	190.76	6.65670E-20	1.69907E+06	2.37720E-17
2.22090E+07					
179	1.85798E-17	24.598	5.32044E-16	5341.5	4.15117E-12
2.05496E+05					
180	3.07681E-03	2.22670E-16	0.54475	3.22565E-13	6642.2
4.67477E-12					
181	0.76240	6.61324E-16	20.330	1.60652E-13	1.57045E+05
6.20937E-12					
182	1.43306E-19	859.53	2.44551E-19	6.20544E+05	9.68068E-16
36580.					
183	3.91526E-20	1.99343E+05	1.83328E-19	3.53076E+07	2.87055E-17
2.35624E+09					
184	3.35230E-15	4.0268	7.84822E-16	262.01	9.05293E-11
46157.					
185	5.52781E-03	3.42675E-19	4.22742E-02	2.88790E-15	8925.1
6.72598E-12					
186	0.86504	1.45077E-15	3.8476	4.77912E-13	1.70921E+05
4.59367E-12					
187	1.03042E-15	87.469	3.63382E-16	2.74826E+05	4.08949E-11
4.17127E+06					
188	5.29164E-16	5.48727E-02	6.40917E-15	279.41	1.75933E-11

713.33					
189	1.29725E-03	1.79030E-15	1.2251	3.79139E-13	10697.
3.63687E-11					
190	0.43792	9.72160E-17	23.296	1.74439E-14	1.84980E+05
1.04785E-10					
191	1.82149E-13	180.46	4.71064E-14	77862.	7.74011E-09
3.00320E+06					
192	2.77552E-16	3.76208E-02	7.10118E-15	253.76	6.94292E-11
750.71					
193	1.24272E-03	3.92187E-17	2.5754	9.69416E-15	17585.
1.52647E-12					
194	0.29766	2.11518E-16	39.030	3.42130E-15	2.55173E+05
9.46786E-13					
195	2.95858E-13	33.583	2.92482E-14	20604.	1.30109E-08
7.07114E+05					
196	6.30130E-12	176.94	2.06678E-12	5.13960E+05	5.75379E-08
1.18978E+06					
197	8672.8	1.34876E-10	1.78686E+06	4.13479E-07	1.12429E+10
1.40341E-08					
198	2.07535E-02	1.96306E-19	23.624	1.62013E-17	1.37281E+05
1.19215E-16					
199	2.8008	1.50504E-20	210.43	1.38166E-17	1.18632E+06
2.11092E-18					
200	6.63595E-17	199.57	1.38301E-14	52094.	8.69411E-11
1.58468E+05					
201	3.98953E-17	76.313	8.18677E-15	3365.2	5.14504E-11
1.40766E+05					
202	3.10040E-19	0.54764	6.30658E-17	2.4560	3.98974E-13
2.76832E+07					
203	1569.8	3.80911E-20	2.76532E+05	4.97046E-19	1.22254E+09
1.54827E-15					
204	5.23154E-17	25508.	1.03938E-14	5.08543E+05	6.57043E-11
4.55221E+08					
205	4.59568E-16	0.44713	8.35281E-14	8948.8	5.16851E-10
95975.					
206	1.54463E-02	2.55708E-18	30.906	1.73124E-15	4.06181E+05
1.98470E-14					
207	5.1576	7.86150E-18	219.30	1.13313E-14	2.59155E+06
7.96956E-14					
208	1.01899E-14	11.454	2.10306E-12	24947.	1.32306E-08
8.13901E+05					
209	6.69415E-14	0.88621	1.39364E-11	826.99	8.70906E-08
16410.					
210	1.66159E-02	1.21412E-17	5.2842	4.32276E-13	94545.
5.59973E-13					
211	2.2831	1.20209E-16	91.175	1.13867E-12	1.71046E+06
3.29705E-12					
212	2.00686E-12	7.1177	4.13698E-10	1507.7	2.60303E-06
7.20313E+05					
213	6.71011E-15	20.865	1.38252E-12	364.31	8.69891E-09
40238.					
214	127.65	3.86757E-15	5.9717	1.02478E-11	12579.
2.18468E-11					
215	1.1904	2.10130E-16	0.35685	1.43204E-12	6976.0
5.64317E-12					
216	1.20329E-13	0.12108	2.48258E-11	68.597	1.56205E-07
23794.					
217	8.46626E-13	4.1440	1.74372E-10	191.28	1.09715E-06
2.19836E+05					
218	1.73648E+05	2.39133E-16	29620.	1.23407E-13	3.14363E+08
1.19384E-14					
219	39.918	4.27342E-16	243.01	5.40301E-13	5.18888E+06
1.73236E-13					
220	0.14593	1.68090E-16	0.18451	7.79069E-14	3752.6
1.93264E-11					

221	1.57803E-11	0.69694	3.24082E-09	3.14779E-04	2.04116E-05
38675.					
222	3.82310E-13	0.65780	7.98844E-11	1092.0	5.02453E-07
1.34840E+05					
223	6068.8	2.35602E-16	1.30128E+05	7.71086E-13	3.05577E+09
1.98105E-12					
224	4.45302E-12	0.31344	9.18620E-10	109.45	5.77793E-06
9137.4					
225	3.34313E-02	2.96621E-16	0.34864	3.39096E-13	6123.2
5.63374E-14					
226	7.84181E-15	0.57071	1.59531E-12	565.95	9.99155E-09
24362.					
227	10.424	1.65314E-16	93.187	1.37370E-13	2.20931E+06
1.04640E-14					
228	2.33454E-14	7.9797	4.77216E-12	13628.	3.00217E-08
31604.					
229	15.234	1.30890E-18	7.2567	2.42813E-14	1.46994E+05
1.17755E-13					
230	210.68	1.63741E-18	21.284	6.75978E-14	3.64599E+05
7.07029E-13					
231	2.98423E-12	0.63213	6.14885E-10	59987.	3.86888E-06
6.33594E+05					
232	7.26699E-14	1.0066	1.49715E-11	1.34261E+06	9.42016E-08
67016.					
233	66440.	2.50533E-17	2348.1	1.14139E-13	1.35289E+07
3.65192E-13					
234	3.30445E-13	31736.	6.81023E-11	3.88865E+07	4.28497E-07
1.23308E+09					
235	1.26269E-13	1.4252	2.60156E-11	6.8100	1.63694E-07
1.03026E+07					
236	1.86445E-13	16277.	3.84410E-11	6.14943E+07	2.41862E-07
3.69127E+08					
237	90818.	8.23084E-18	90734.	2.39470E-14	1.73932E+09
8.20395E-14					
238	21394.	9.59647E-18	38169.	6.85914E-14	2.58430E+08
2.16130E-13					
239	4.93552E-16	6.45276E-02	1.02964E-13	23.470	6.47335E-10
535.07					
240	0.17361	5.58182E-19	0.30551	3.88879E-15	2175.5
8.94463E-16					
241	1.79532E-14	1.9626	3.68898E-12	1073.2	2.31763E-08
59487.					
242	11.687	7.31403E-17	25.497	8.35292E-14	5.56669E+05
3.62726E-14					
243	112.10	1.62174E-18	0.73979	3.37721E-17	3.90620E+05
4.78510E-15					
244	6.30762E-14	0.10682	1.29936E-11	84521.	8.18093E-08
59125.					
245	1.73452E-13	118.45	3.57858E-11	1158.6	2.25166E-07
1.31025E+06					
246	3982.4	1.36884E-16	38819.	1.52437E-13	1.66095E+08
1.10362E-13					
247	80993.	4.45968E-17	47654.	9.54231E-14	8.09040E+08
1.52586E-13					
248	5.38699E-13	6964.2	1.11838E-10	1.86556E+06	7.03913E-07
5.75629E+07					
249	9654.2	9.55691E-16	1.38612E+06	2.30720E-12	2.17536E+10
2.38173E-13					
250	2.21997E-14	21381.	2.08901E-12	1.57300E+06	1.42486E-08
9.13959E+07					
TOTAL	7.79723E+06	7.67467E+06	5.61887E+06	1.68930E+09	1.09180E+11
1.17082E+11					

THE ANALYSIS HAS BEEN COMPLETED

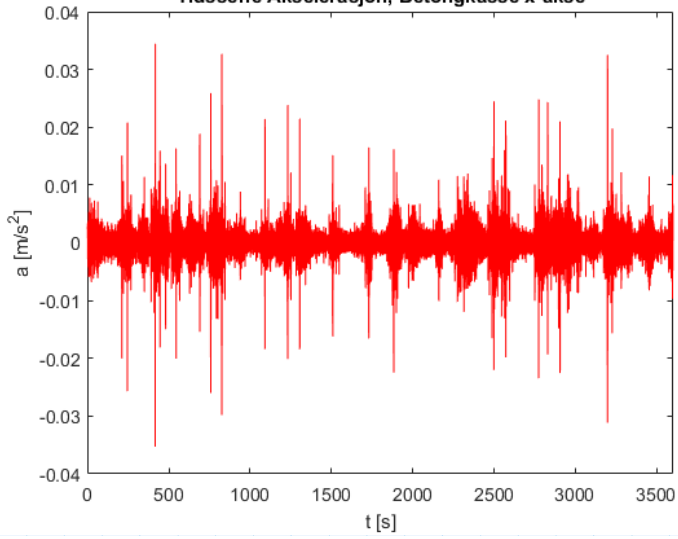
ANALYSIS COMPLETE
WITH 34 WARNING MESSAGES ON THE DAT FILE
AND 75 WARNING MESSAGES ON THE MSG FILE
74 WARNINGS ARE FOR NEGATIVE EIGENVALUES

JOB TIME SUMMARY
USER TIME (SEC) = 4.8000
SYSTEM TIME (SEC) = 1.3000
TOTAL CPU TIME (SEC) = 6.1000
WALLCLOCK TIME (SEC) = 12

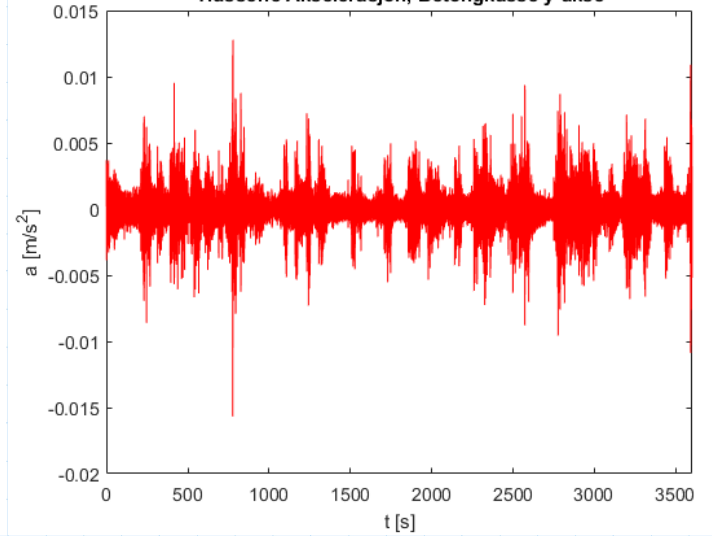
VEDLEGG G

Figurer

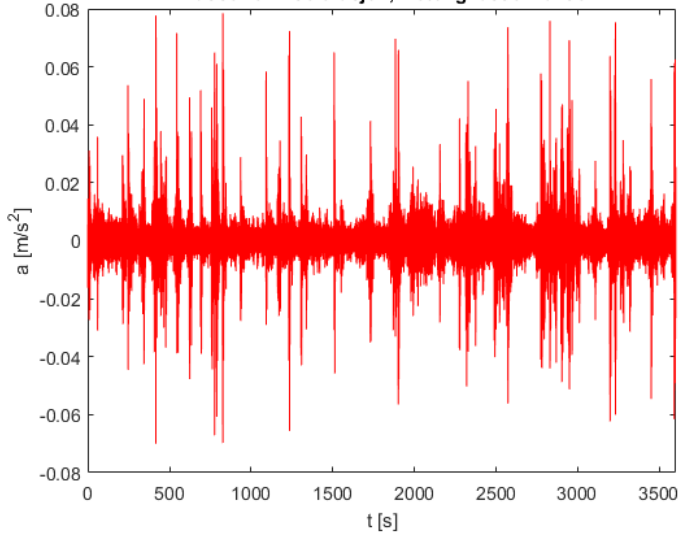
Tidsserie Akselerasjon, Betongkasse x-akse



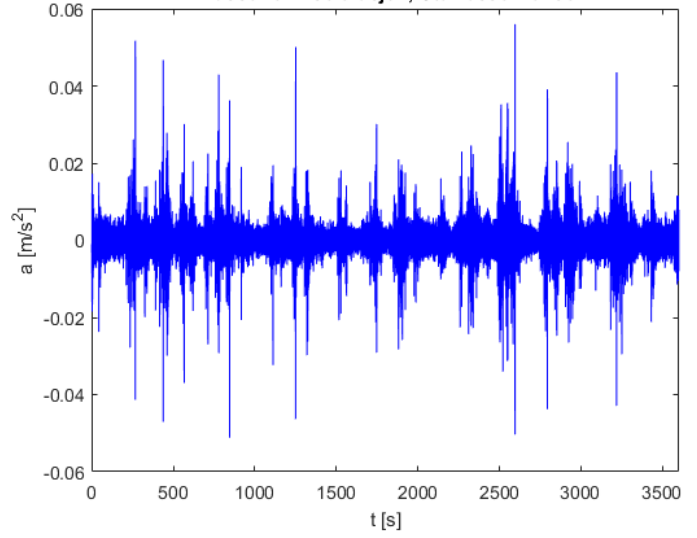
Tidsserie Akselerasjon, Betongkasse y-akse



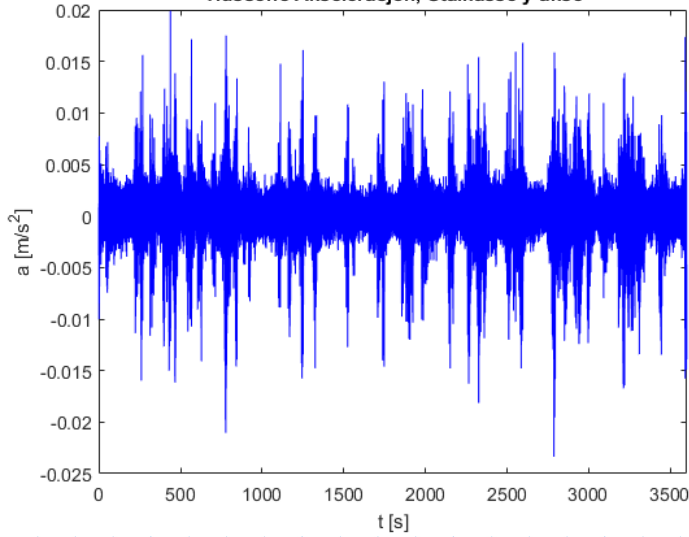
Tidsserie Akselerasjon, Betongkasse z-akse



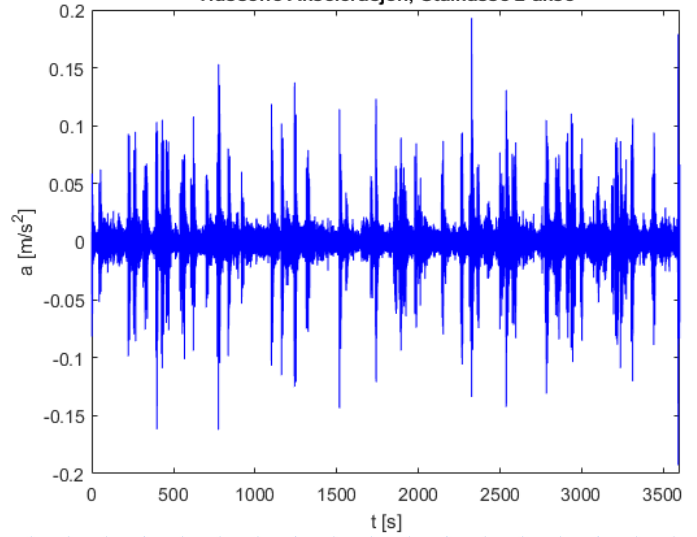
Tidsserie Akselerasjon, Stålkasse x-akse



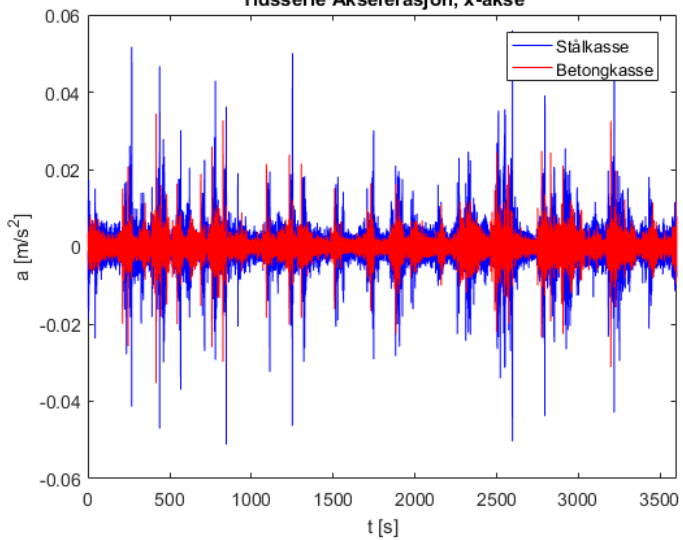
Tidsserie Akselerasjon, Stålkasse y-akse



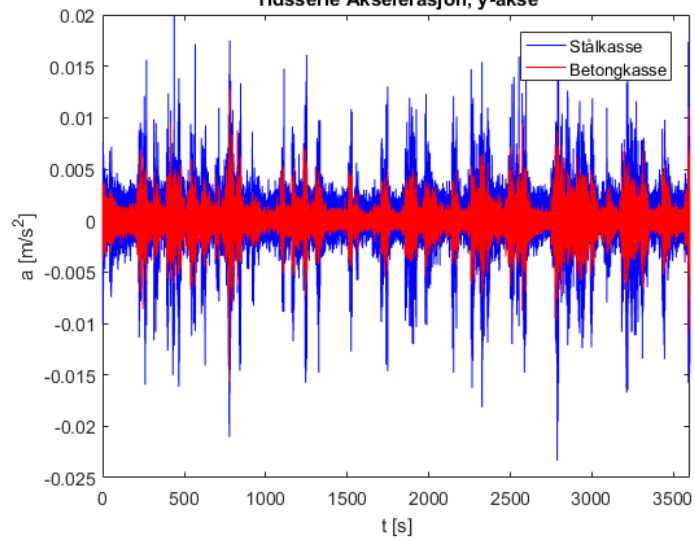
Tidsserie Akselerasjon, Stålkasse z-akse



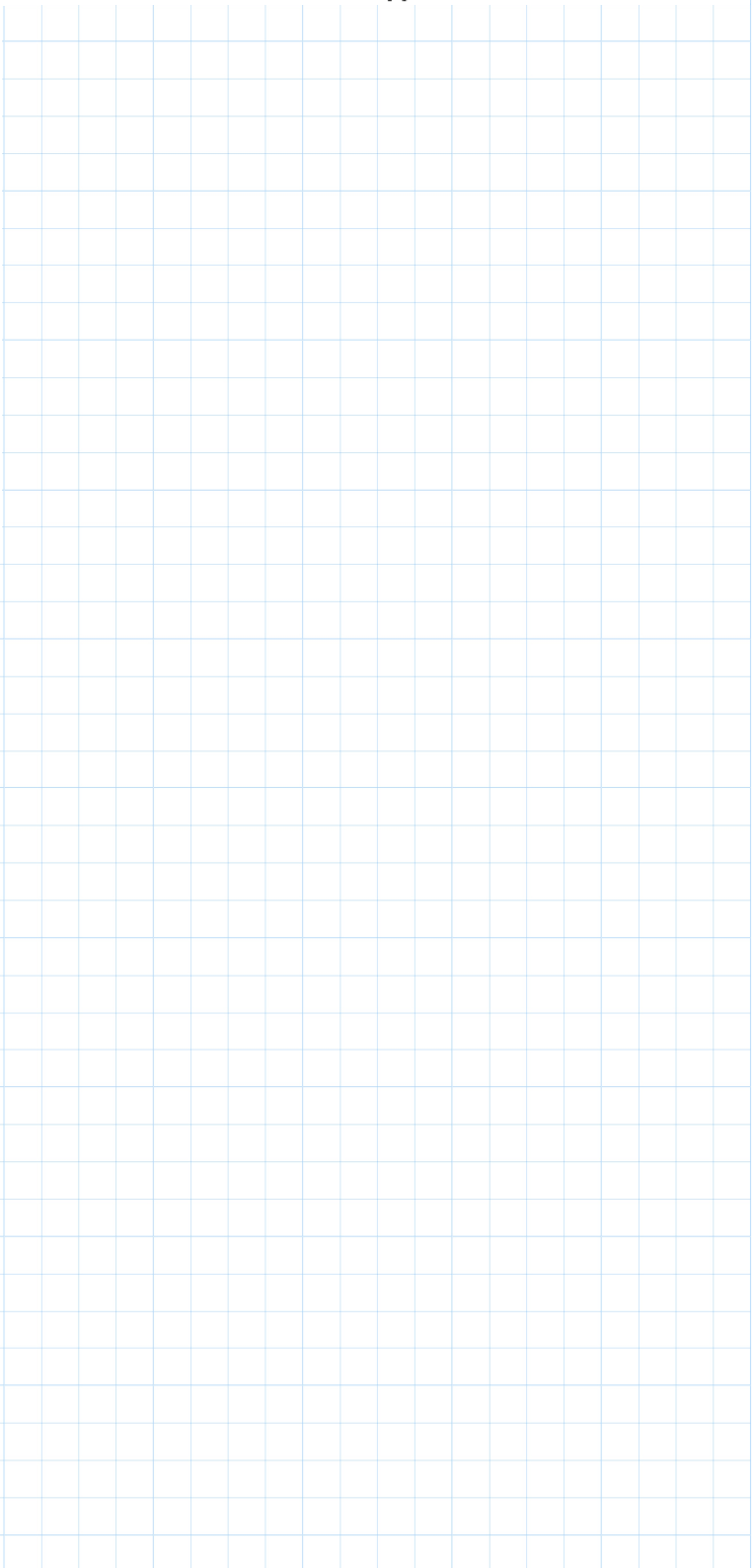
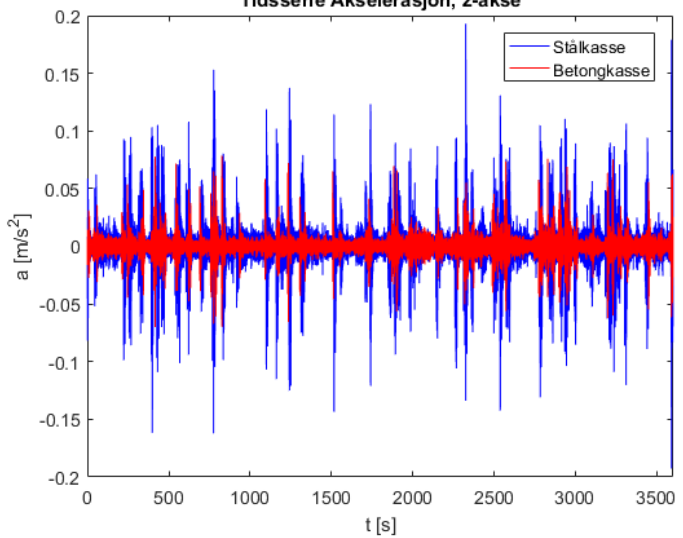
Tidsserie Akselerasjon, x-akse

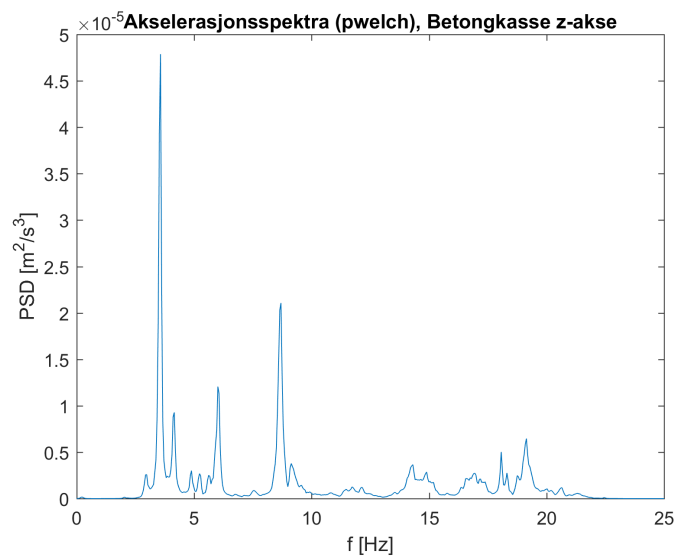
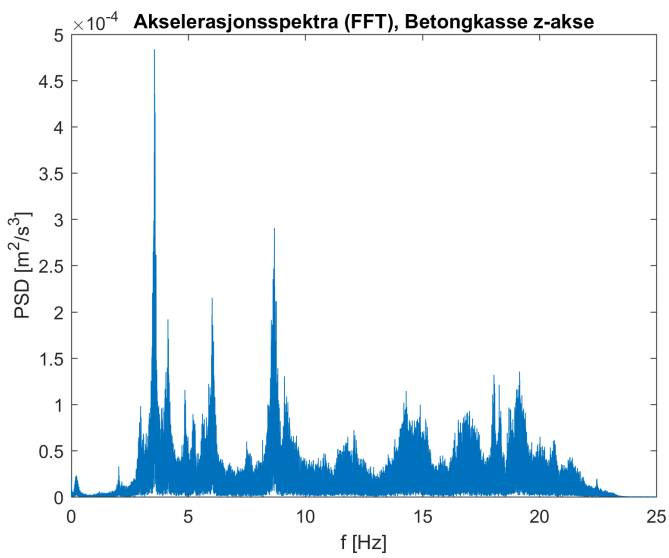
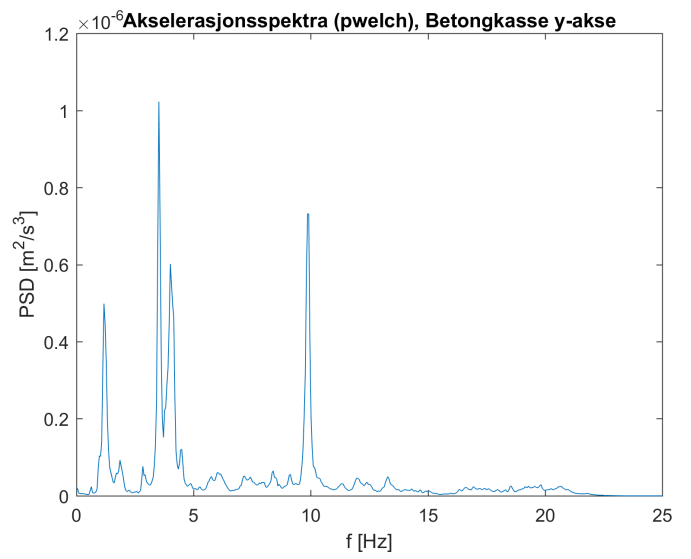
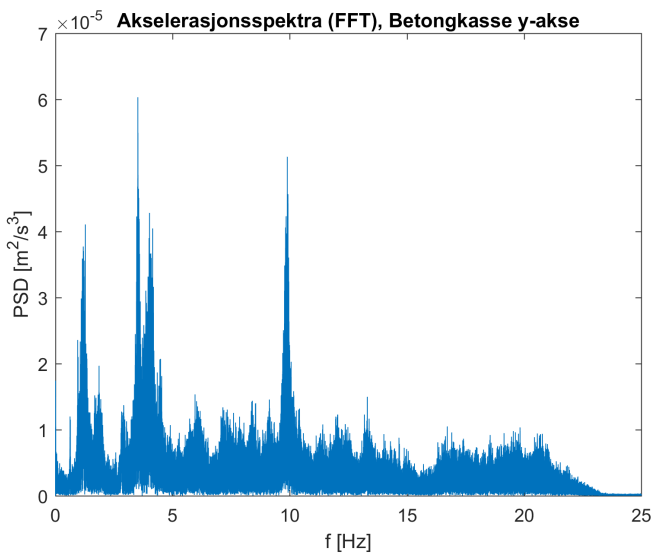
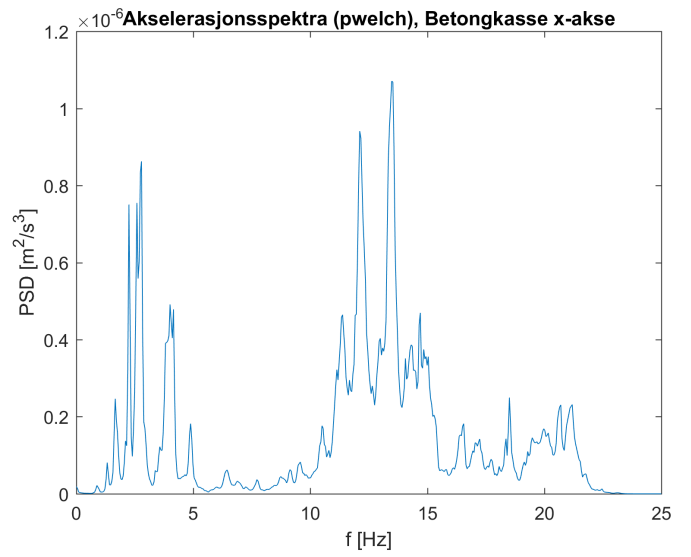
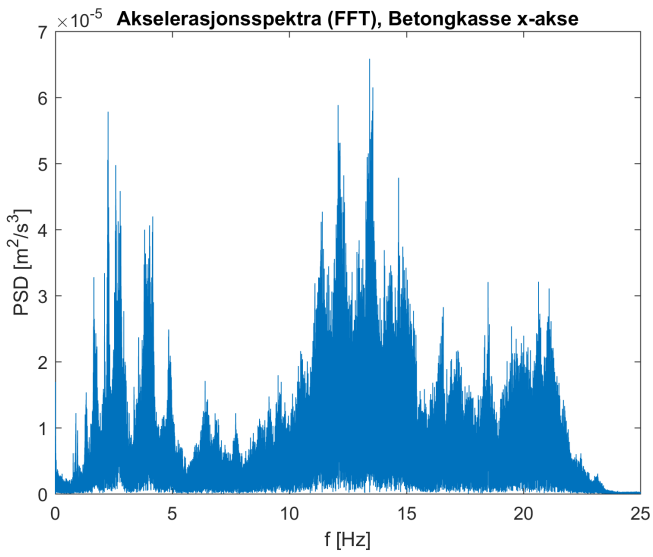


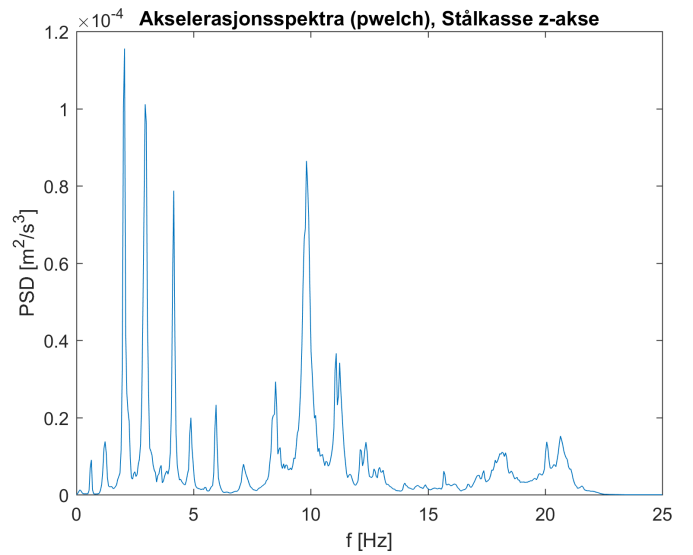
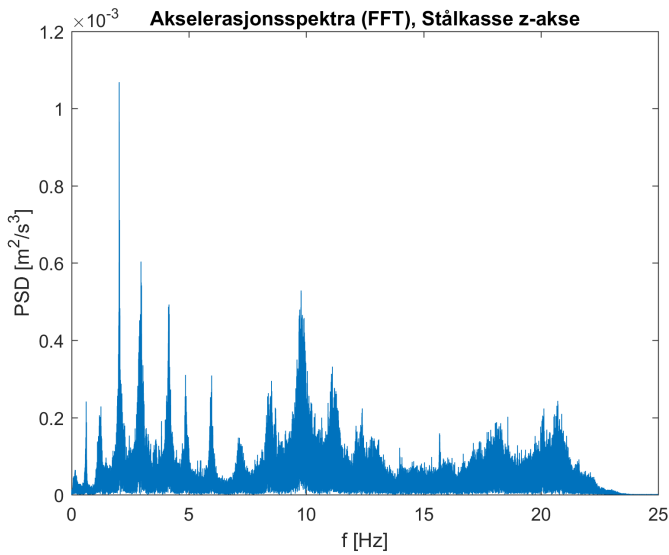
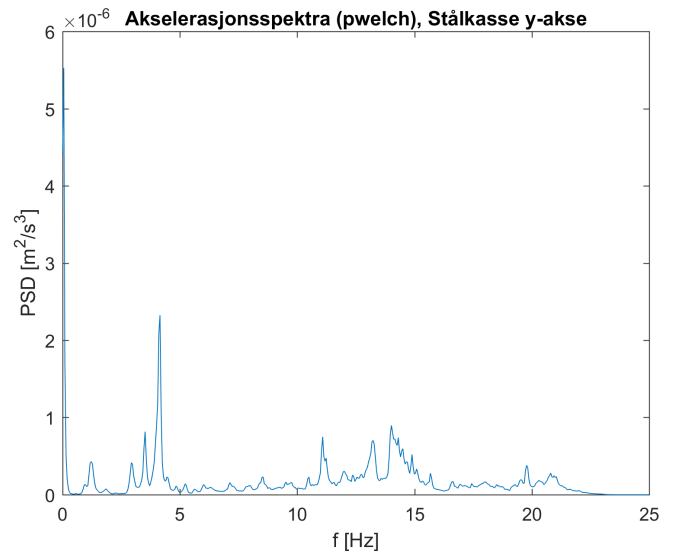
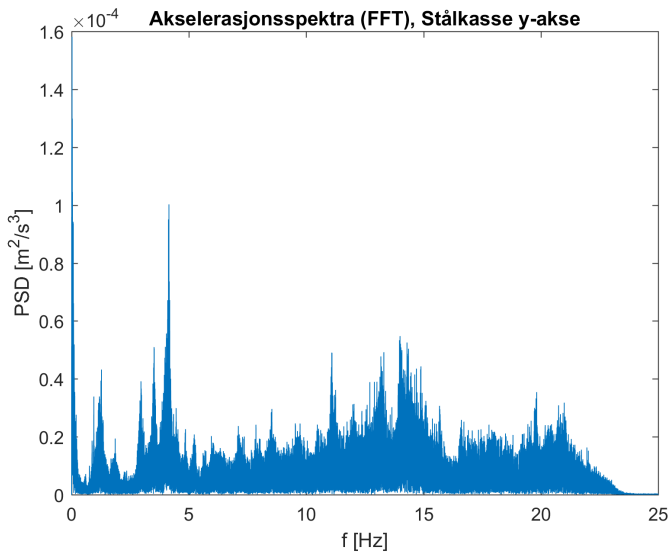
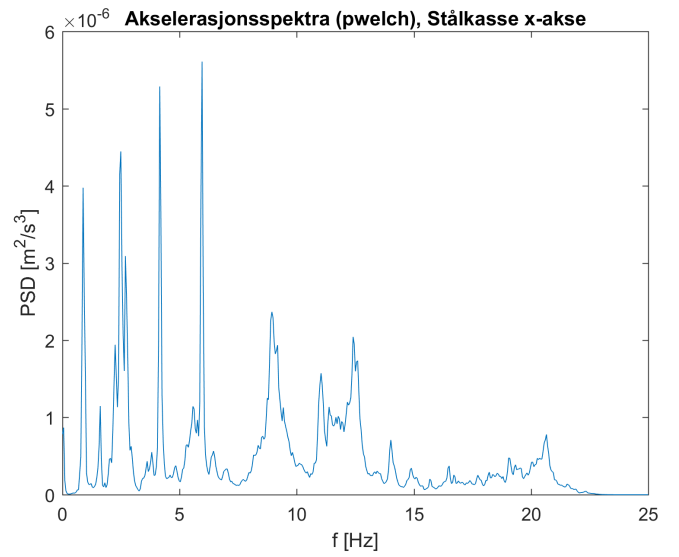
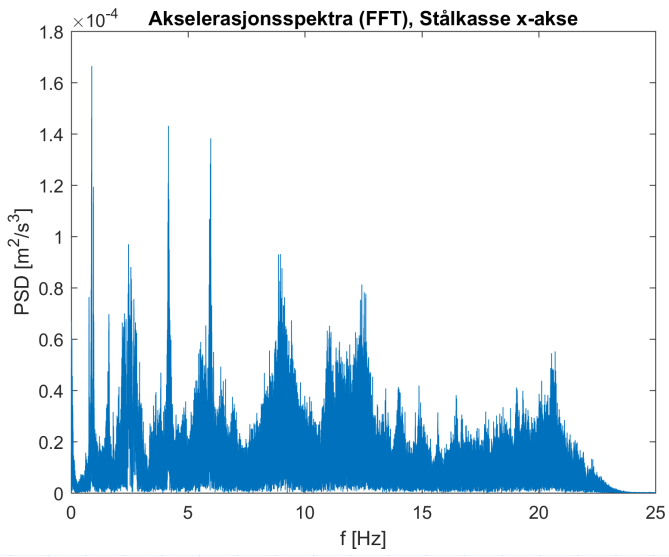
Tidsserie Akselerasjon, y-akse

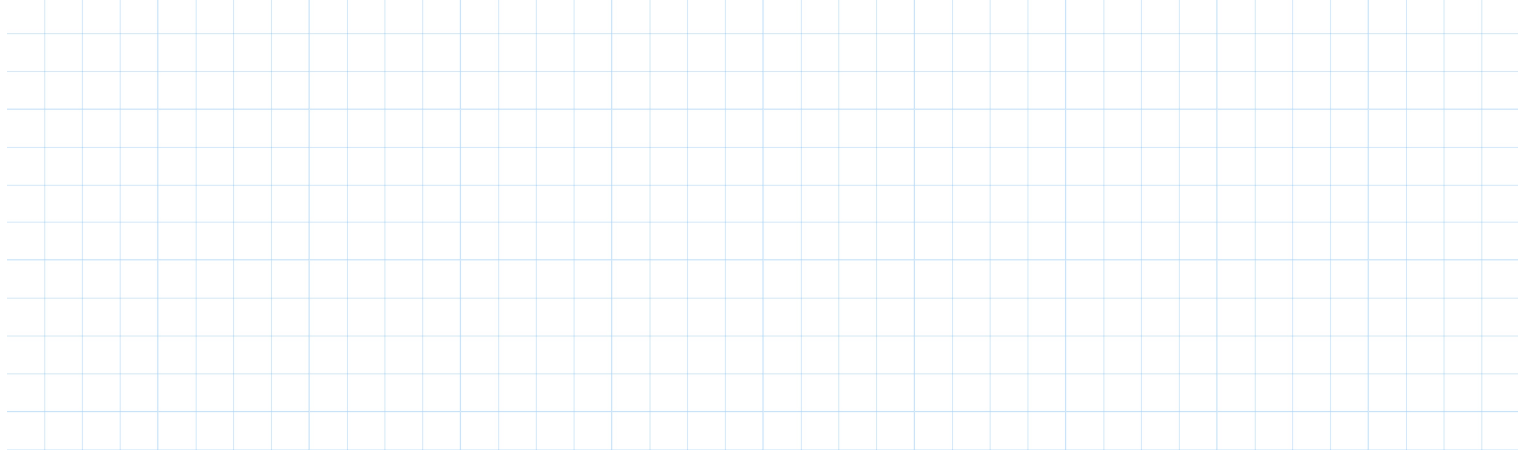
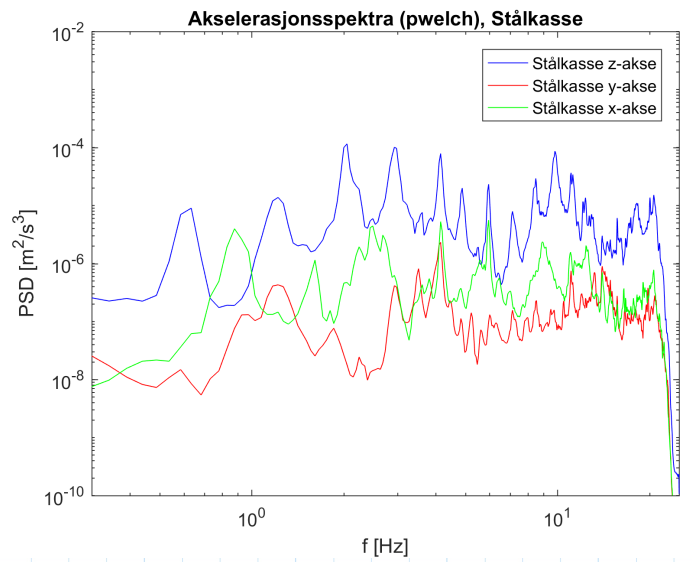
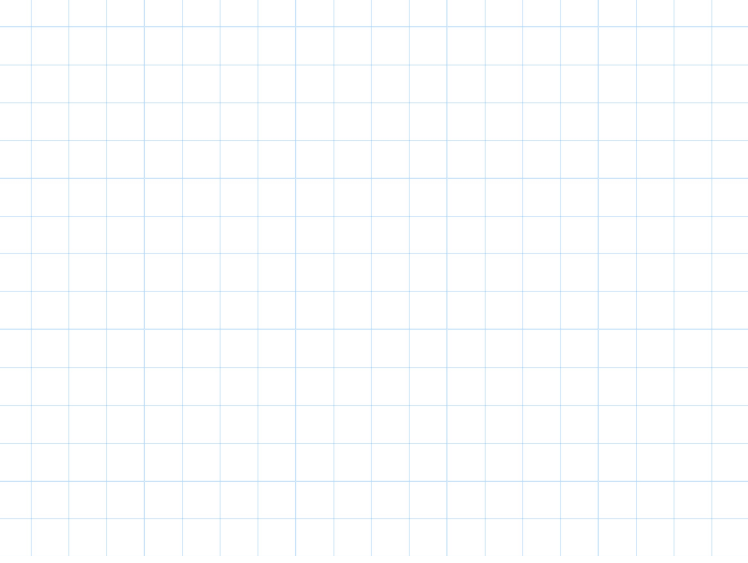
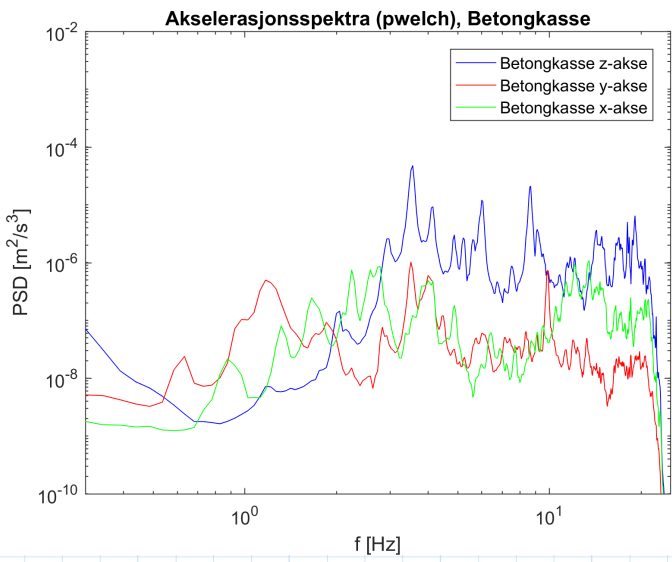
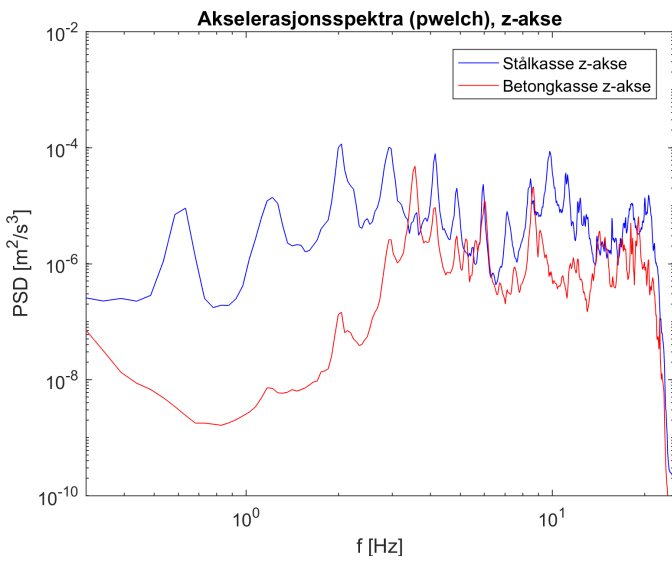
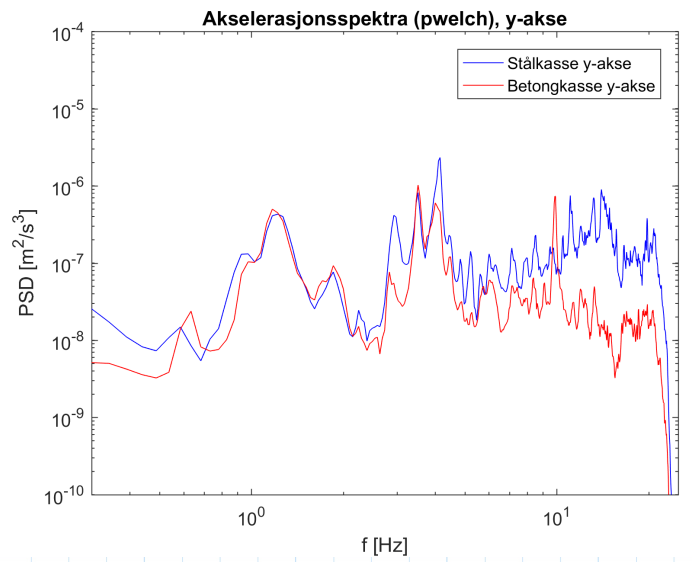
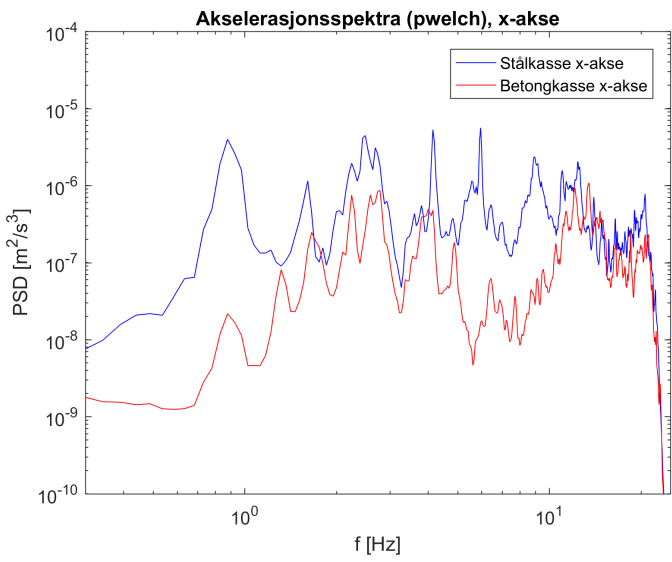


Tidsserie Akselerasjon, z-akse

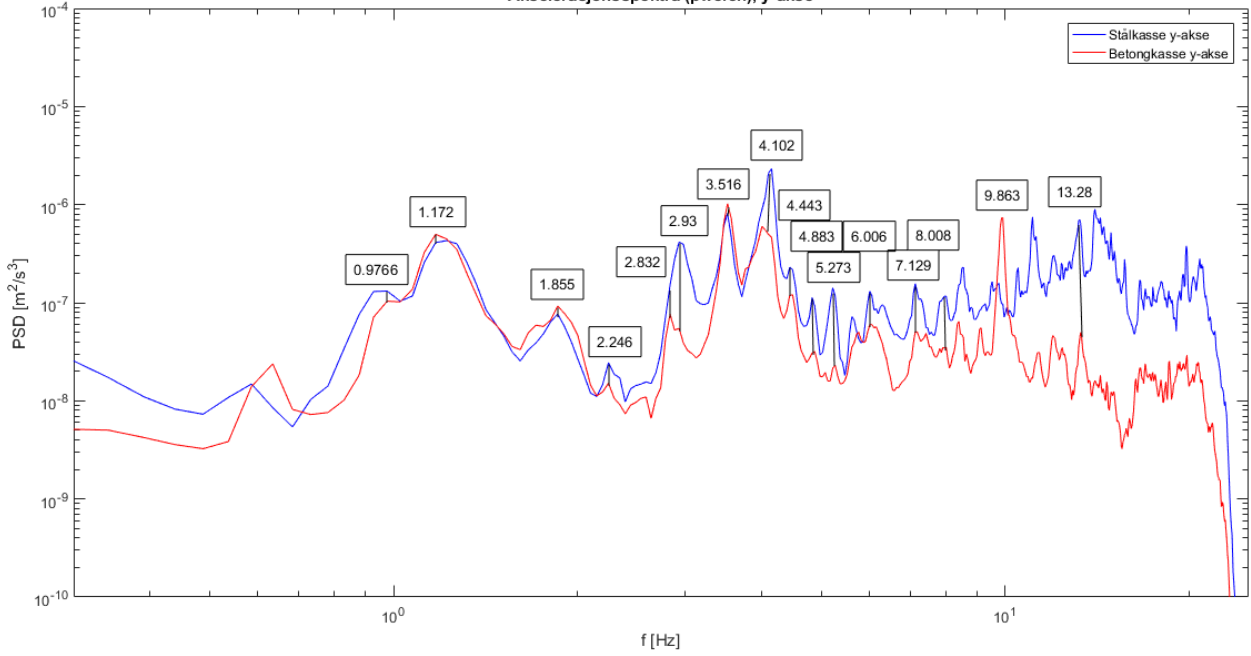




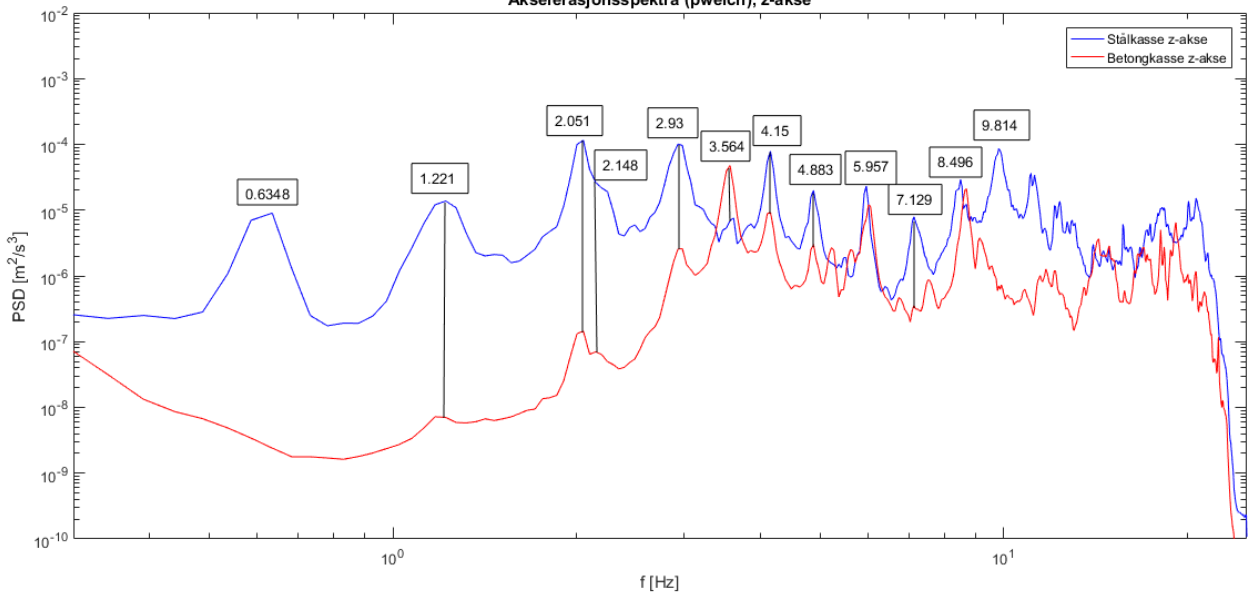




Akselerasjonsspektra (pwelch), y-akse

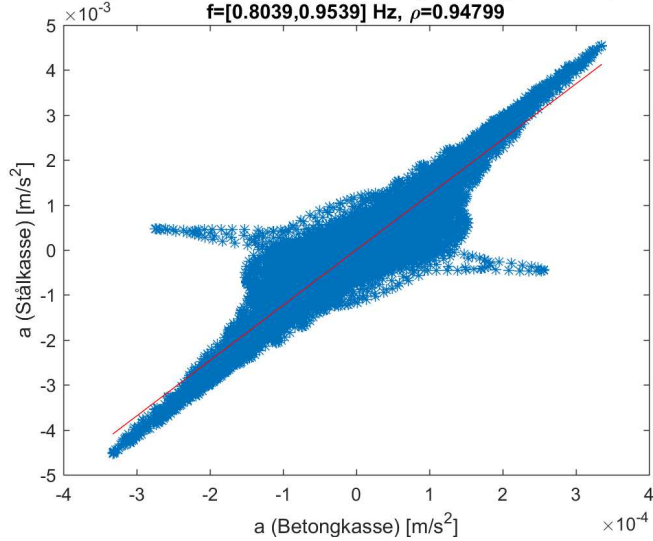


Akselerasjonsspektra (pwelch), z-akse

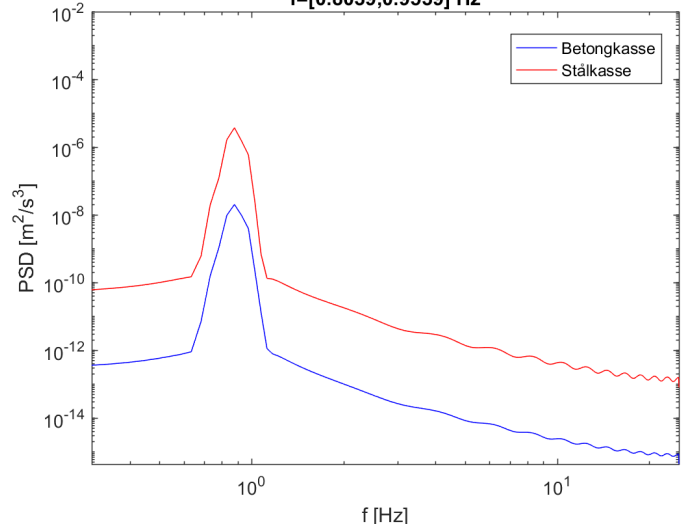


Korrelasjonsanalyser

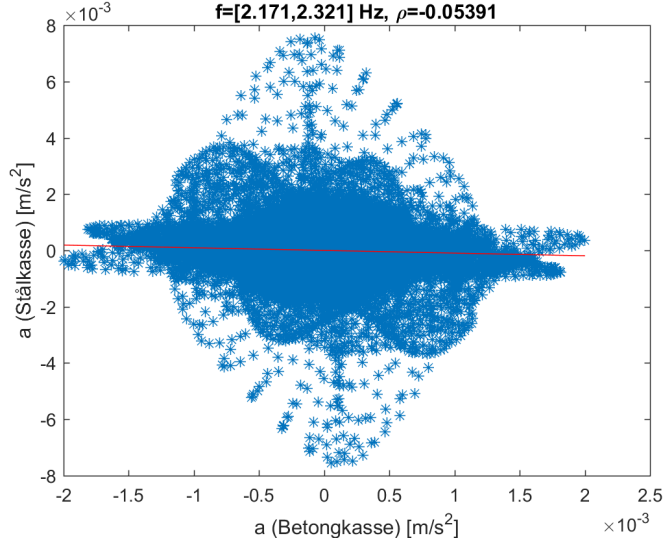
Korrelasjon mellom akselerasjon i betongkasse og stålkasse, x-akse
 $f=[0.8039,0.9539]$ Hz, $\rho=0.94799$



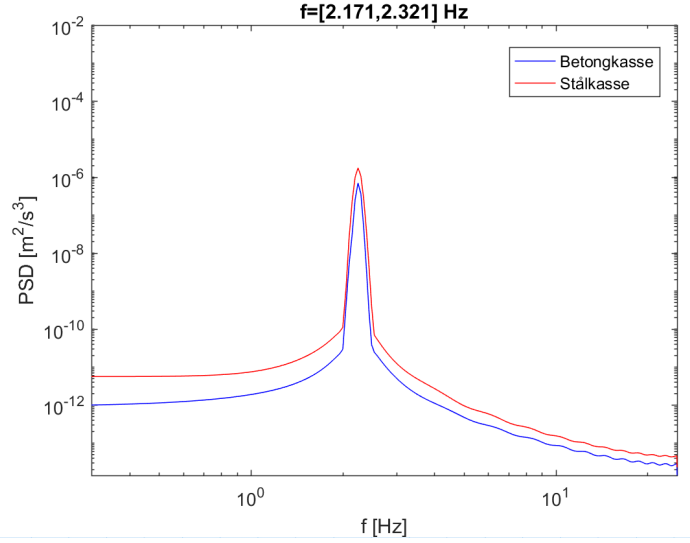
Filtrert akselerasjonsspektra (pwelch), x-akse
 $f=[0.8039,0.9539]$ Hz



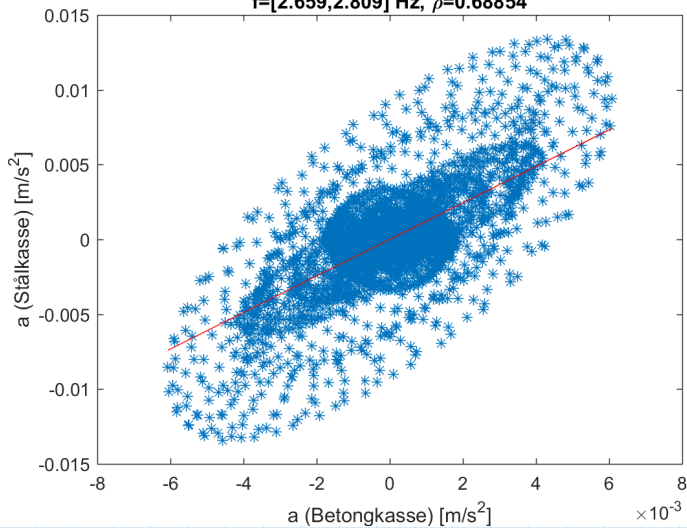
Korrelasjon mellom akselerasjon i betongkasse og stålkasse, x-akse
 $f=[2.171,2.321]$ Hz, $\rho=-0.05391$



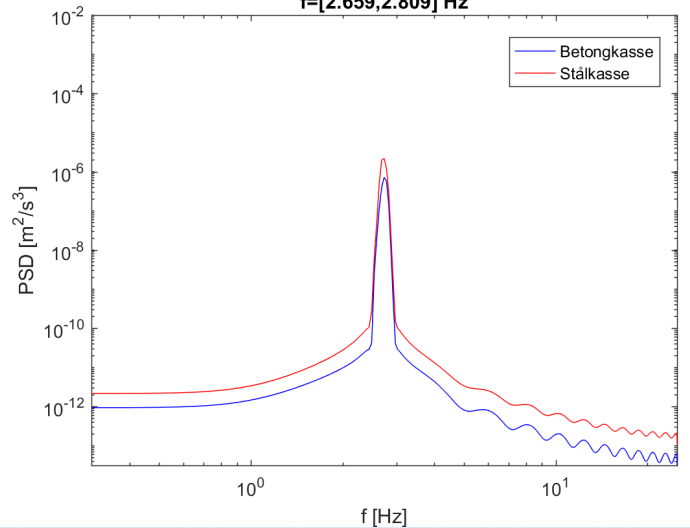
Filtrert akselerasjonsspektra (pwelch), x-akse
 $f=[2.171,2.321]$ Hz

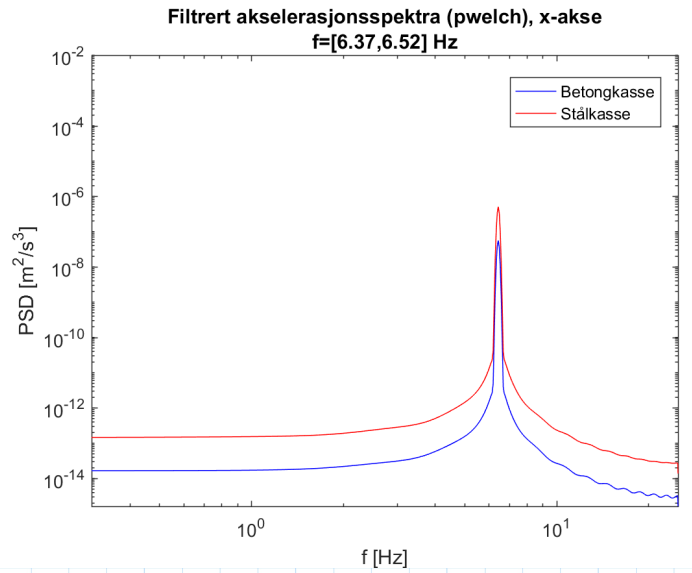
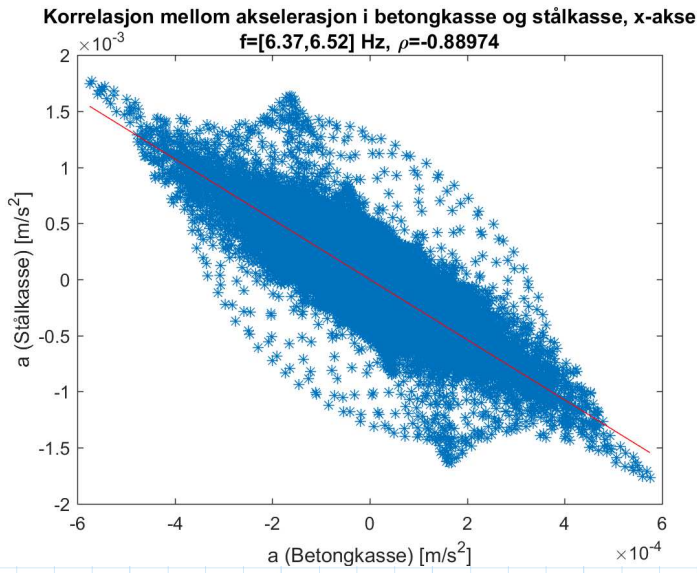
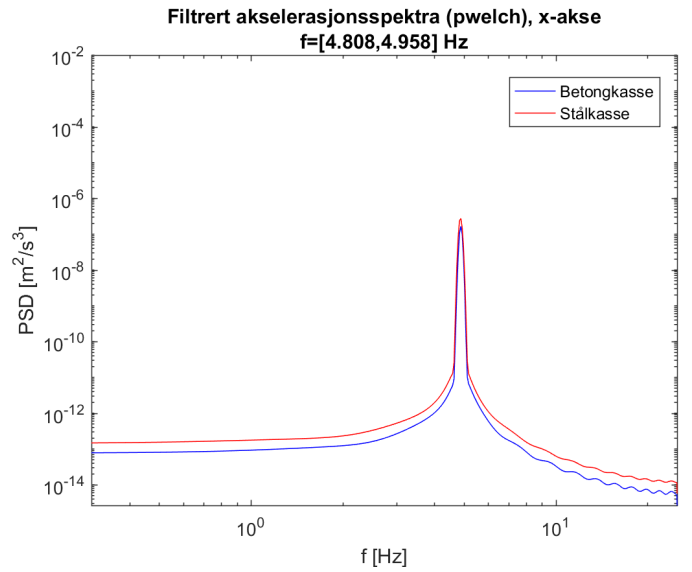
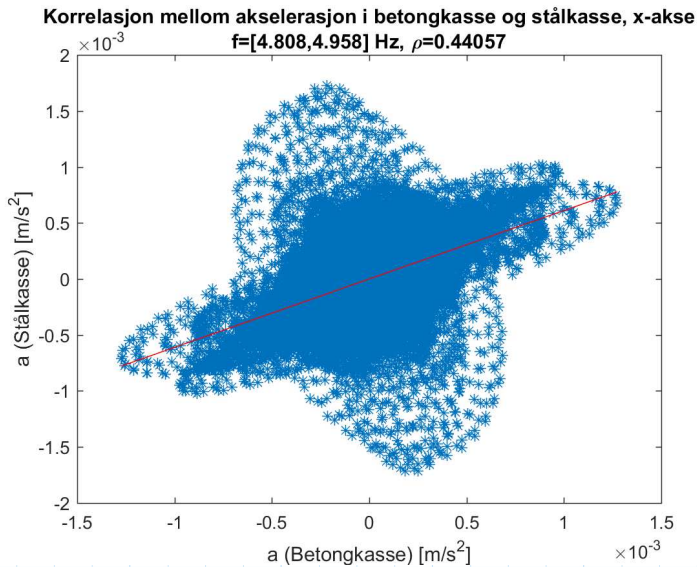
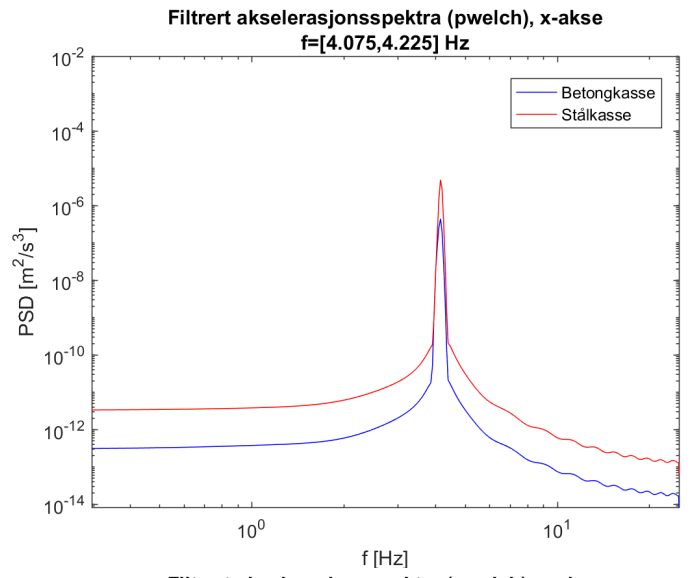
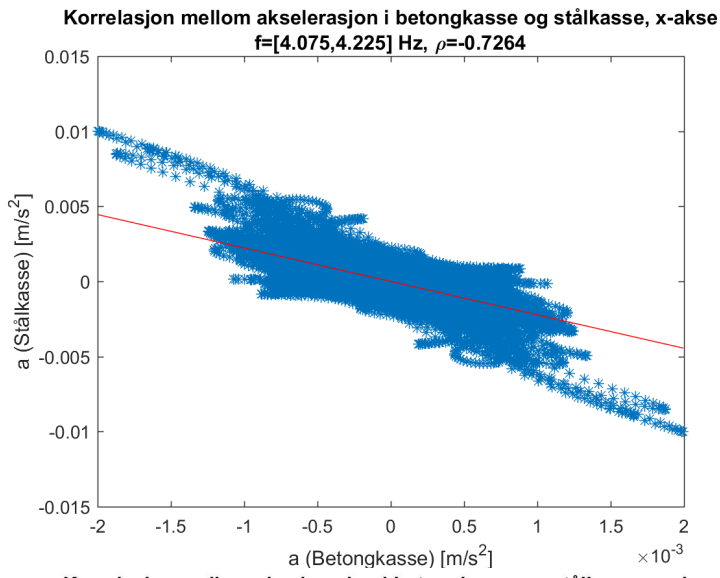


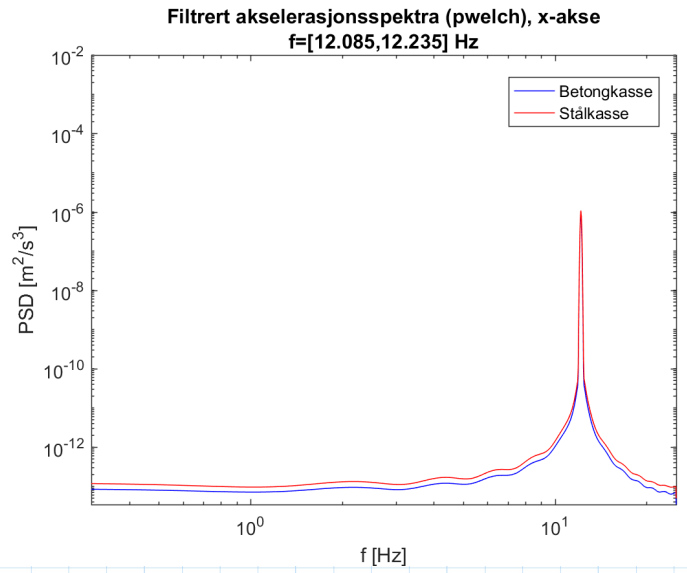
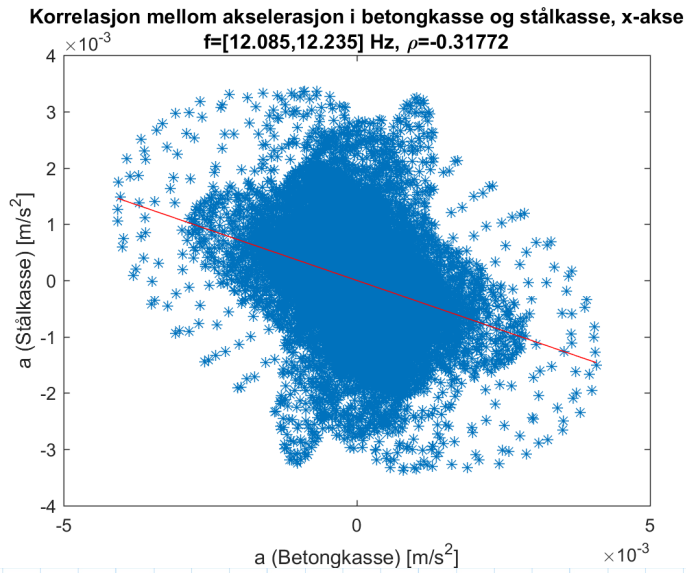
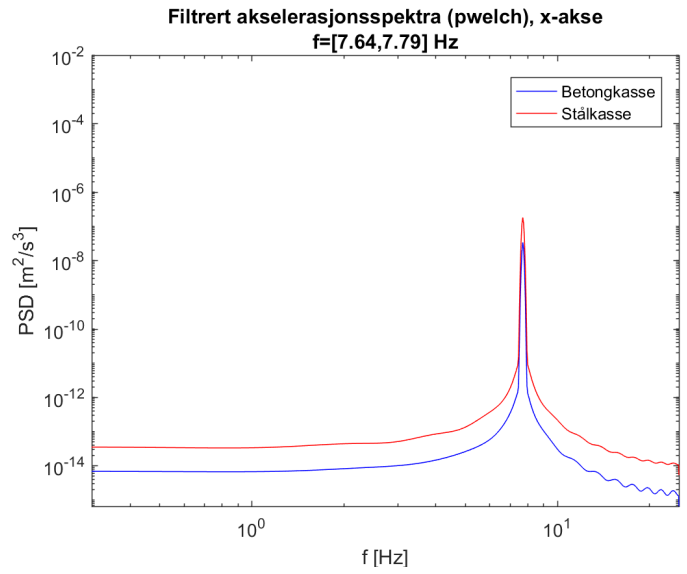
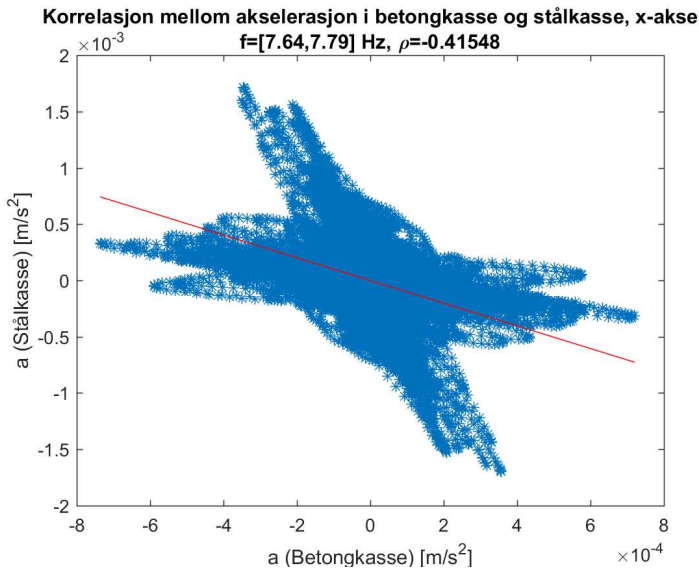
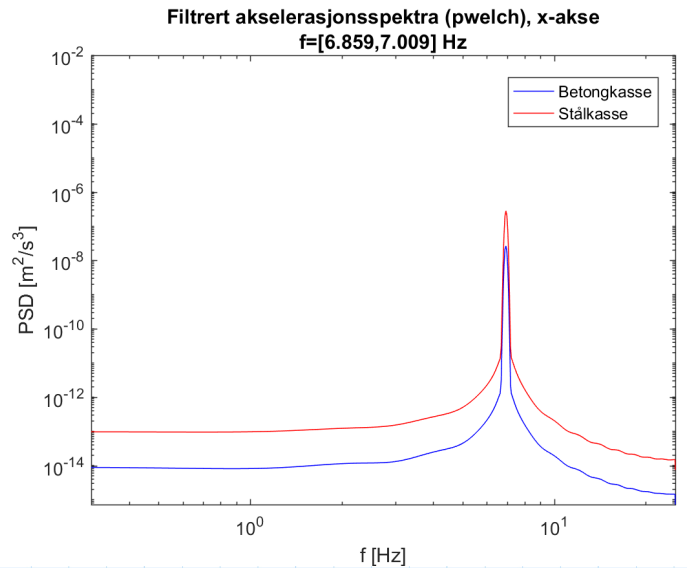
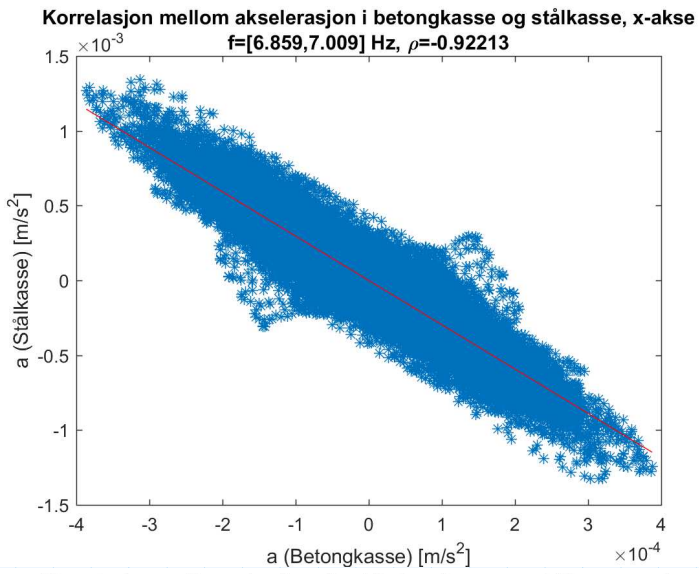
Korrelasjon mellom akselerasjon i betongkasse og stålkasse, x-akse
 $f=[2.659,2.809]$ Hz, $\rho=0.68854$

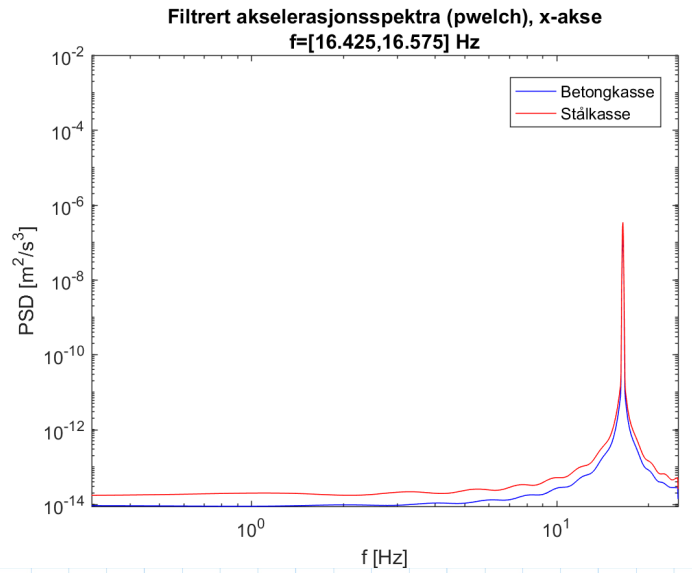
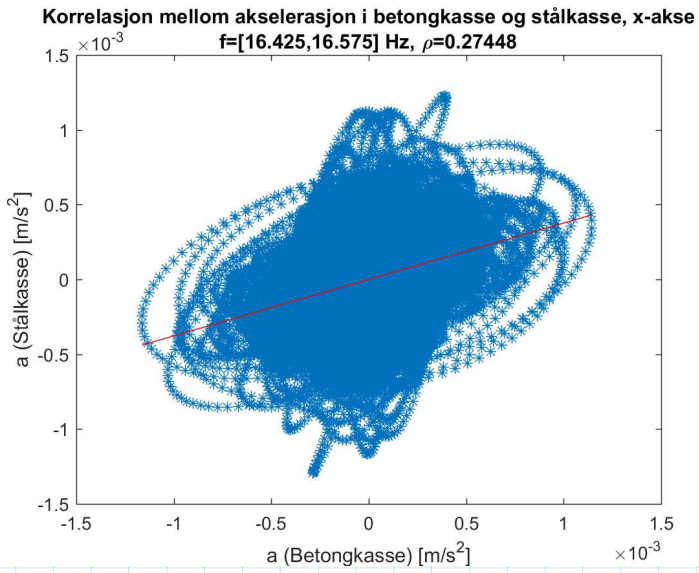
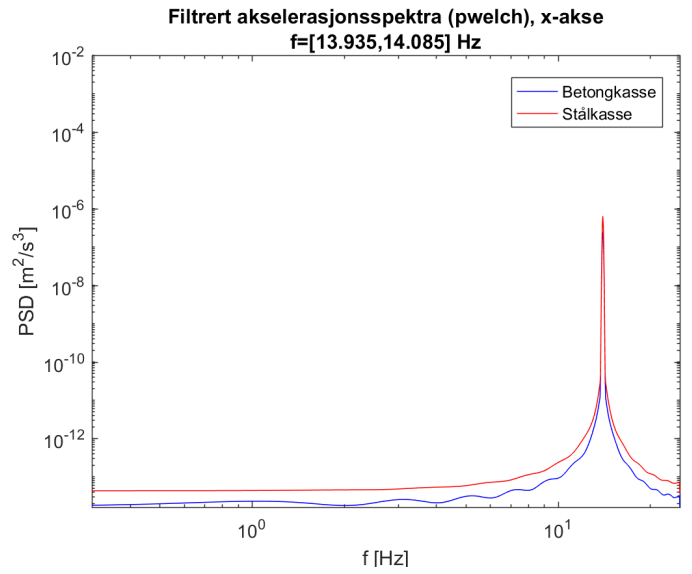
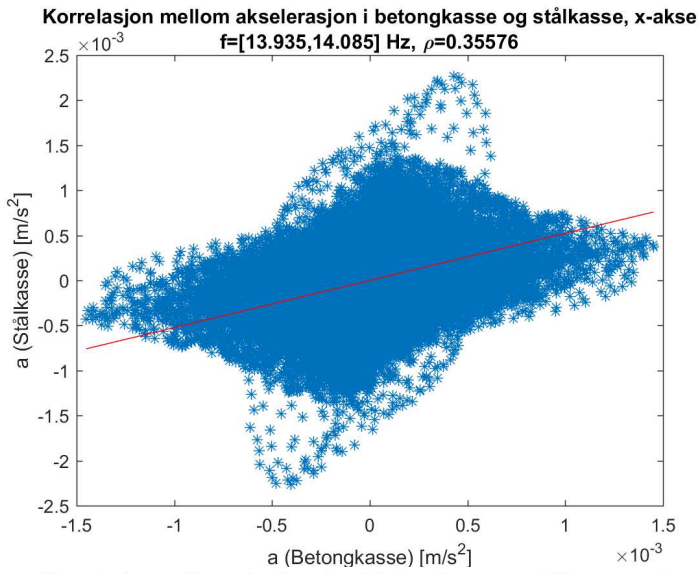
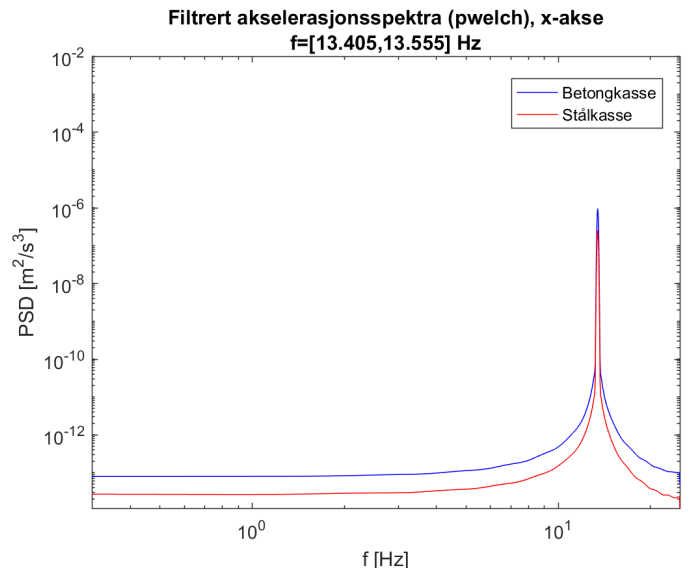
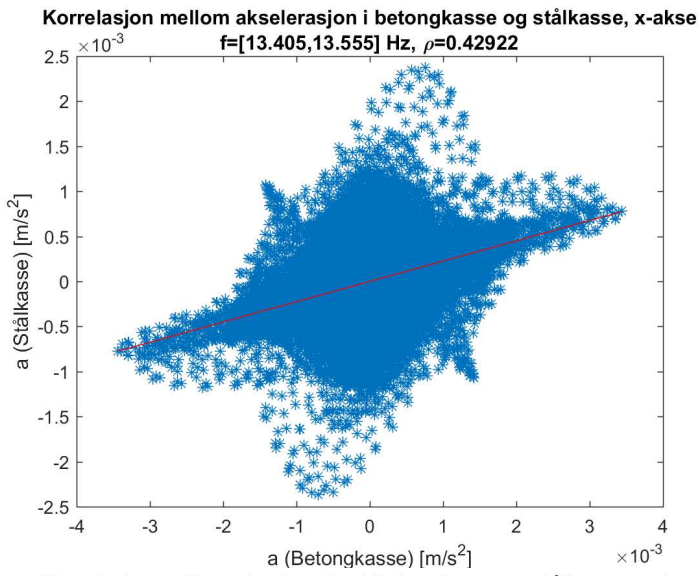


Filtrert akselerasjonsspektra (pwelch), x-akse
 $f=[2.659,2.809]$ Hz

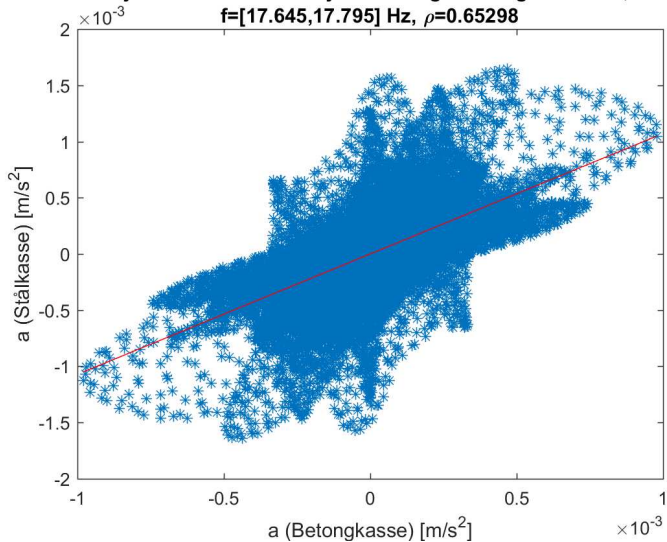




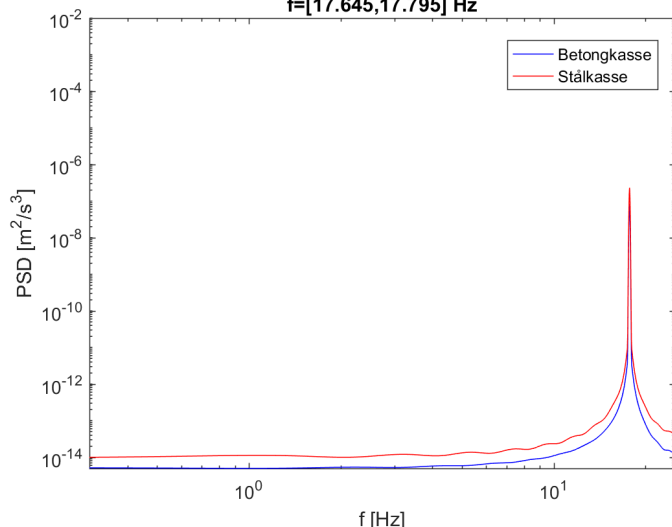




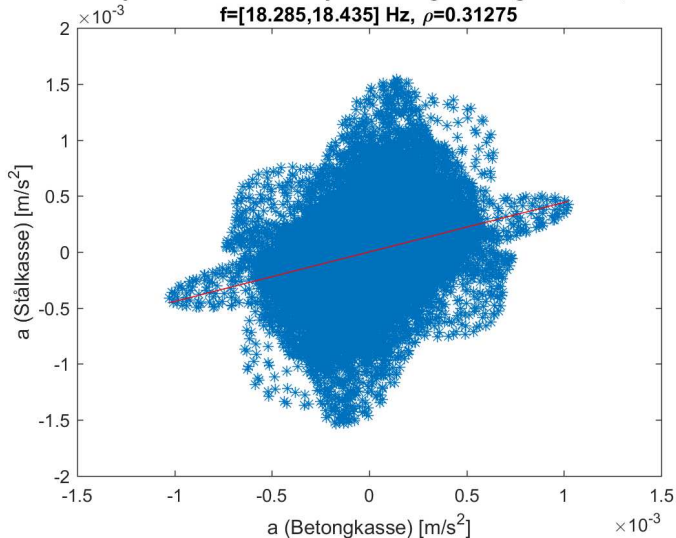
Korrelasjon mellom akselerasjon i betongkasse og stålkasse, x-akse
 $f=[17.645,17.795]$ Hz, $\rho=0.65298$



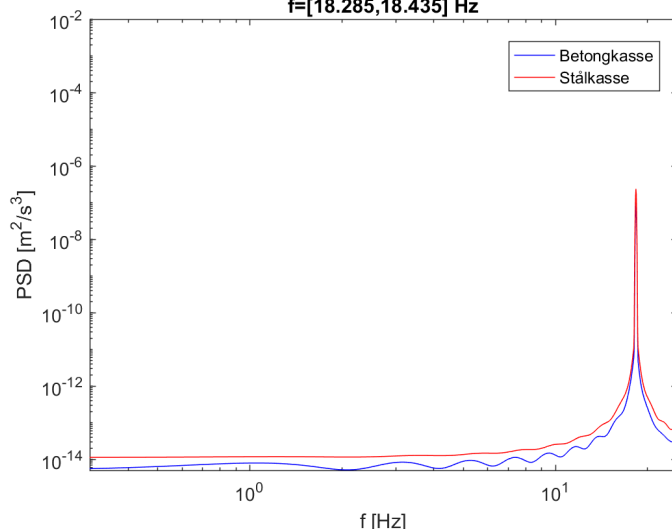
Filtret akselerasjonsspektra (pwelch), x-akse
 $f=[17.645,17.795]$ Hz



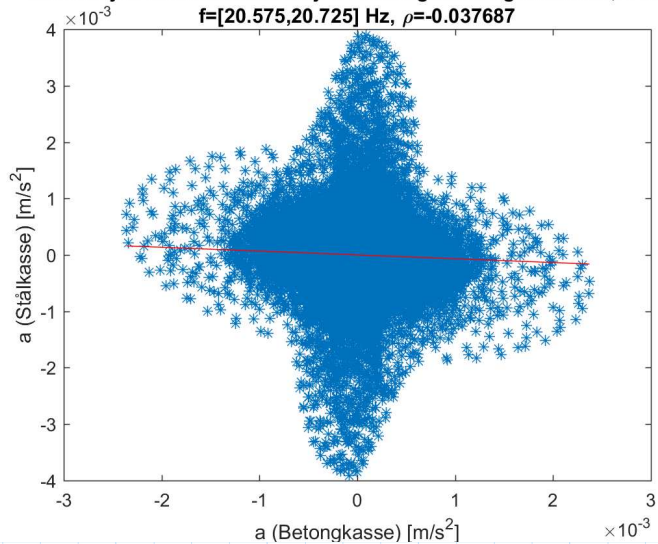
Korrelasjon mellom akselerasjon i betongkasse og stålkasse, x-akse
 $f=[18.285,18.435]$ Hz, $\rho=0.31275$



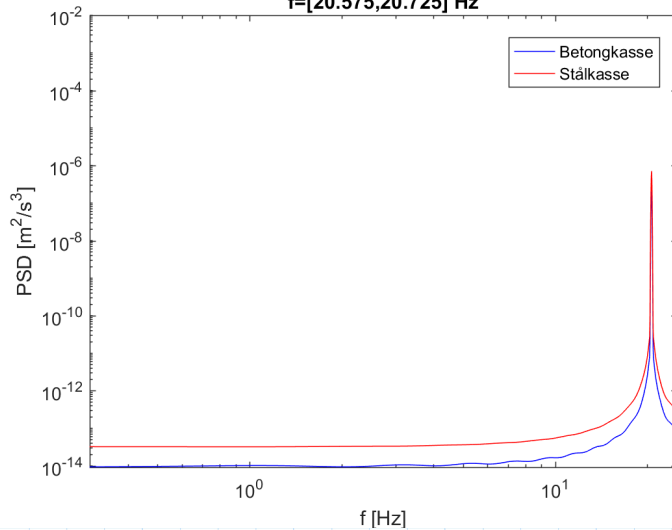
Filtret akselerasjonsspektra (pwelch), x-akse
 $f=[18.285,18.435]$ Hz



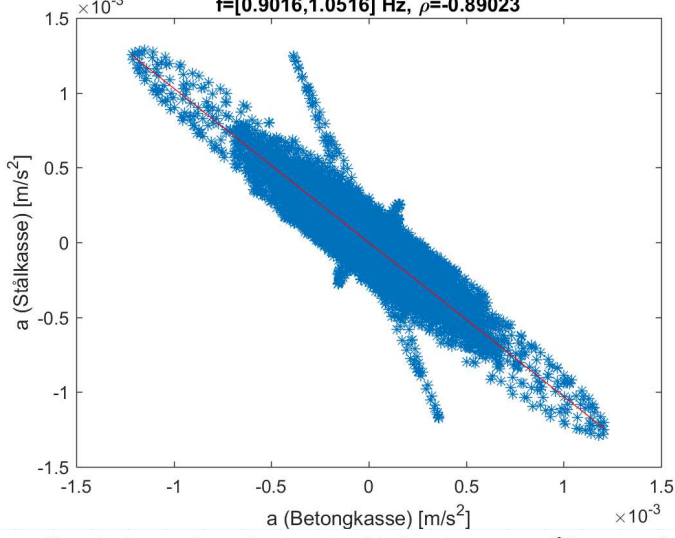
Korrelasjon mellom akselerasjon i betongkasse og stålkasse, x-akse
 $f=[20.575,20.725]$ Hz, $\rho=-0.037687$



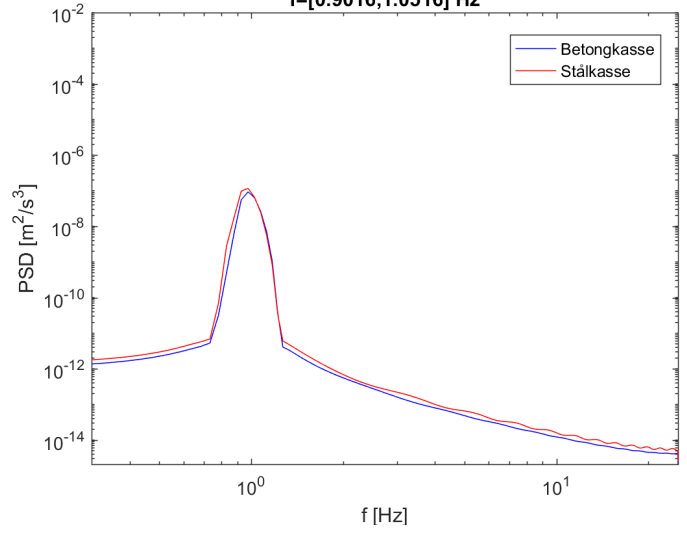
Filtret akselerasjonsspektra (pwelch), x-akse
 $f=[20.575,20.725]$ Hz



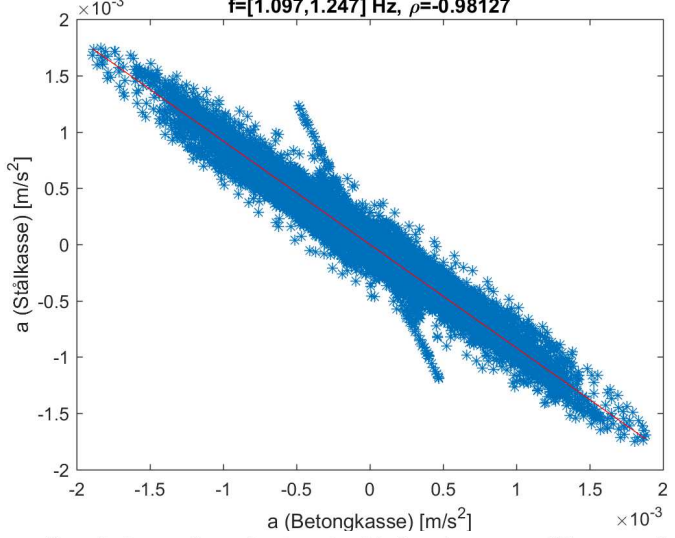
Korrelasjon mellom akselerasjon i betongkasse og stålkasse y-akse
 $f=[0.9016,1.0516]$ Hz, $\rho=-0.89023$



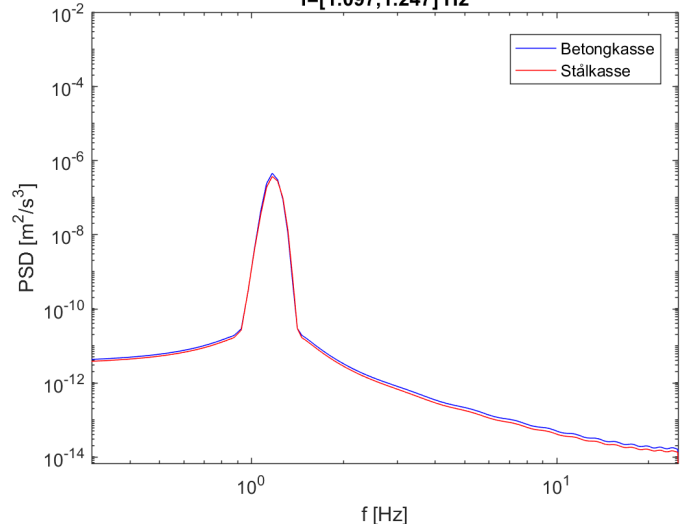
Filtret akselerasjonsspektra (pwelch), y-akse
 $f=[0.9016,1.0516]$ Hz



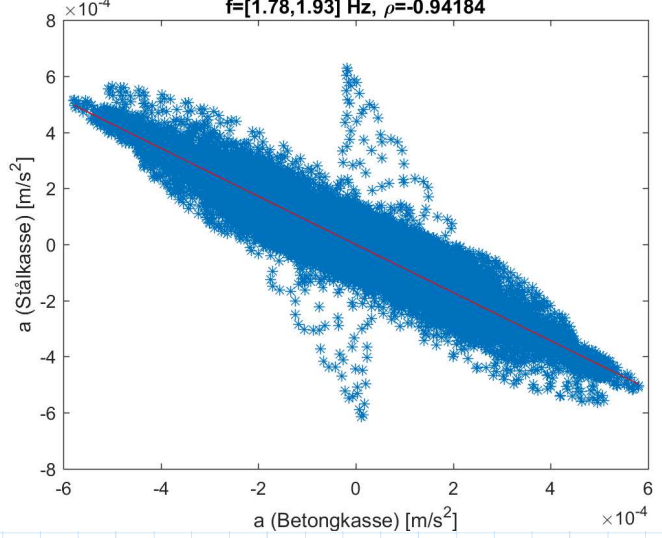
Korrelasjon mellom akselerasjon i betongkasse og stålkasse y-akse
 $f=[1.097,1.247]$ Hz, $\rho=-0.98127$



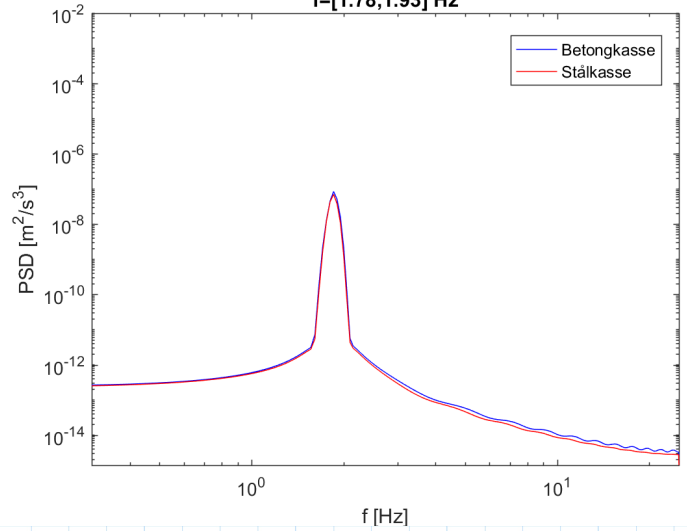
Filtret akselerasjonsspektra (pwelch), y-akse
 $f=[1.097,1.247]$ Hz



Korrelasjon mellom akselerasjon i betongkasse og stålkasse y-akse
 $f=[1.78,1.93]$ Hz, $\rho=-0.94184$

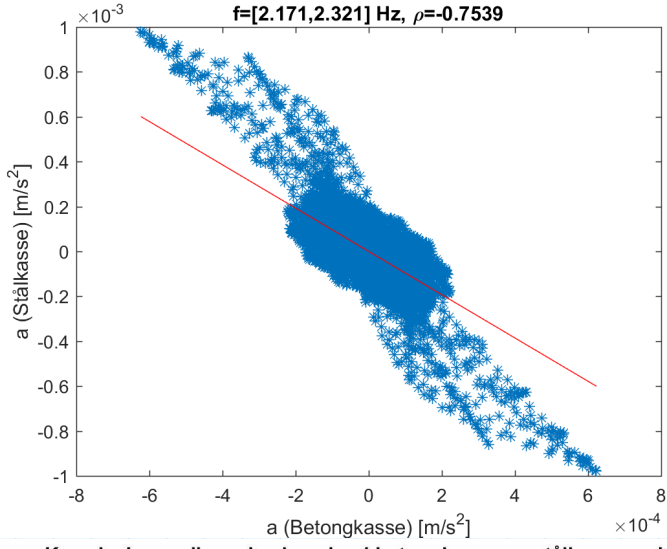


Filtret akselerasjonsspektra (pwelch), y-akse
 $f=[1.78,1.93]$ Hz



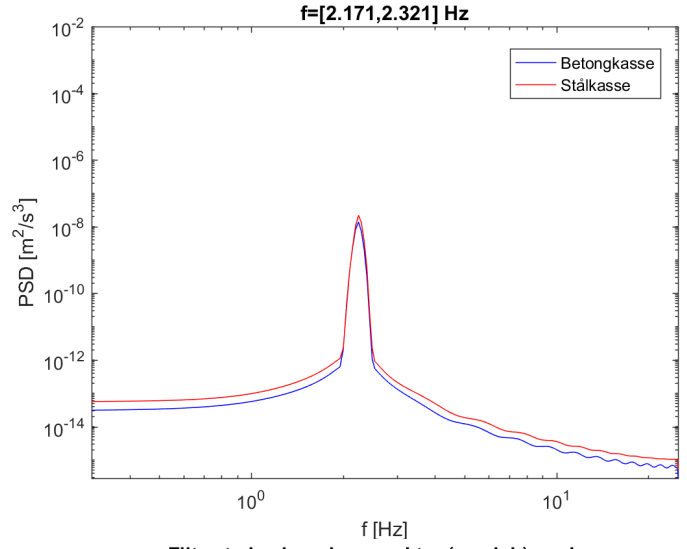
Korrelasjon mellom akselerasjon i betongkasse og stålkasse y-akse

$f=[2.171,2.321]$ Hz, $\rho=-0.7539$



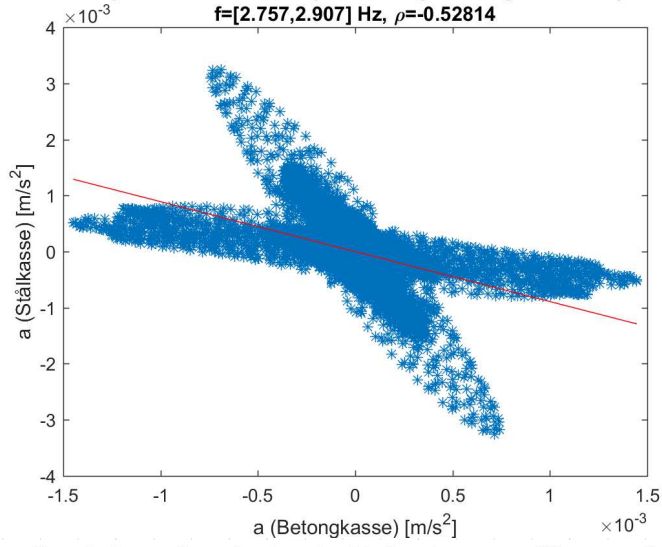
Filtret akselerasjonsspektra (pwelch), y-akse

$f=[2.171,2.321]$ Hz



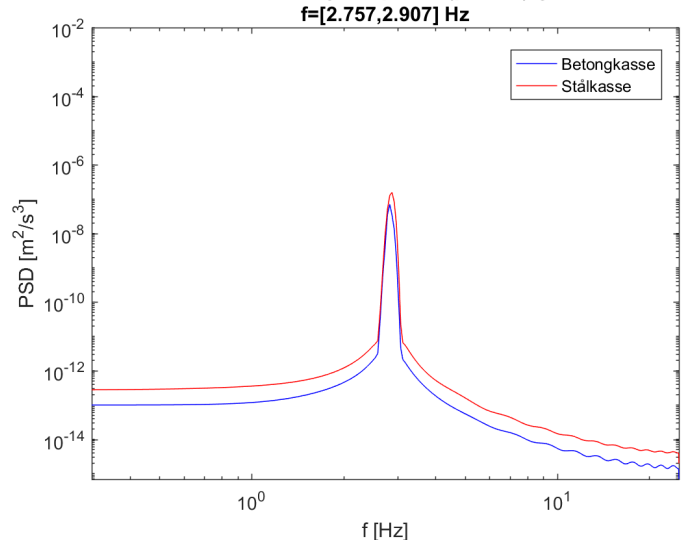
Korrelasjon mellom akselerasjon i betongkasse og stålkasse y-akse

$f=[2.757,2.907]$ Hz, $\rho=-0.52814$



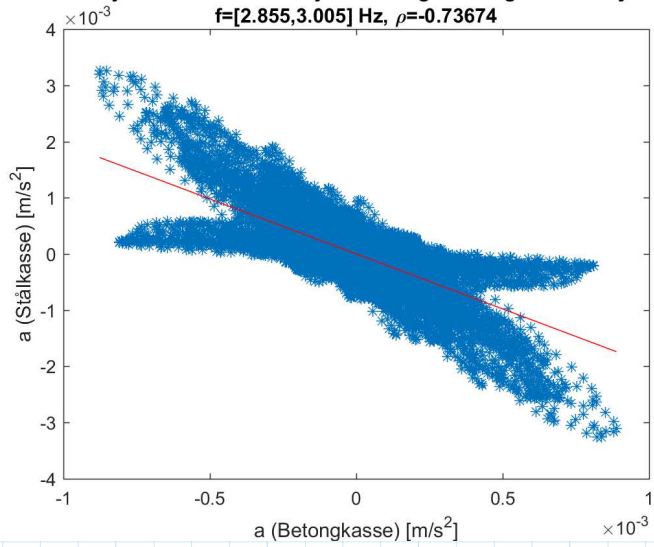
Filtret akselerasjonsspektra (pwelch), y-akse

$f=[2.757,2.907]$ Hz



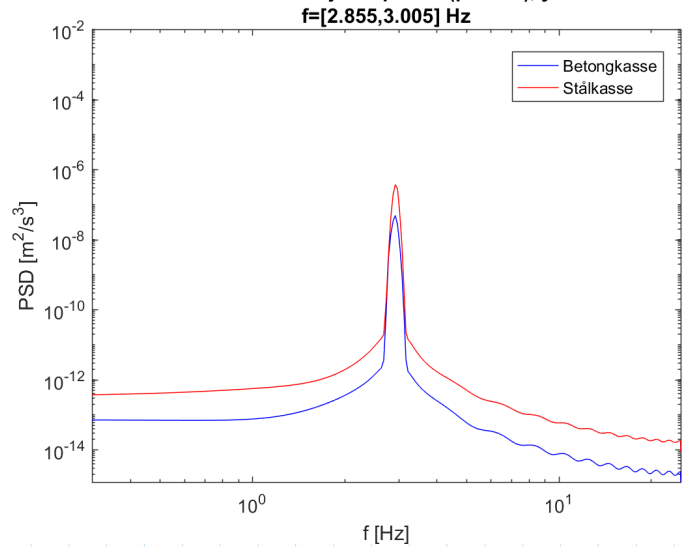
Korrelasjon mellom akselerasjon i betongkasse og stålkasse y-akse

$f=[2.855,3.005]$ Hz, $\rho=-0.73674$



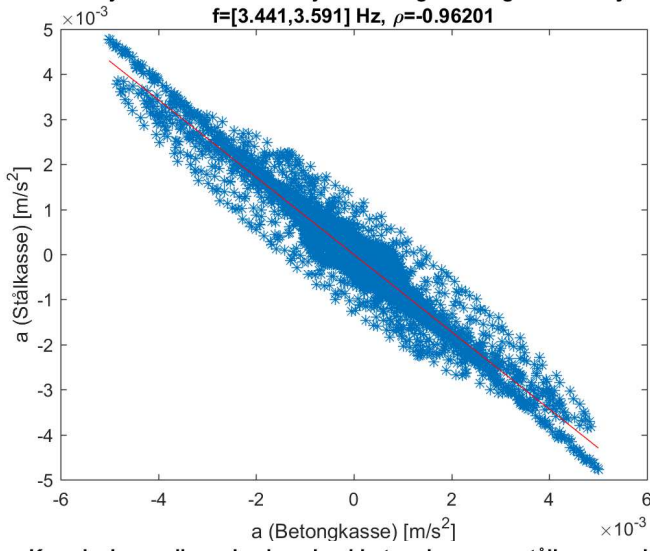
Filtret akselerasjonsspektra (pwelch), y-akse

$f=[2.855,3.005]$ Hz



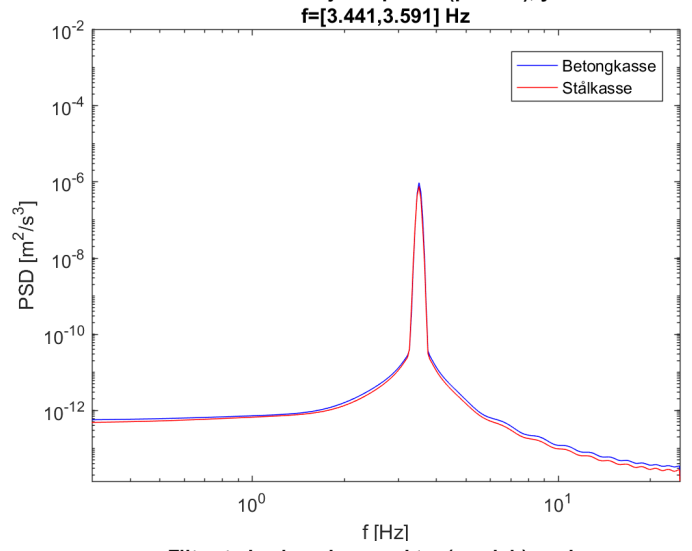
Korrelasjon mellom akselerasjon i betongkasse og stålkasse y-akse

$f=[3.441,3.591]$ Hz, $\rho=-0.96201$



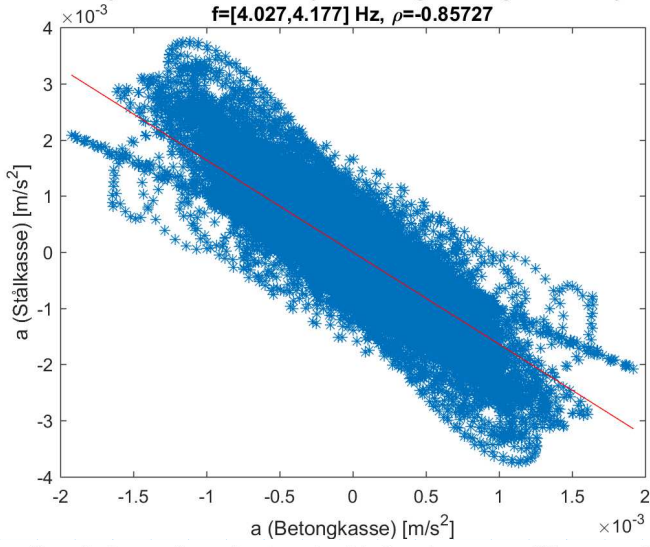
Filtret akselerasjonsspektra (pwelch), y-akse

$f=[3.441,3.591]$ Hz



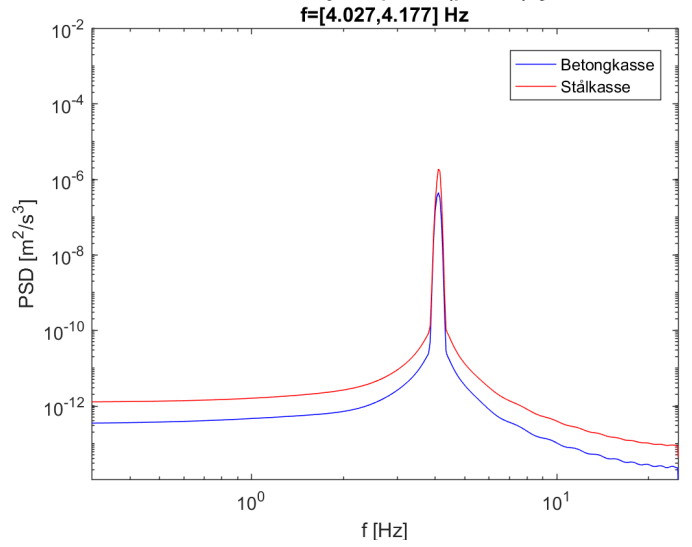
Korrelasjon mellom akselerasjon i betongkasse og stålkasse y-akse

$f=[4.027,4.177]$ Hz, $\rho=-0.85727$



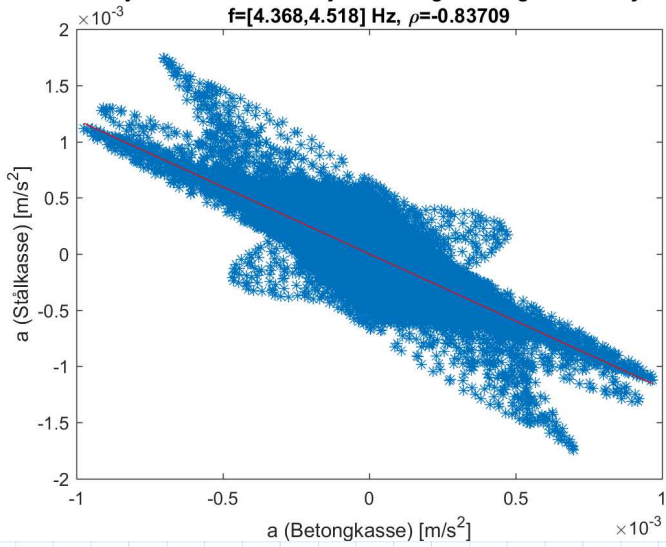
Filtret akselerasjonsspektra (pwelch), y-akse

$f=[4.027,4.177]$ Hz



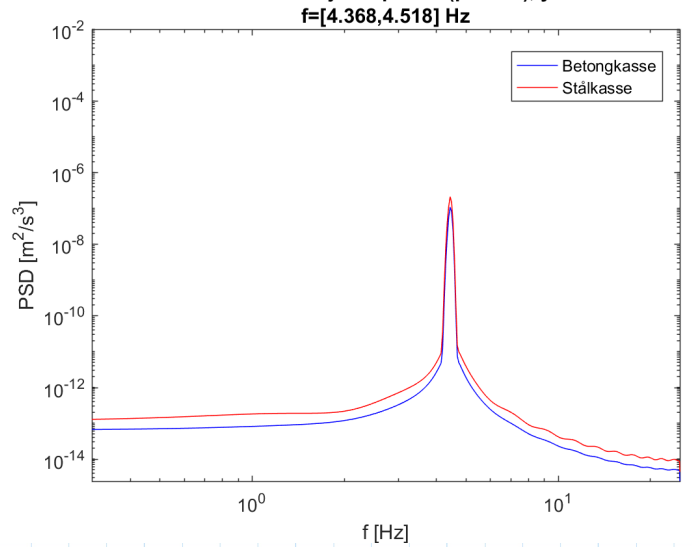
Korrelasjon mellom akselerasjon i betongkasse og stålkasse y-akse

$f=[4.368,4.518]$ Hz, $\rho=-0.83709$

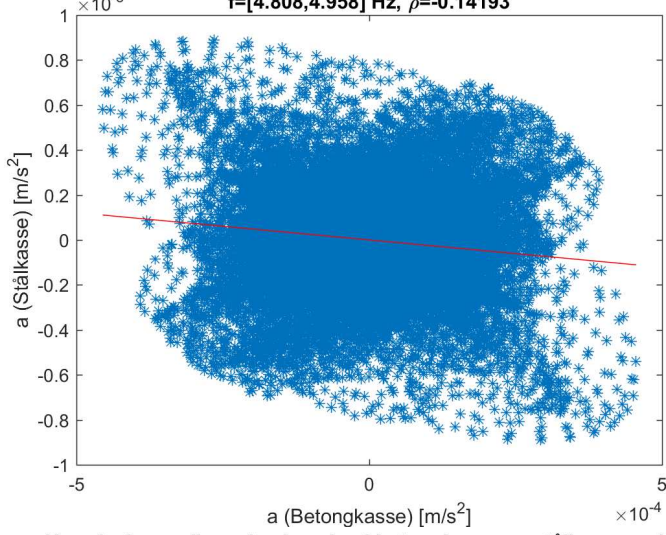


Filtret akselerasjonsspektra (pwelch), y-akse

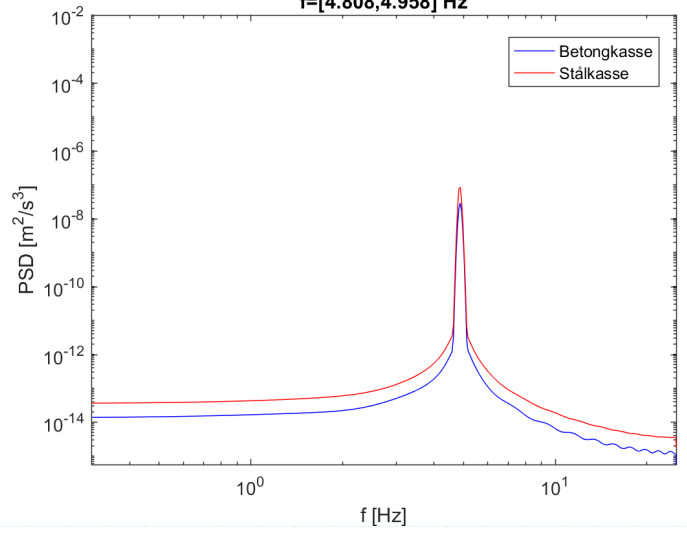
$f=[4.368,4.518]$ Hz



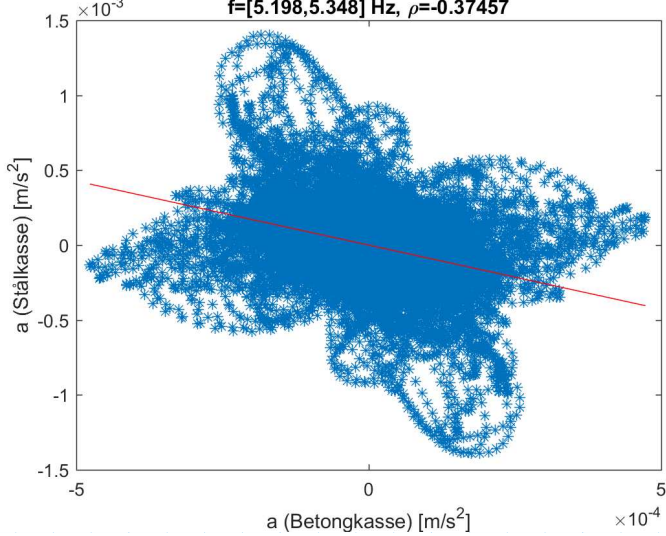
Korrelasjon mellom akselerasjon i betongkasse og stålkasse y-akse
 $f=[4.808, 4.958]$ Hz, $\rho=-0.14193$



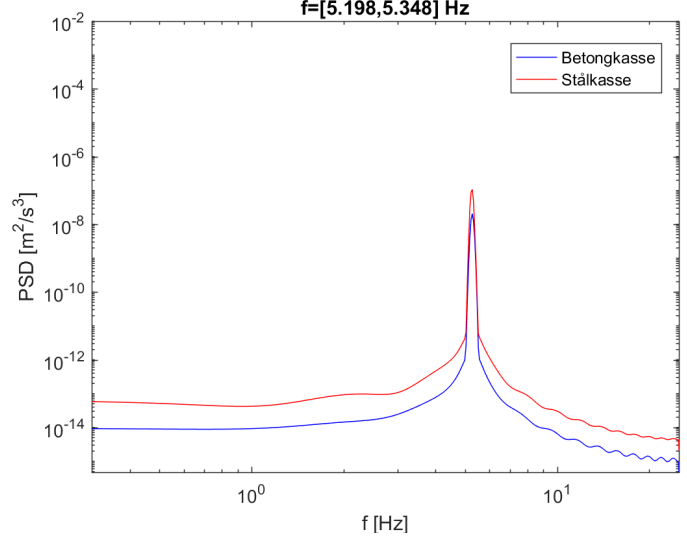
Filtret akselerasjonsspektra (pwelch), y-akse
 $f=[4.808, 4.958]$ Hz



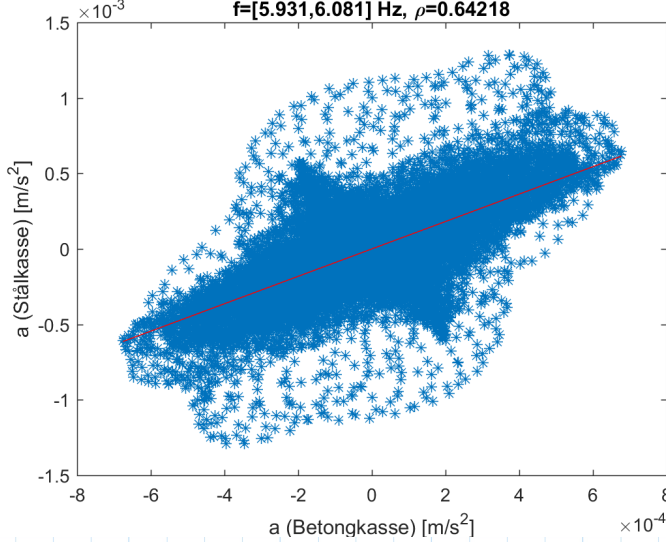
Korrelasjon mellom akselerasjon i betongkasse og stålkasse y-akse
 $f=[5.198, 5.348]$ Hz, $\rho=-0.37457$



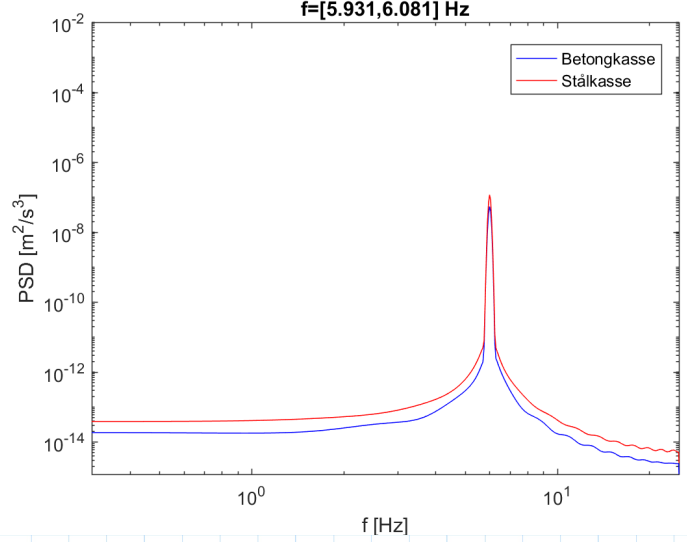
Filtret akselerasjonsspektra (pwelch), y-akse
 $f=[5.198, 5.348]$ Hz



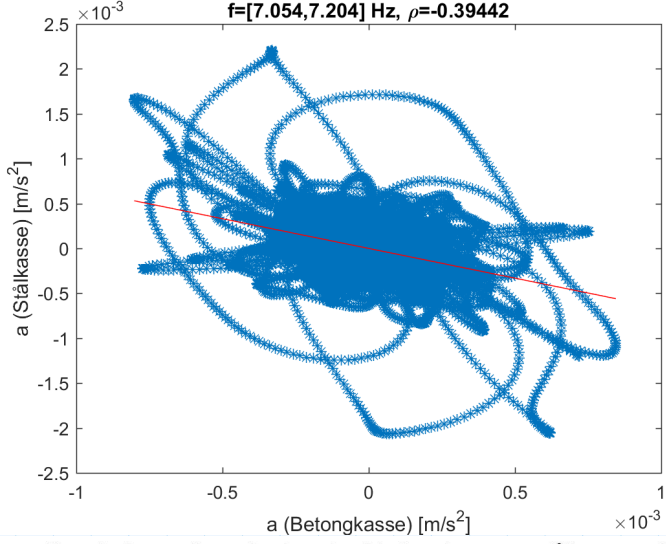
Korrelasjon mellom akselerasjon i betongkasse og stålkasse y-akse
 $f=[5.931, 6.081]$ Hz, $\rho=0.64218$



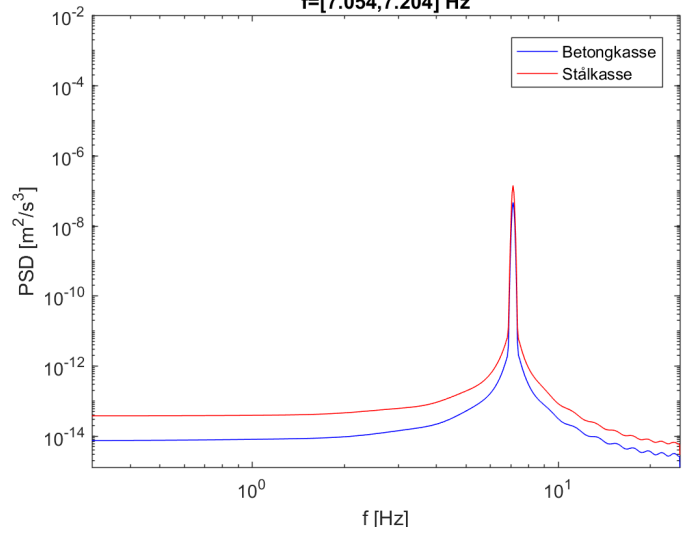
Filtret akselerasjonsspektra (pwelch), y-akse
 $f=[5.931, 6.081]$ Hz



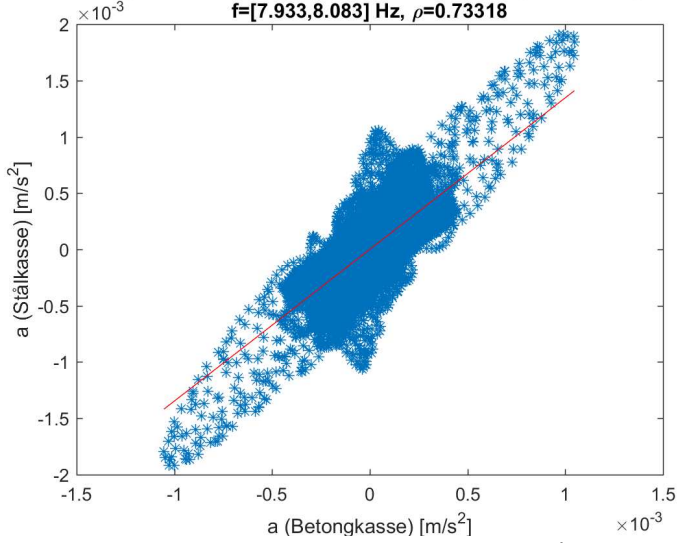
Korrelasjon mellom akselerasjon i betongkasse og stålkasse y-akse
 $f=[7.054,7.204]$ Hz, $\rho=-0.39442$



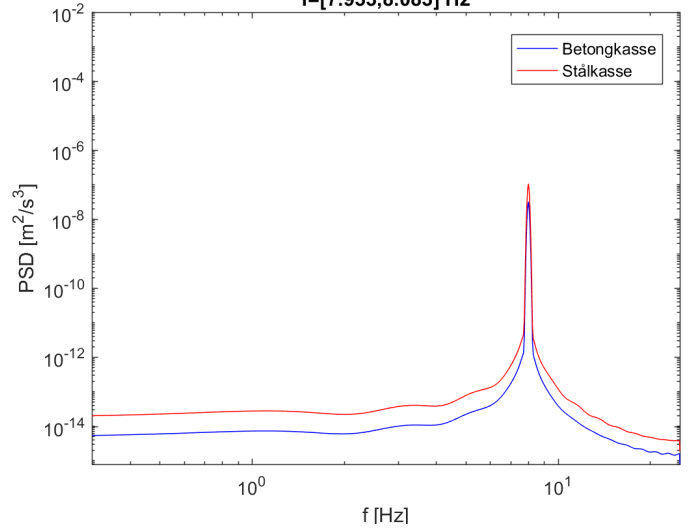
Filtret akselerasjonsspektra (pwelch), y-akse
 $f=[7.054,7.204]$ Hz



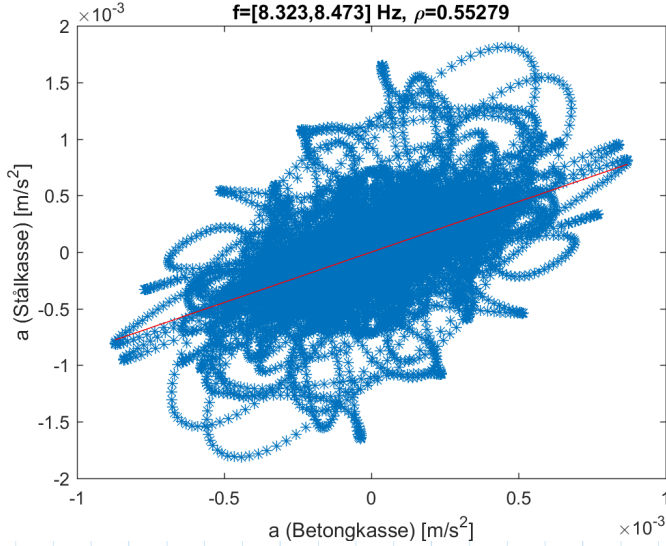
Korrelasjon mellom akselerasjon i betongkasse og stålkasse y-akse
 $f=[7.933,8.083]$ Hz, $\rho=0.73318$



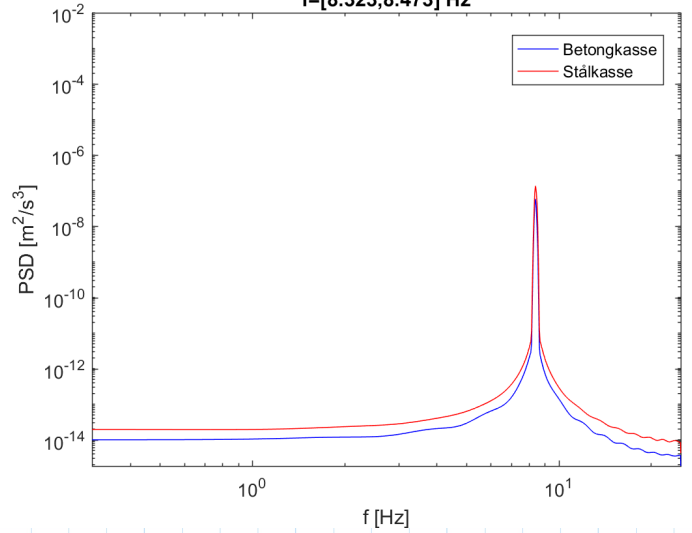
Filtret akselerasjonsspektra (pwelch), y-akse
 $f=[7.933,8.083]$ Hz



Korrelasjon mellom akselerasjon i betongkasse og stålkasse y-akse
 $f=[8.323,8.473]$ Hz, $\rho=0.55279$

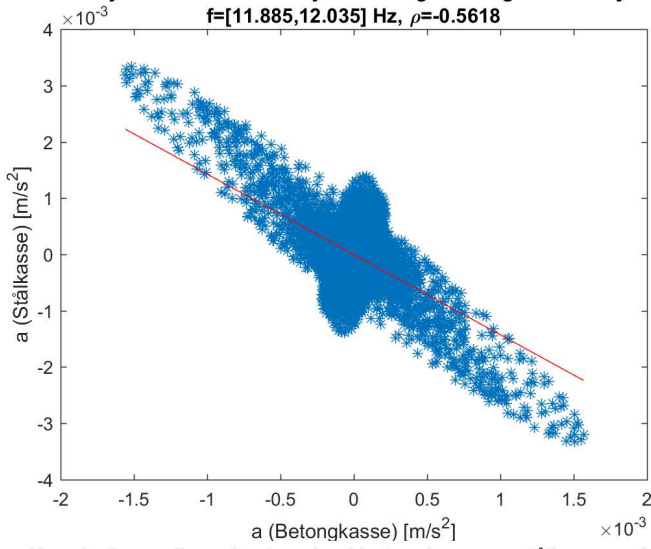


Filtret akselerasjonsspektra (pwelch), y-akse
 $f=[8.323,8.473]$ Hz



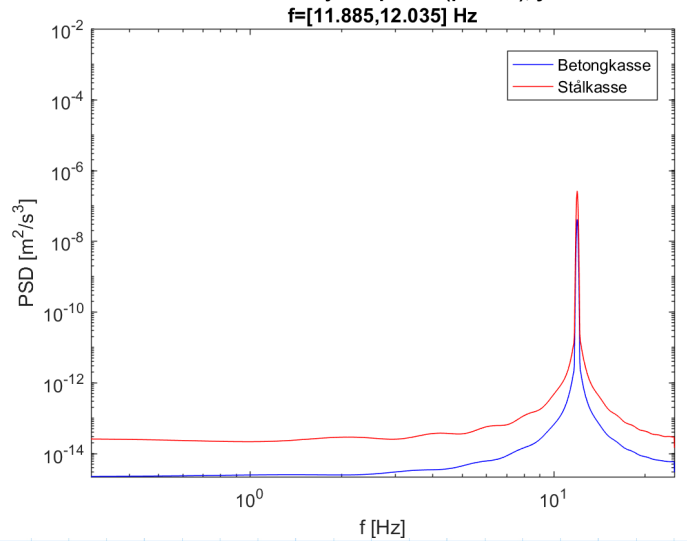
Korrelasjon mellom akselerasjon i betongkasse og stålkasse y-akse

$f=[11.885,12.035]$ Hz, $\rho=-0.5618$



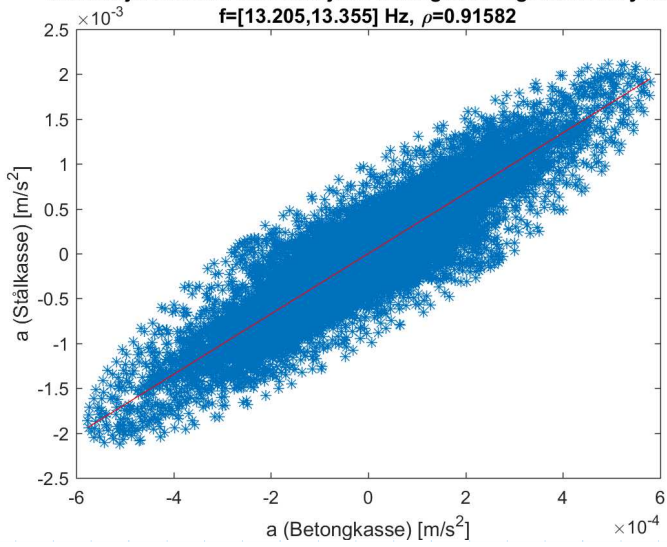
Filtrert akselerasjonsspektra (pwelch), y-akse

$f=[11.885,12.035]$ Hz



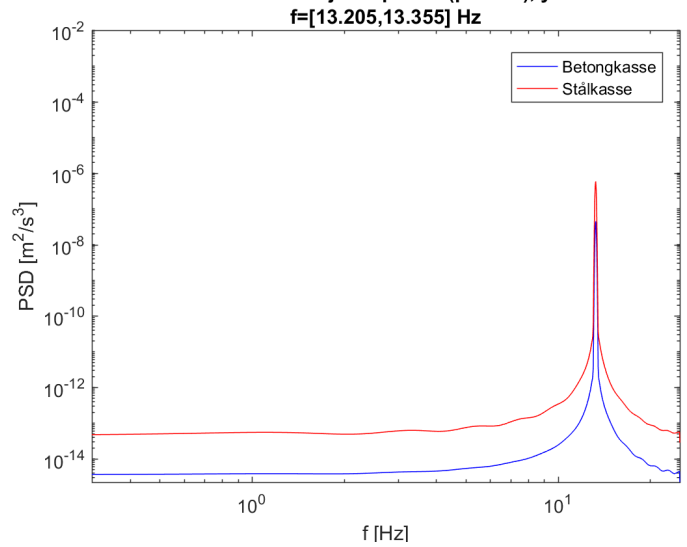
Korrelasjon mellom akselerasjon i betongkasse og stålkasse y-akse

$f=[13.205,13.355]$ Hz, $\rho=0.91582$



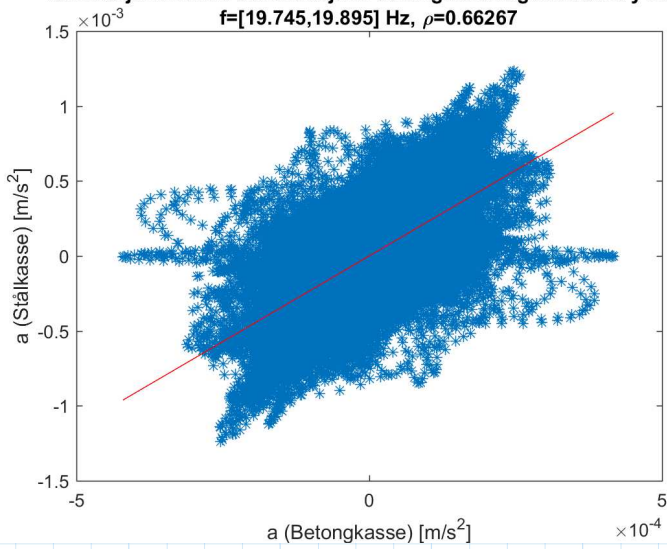
Filtrert akselerasjonsspektra (pwelch), y-akse

$f=[13.205,13.355]$ Hz



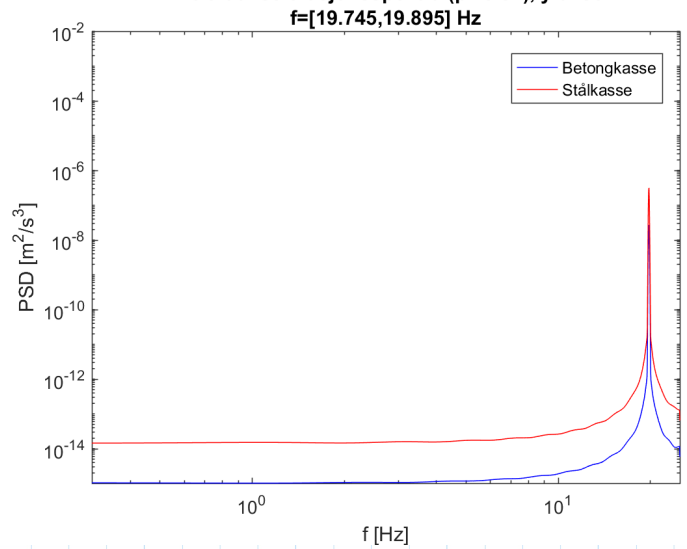
Korrelasjon mellom akselerasjon i betongkasse og stålkasse y-akse

$f=[19.745,19.895]$ Hz, $\rho=0.66267$

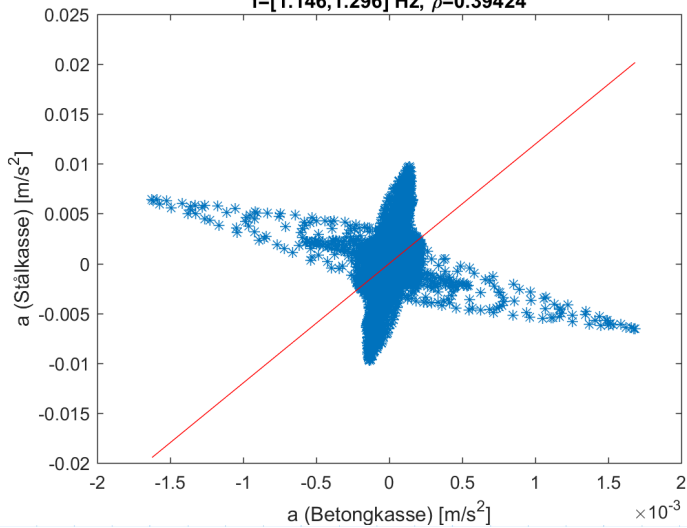


Filtrert akselerasjonsspektra (pwelch), y-akse

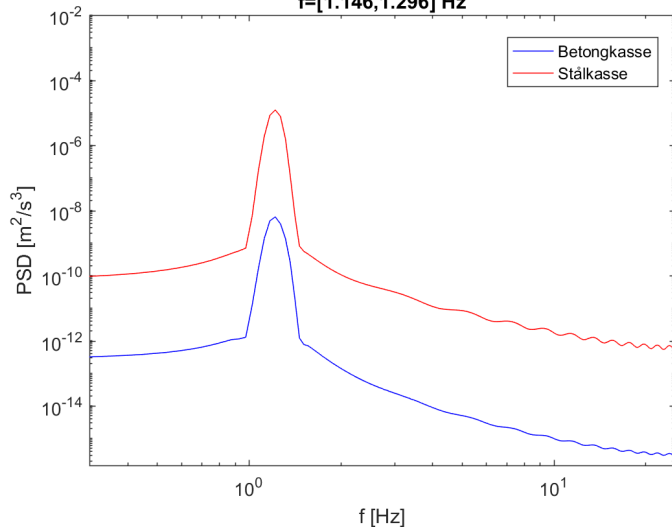
$f=[19.745,19.895]$ Hz



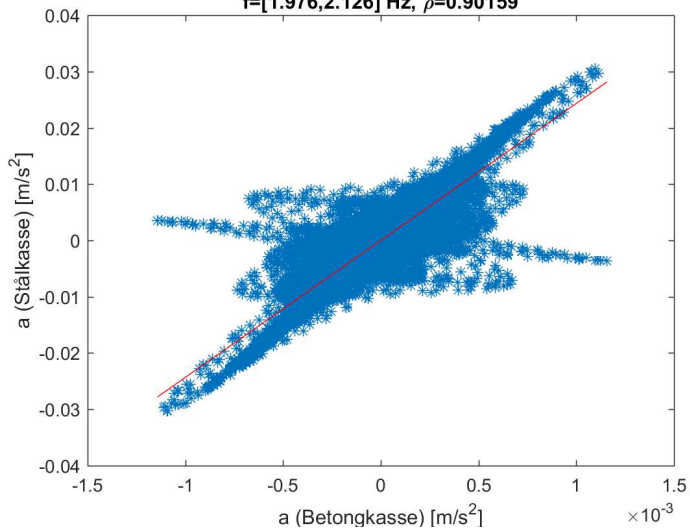
Korrelasjon mellom akselerasjon i betongkasse og stålkasse, z-akse
 $f=[1.146,1.296]$ Hz, $\rho=0.39424$



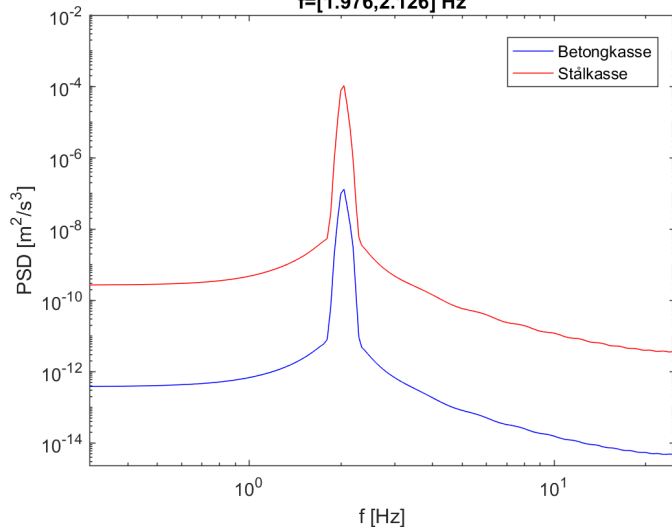
Filtrert spektra (pwelch), z-akse
 $f=[1.146,1.296]$ Hz



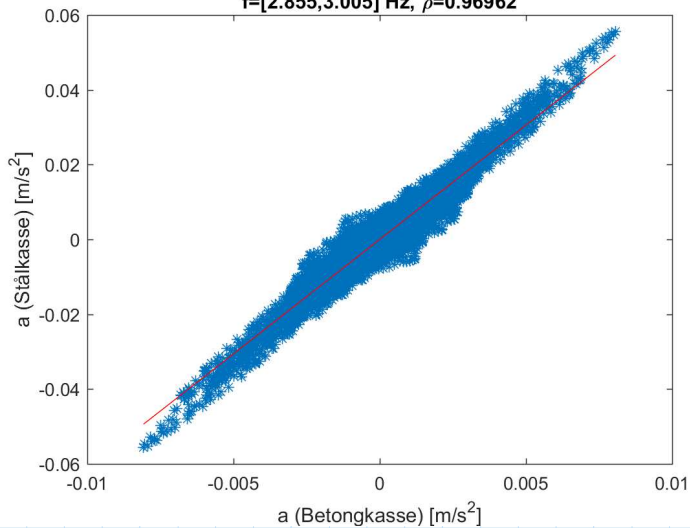
Korrelasjon mellom akselerasjon i betongkasse og stålkasse, z-akse
 $f=[1.976,2.126]$ Hz, $\rho=0.90159$



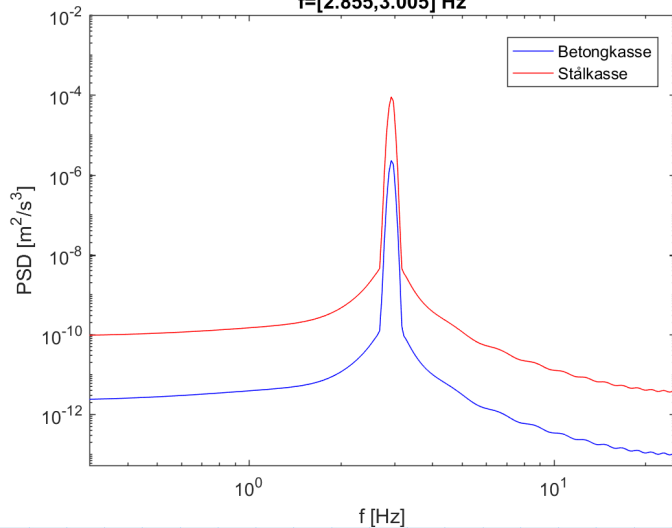
Filtrert spektra (pwelch), z-akse
 $f=[1.976,2.126]$ Hz



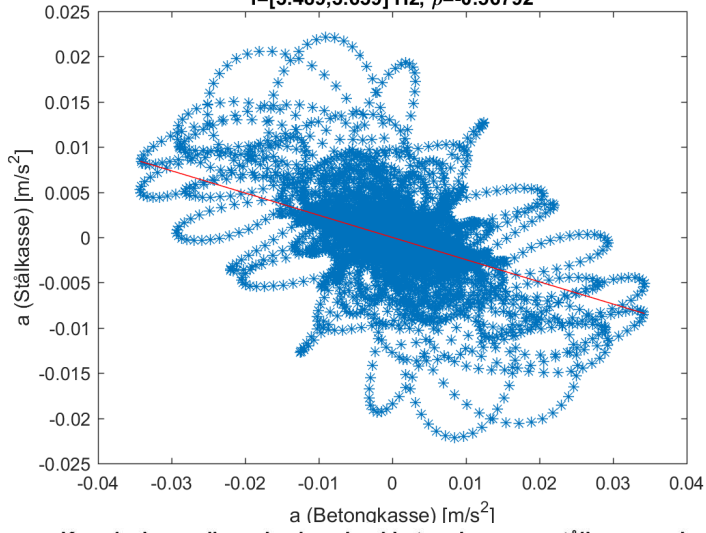
Korrelasjon mellom akselerasjon i betongkasse og stålkasse, z-akse
 $f=[2.855,3.005]$ Hz, $\rho=0.96962$



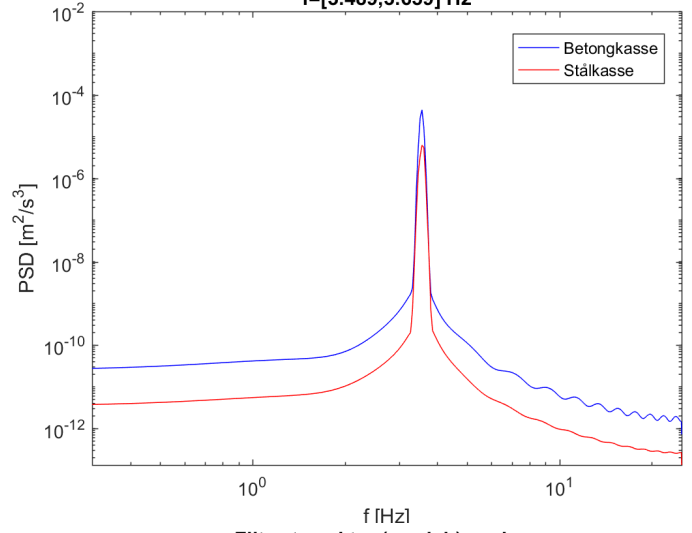
Filtrert spektra (pwelch), z-akse
 $f=[2.855,3.005]$ Hz



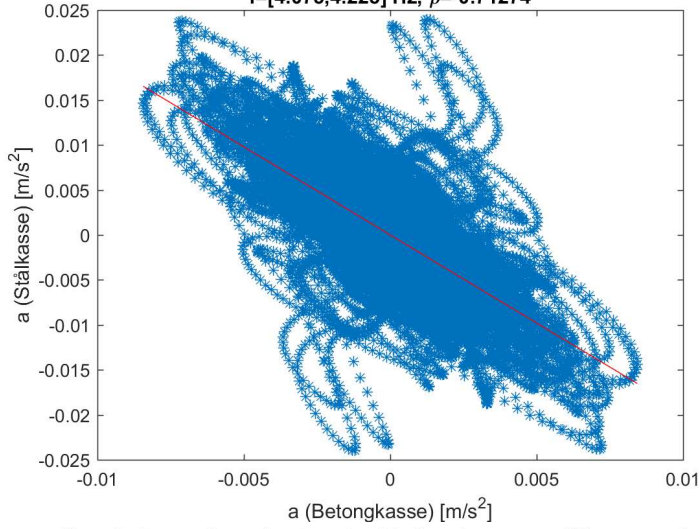
Korrelasjon mellom akselerasjon i betongkasse og stålkasse, z-akse
 $f=[3.489,3.639]$ Hz, $\rho=-0.56792$



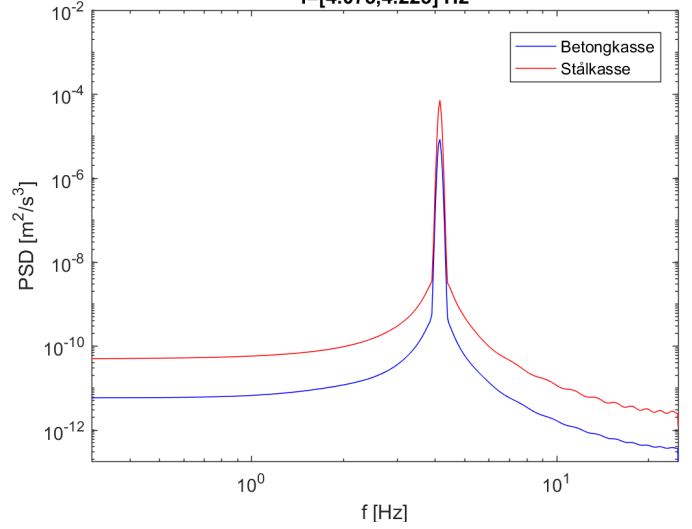
Filtrert spektra (pwelch), z-akse
 $f=[3.489,3.639]$ Hz



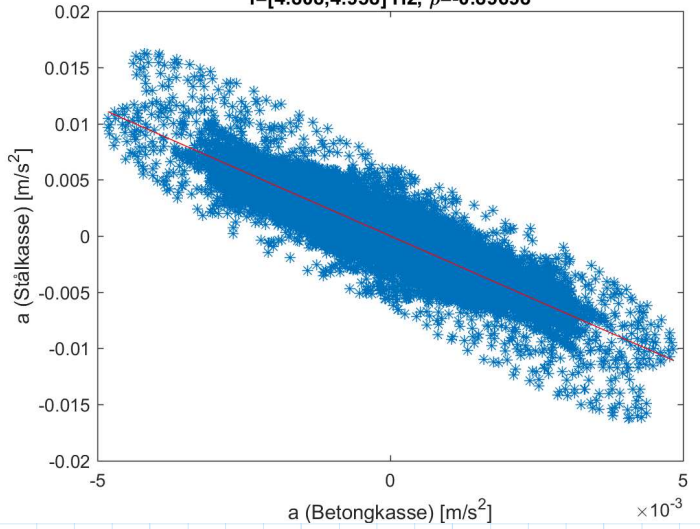
Korrelasjon mellom akselerasjon i betongkasse og stålkasse, z-akse
 $f=[4.075,4.225]$ Hz, $\rho=-0.71274$



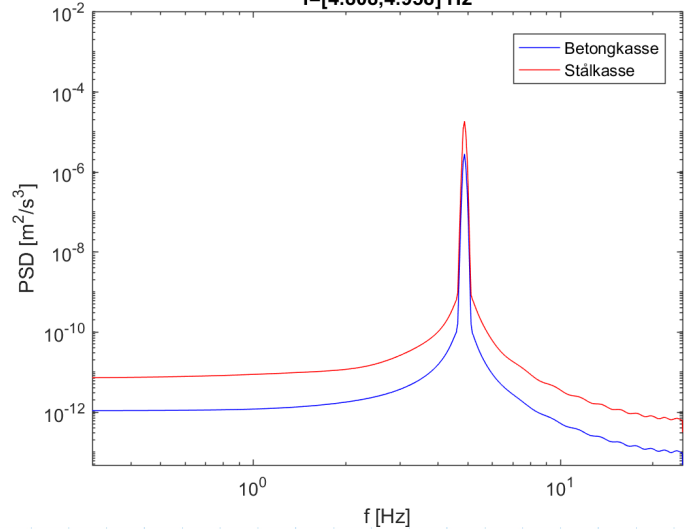
Filtrert spektra (pwelch), z-akse
 $f=[4.075,4.225]$ Hz



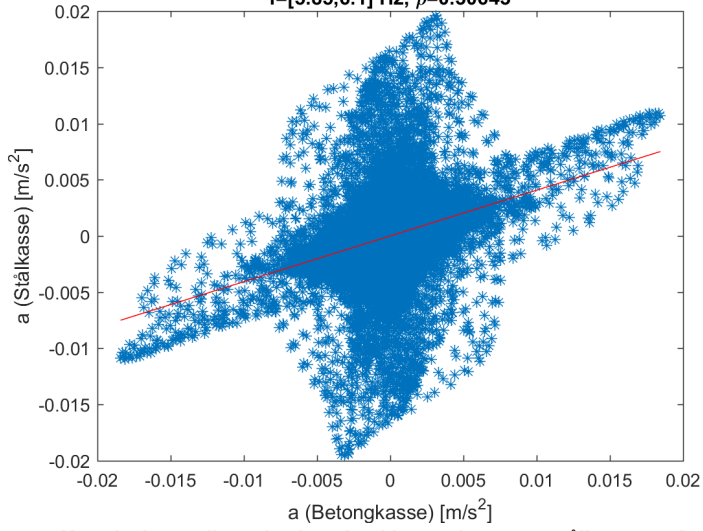
Korrelasjon mellom akselerasjon i betongkasse og stålkasse, z-akse
 $f=[4.808,4.958]$ Hz, $\rho=-0.89698$



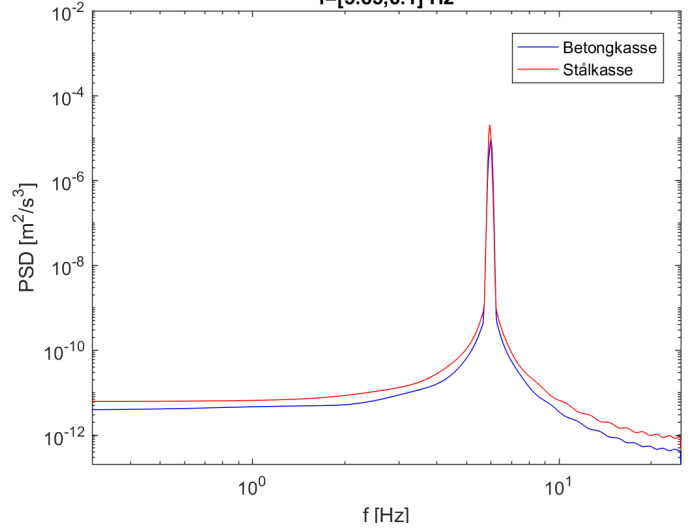
Filtrert spektra (pwelch), z-akse
 $f=[4.808,4.958]$ Hz



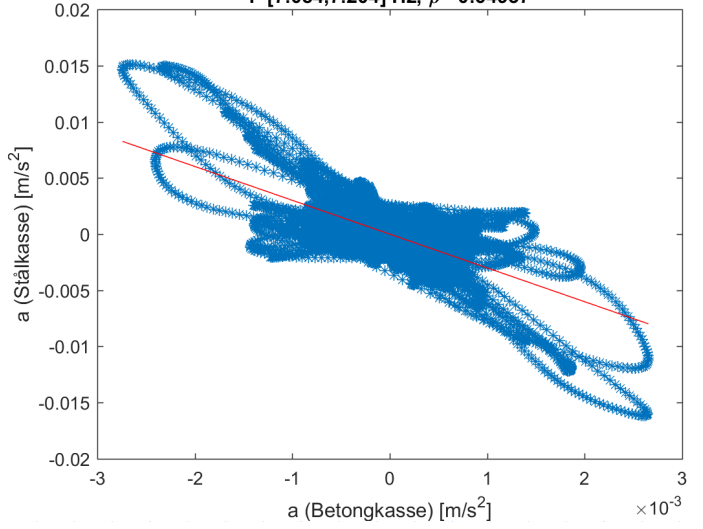
Korrelasjon mellom akselerasjon i betongkasse og stålkasse, z-akse
 $f=[5.85,6.1]$ Hz, $\rho=0.30643$



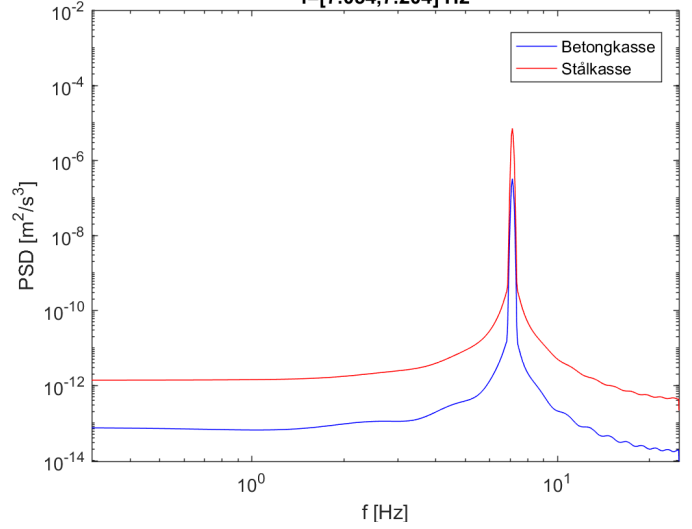
Filtrert spektra (pwelch), z-akse
 $f=[5.85,6.1]$ Hz



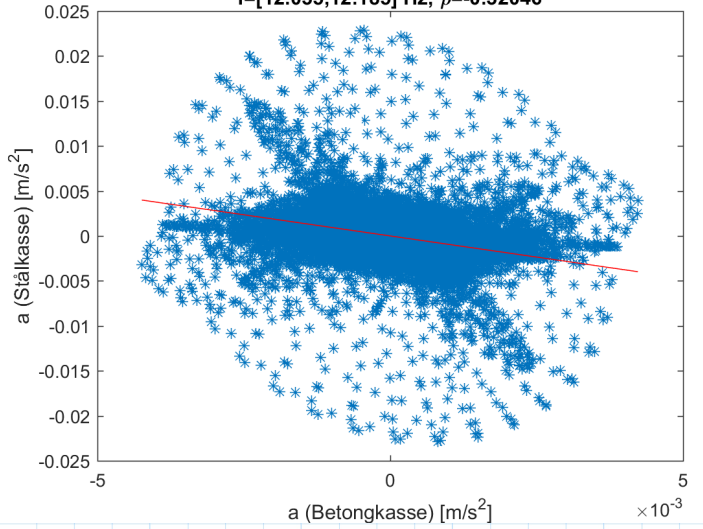
Korrelasjon mellom akselerasjon i betongkasse og stålkasse, z-akse
 $f=[7.054,7.204]$ Hz, $\rho=-0.64937$



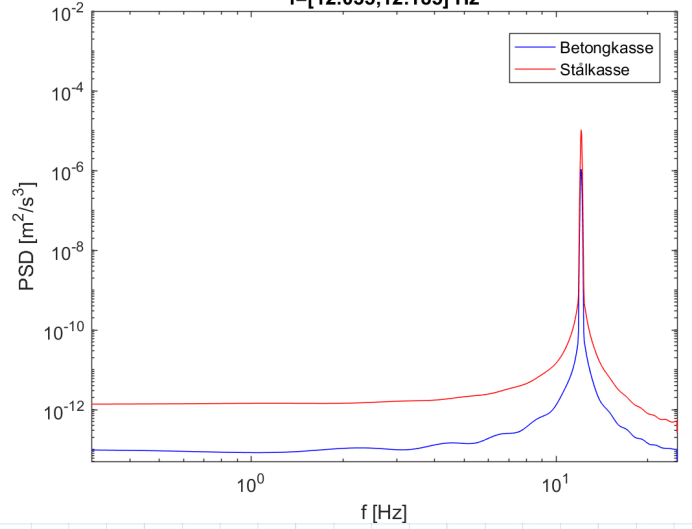
Filtrert spektra (pwelch), z-akse
 $f=[7.054,7.204]$ Hz



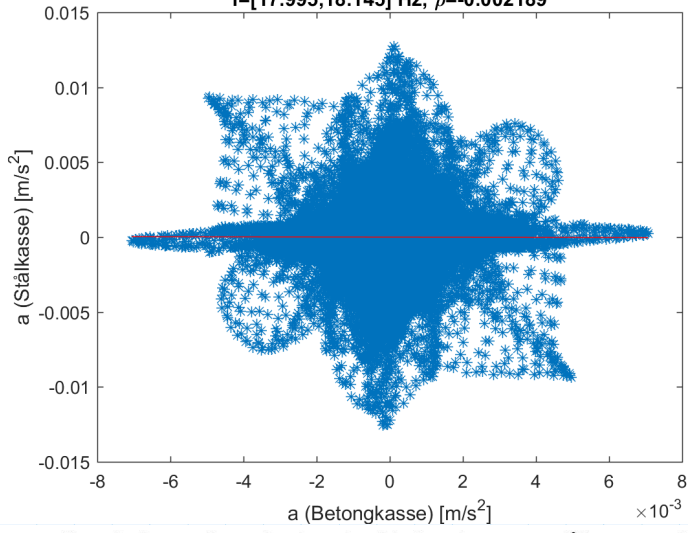
Korrelasjon mellom akselerasjon i betongkasse og stålkasse, z-akse
 $f=[12.035,12.185]$ Hz, $\rho=-0.32046$



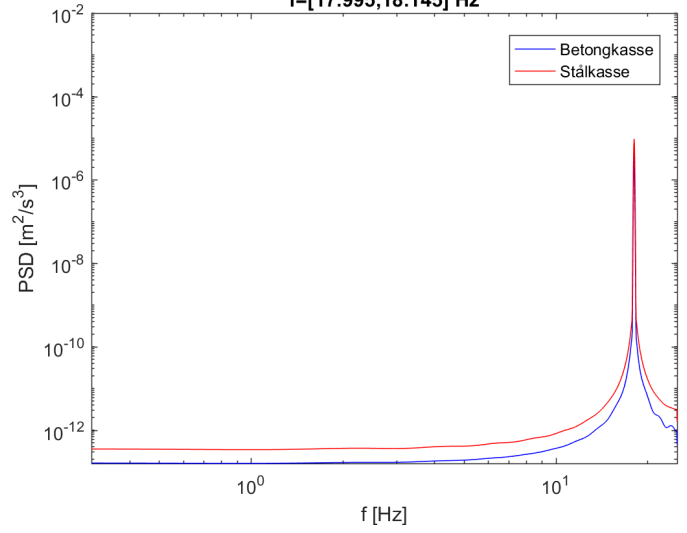
Filtrert spektra (pwelch), z-akse
 $f=[12.035,12.185]$ Hz



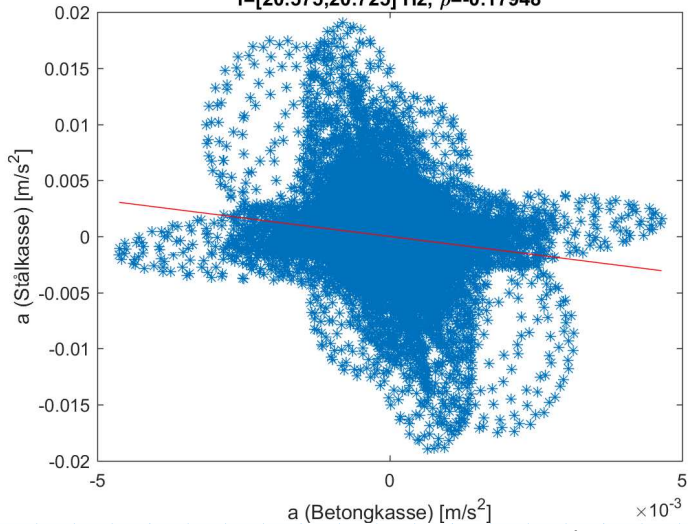
Korrelasjon mellom akselerasjon i betongkasse og stålkasse, z-akse
 $f=[17.995,18.145]$ Hz, $\rho=-0.002189$



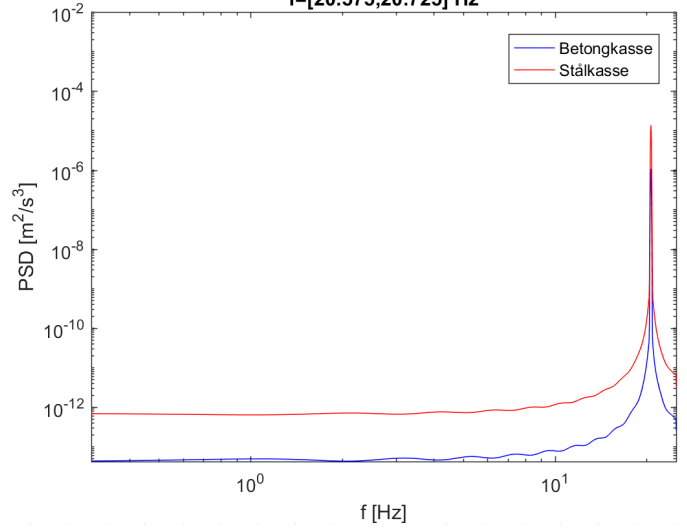
Filtrert spektra (pwelch), z-akse
 $f=[17.995,18.145]$ Hz



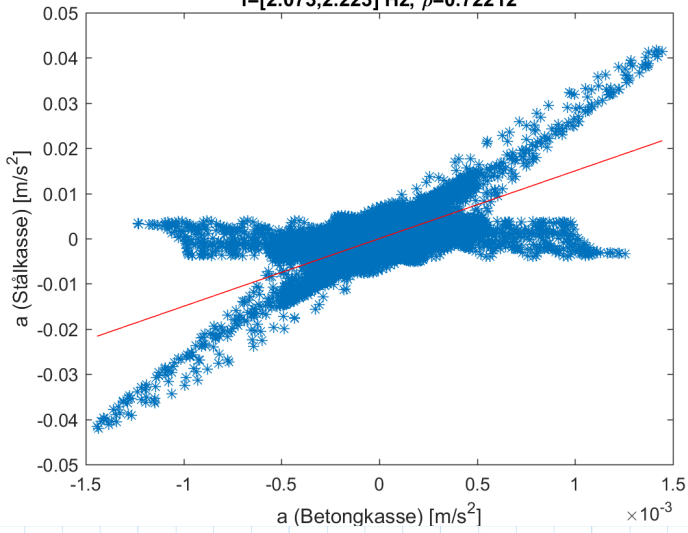
Korrelasjon mellom akselerasjon i betongkasse og stålkasse, z-akse
 $f=[20.575,20.725]$ Hz, $\rho=-0.17948$



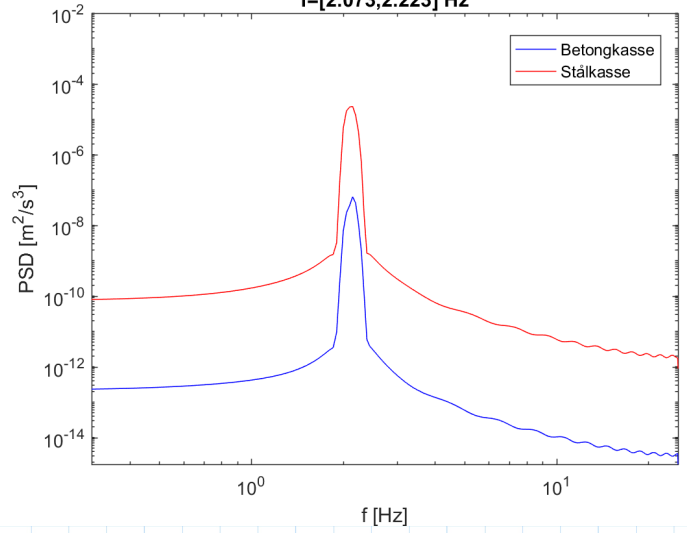
Filtrert spektra (pwelch), z-akse
 $f=[20.575,20.725]$ Hz



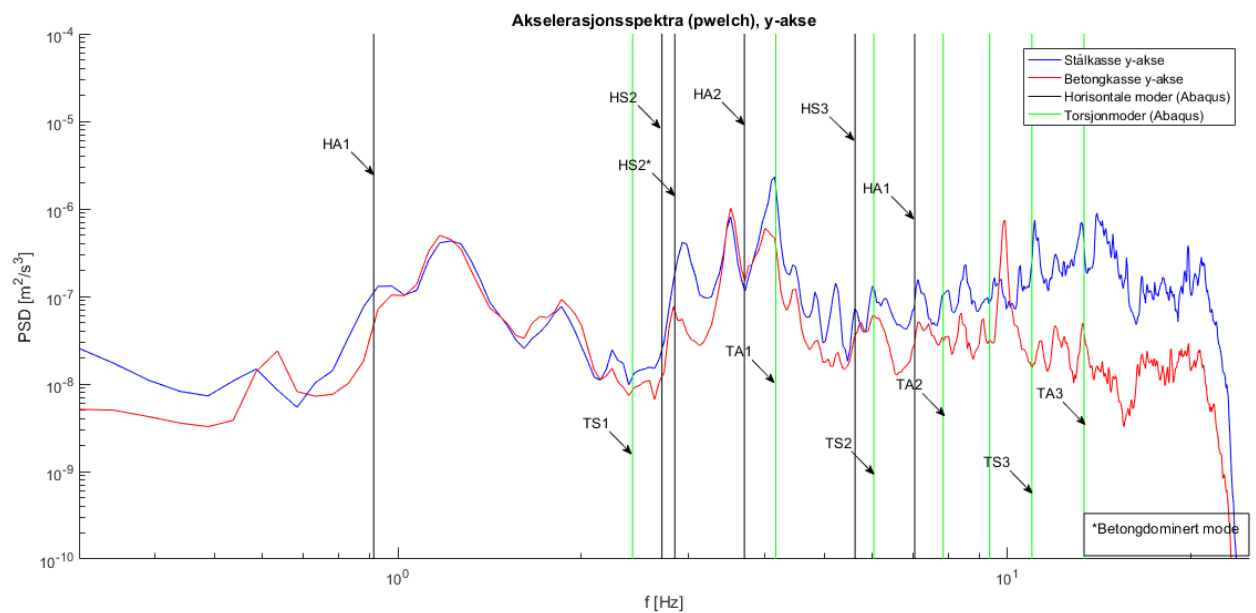
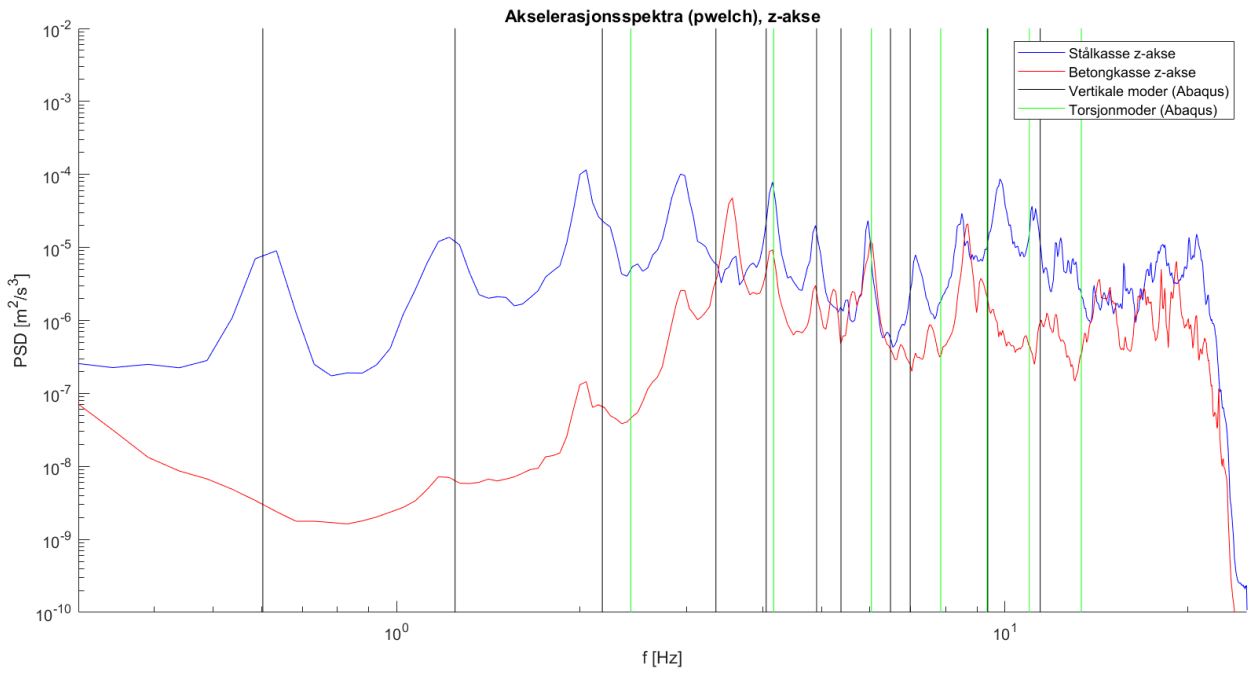
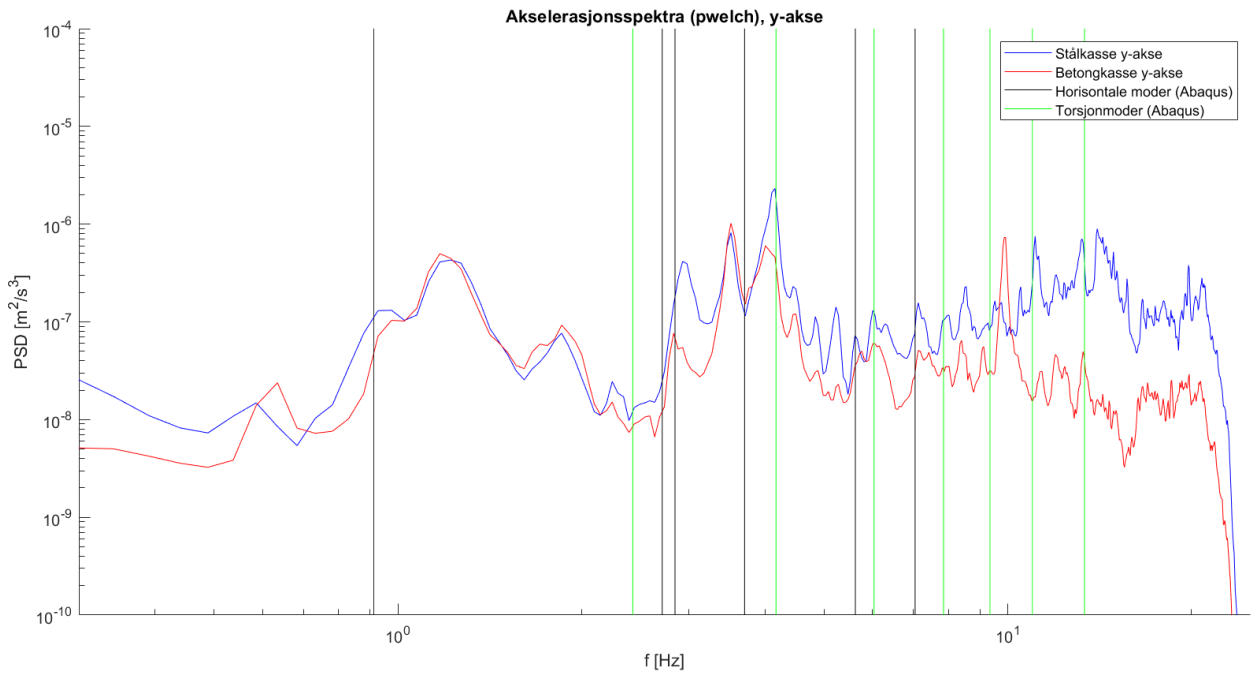
Korrelasjon mellom akselerasjon i betongkasse og stålkasse, z-akse
 $f=[2.073,2.223]$ Hz, $\rho=0.72212$

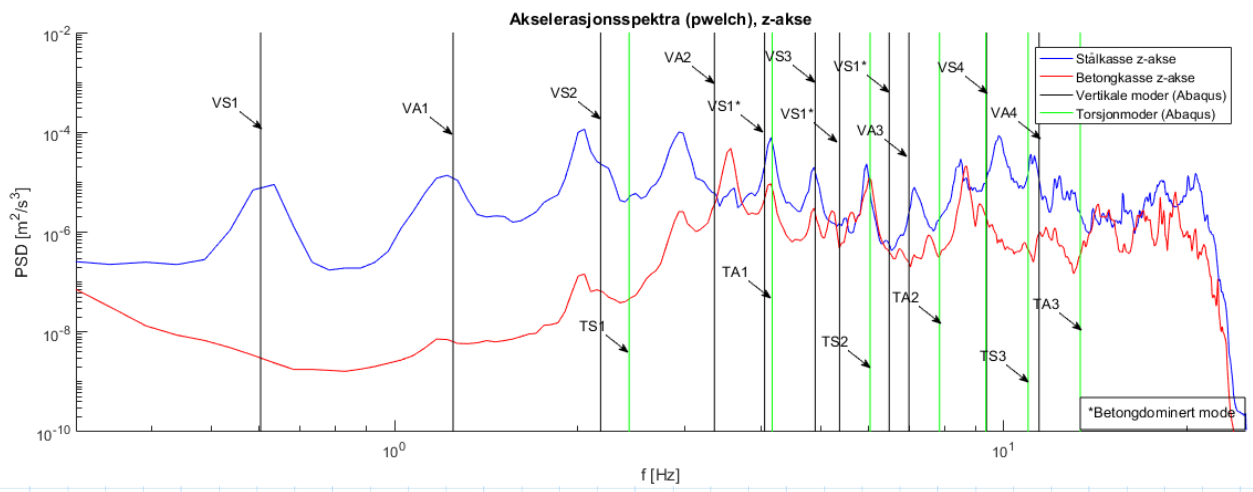


Filtrert spektra (pwelch), z-akse
 $f=[2.073,2.223]$ Hz

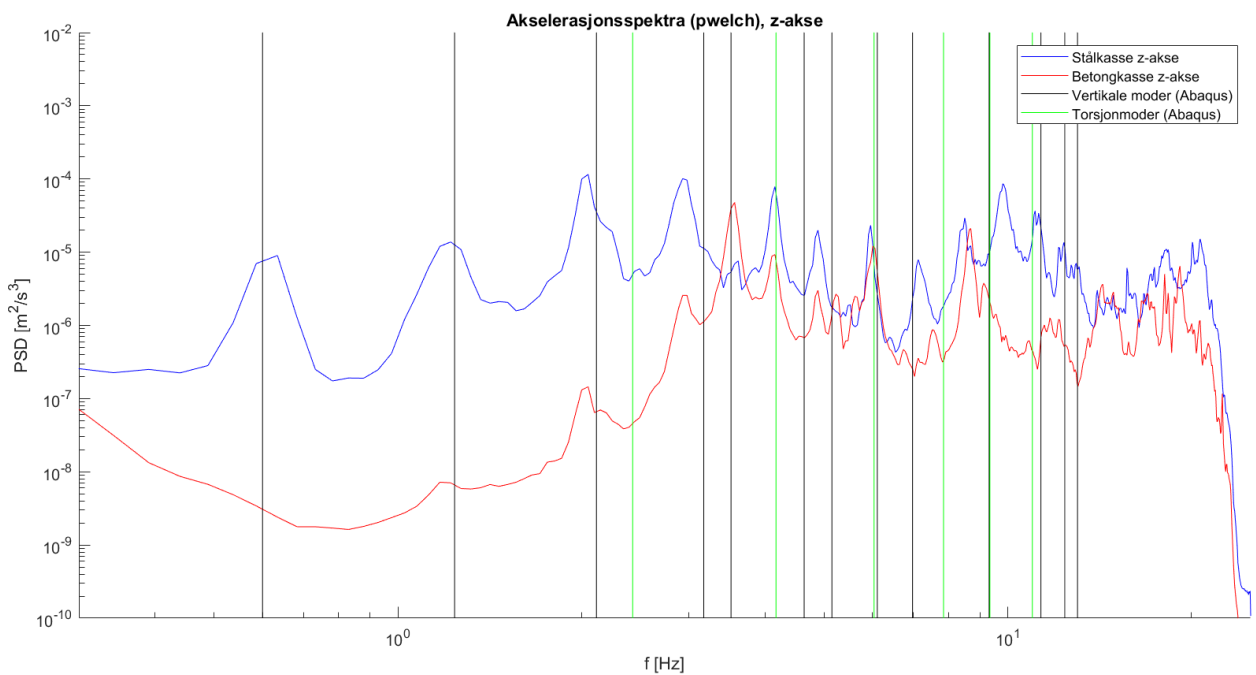
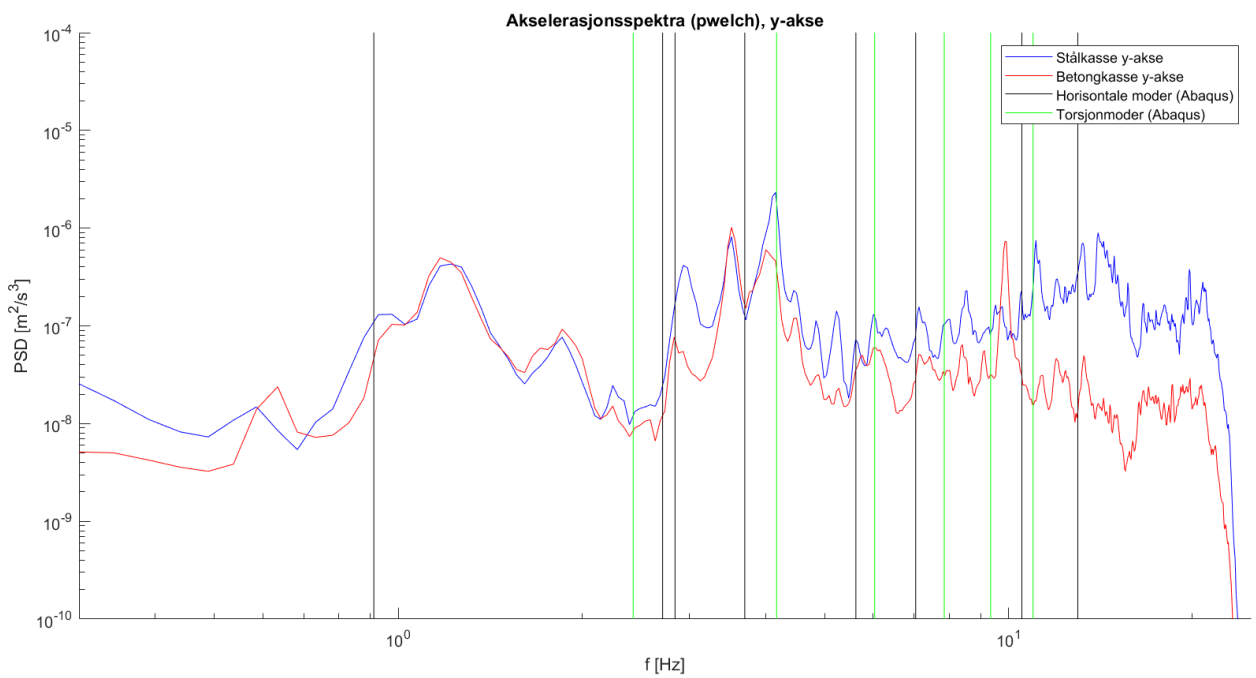


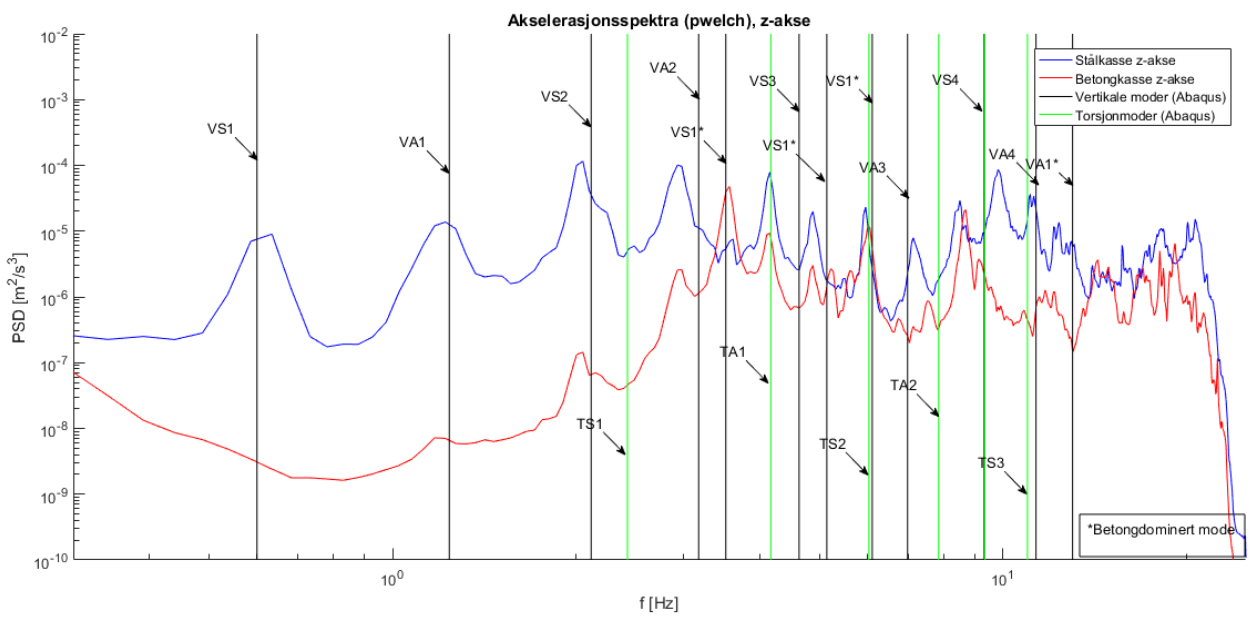
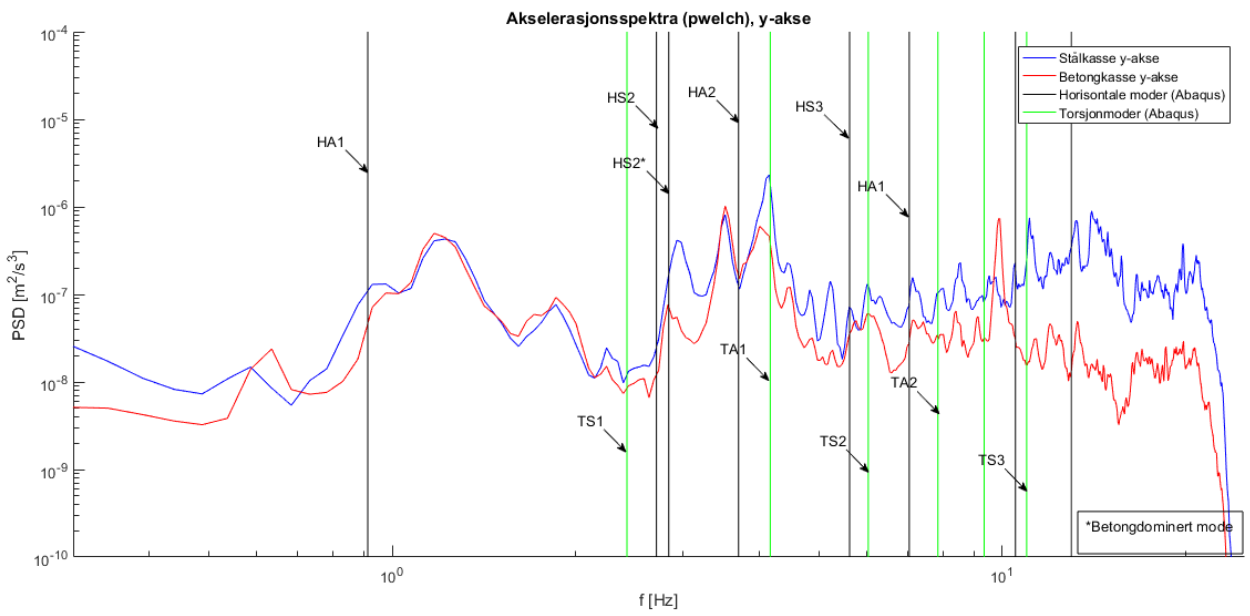
Resultat randbetingelsesituasjon 1 (Kapittel 5.3)



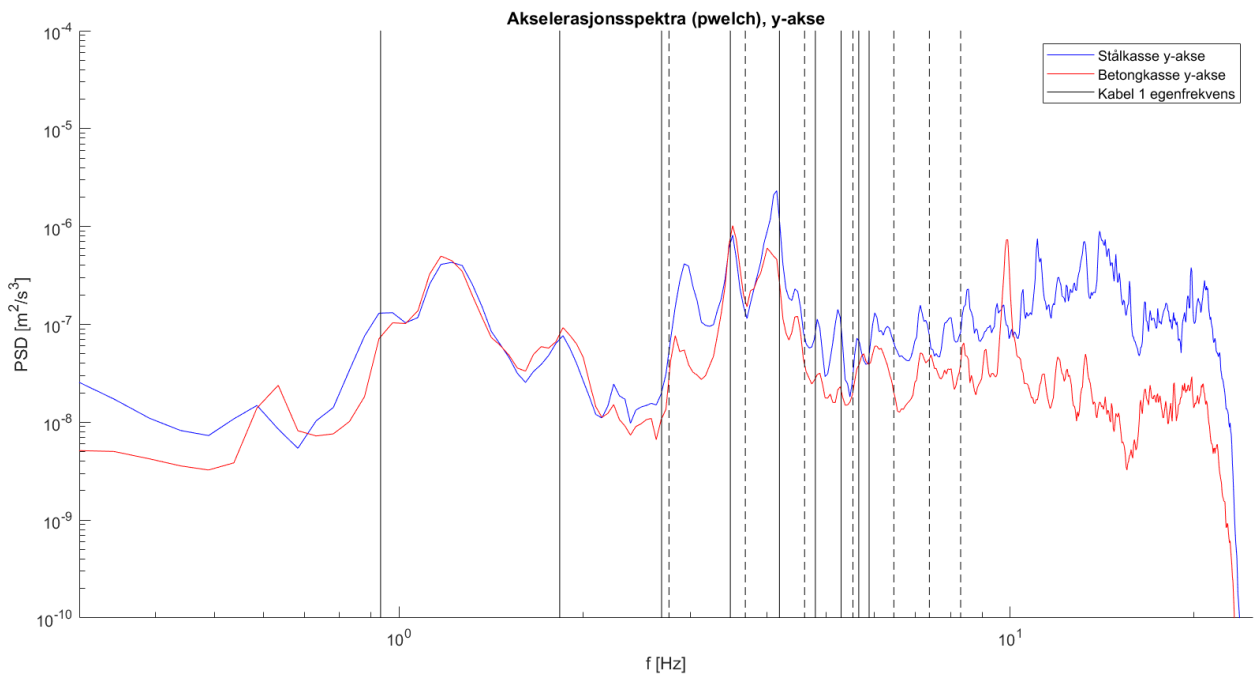


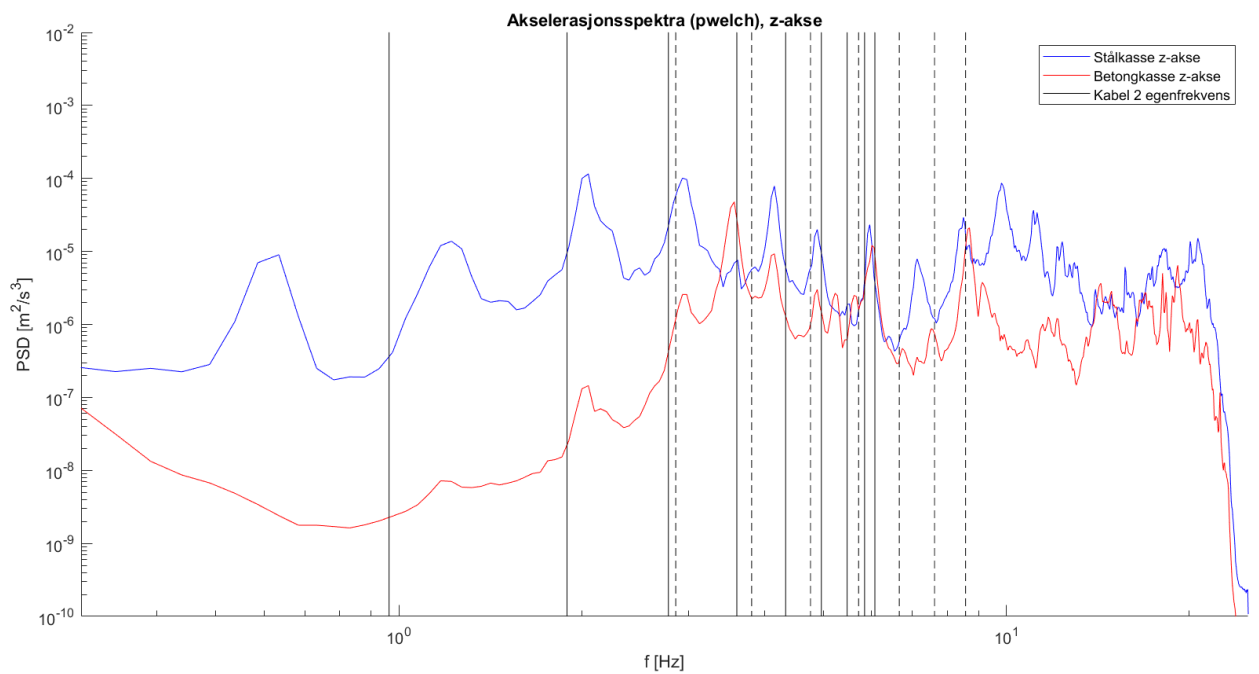
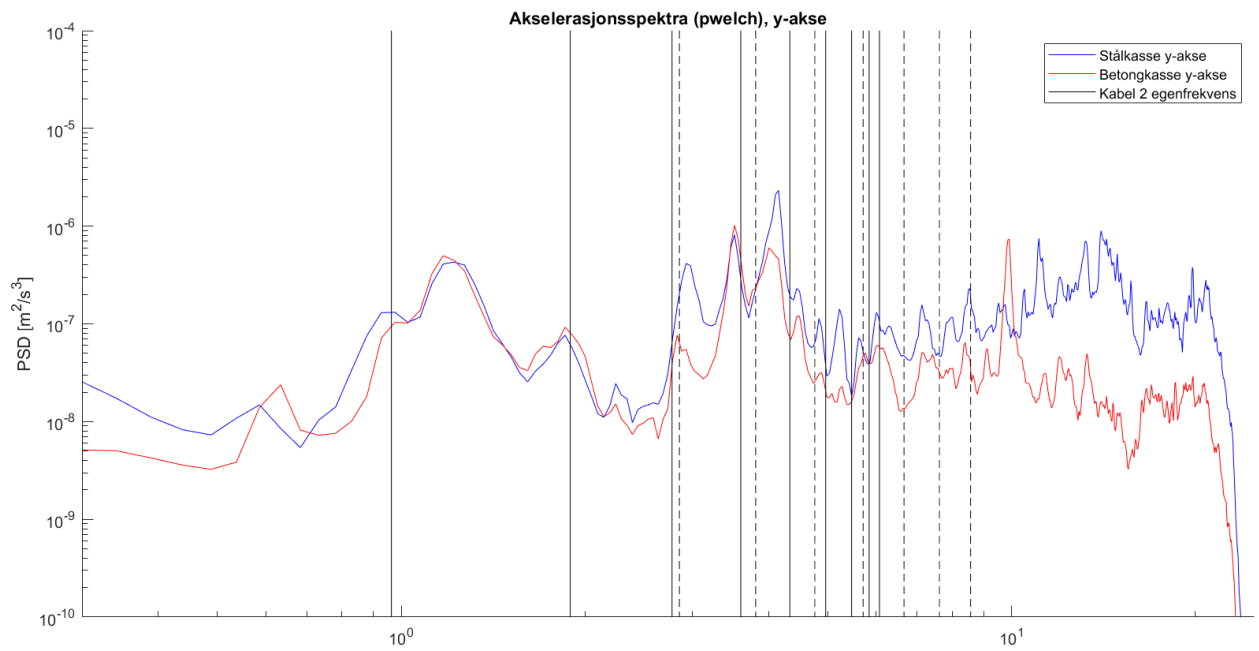
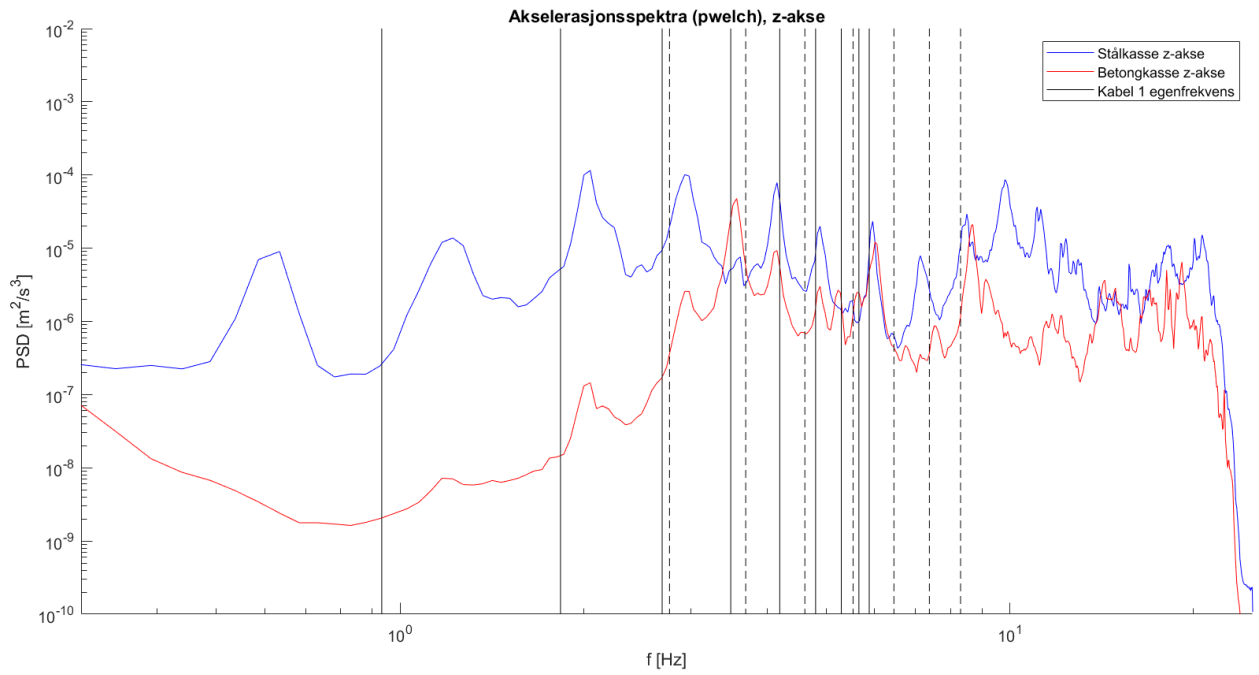
Resultat randbetingelsesituasjon 2 (Kapittel 5.4)

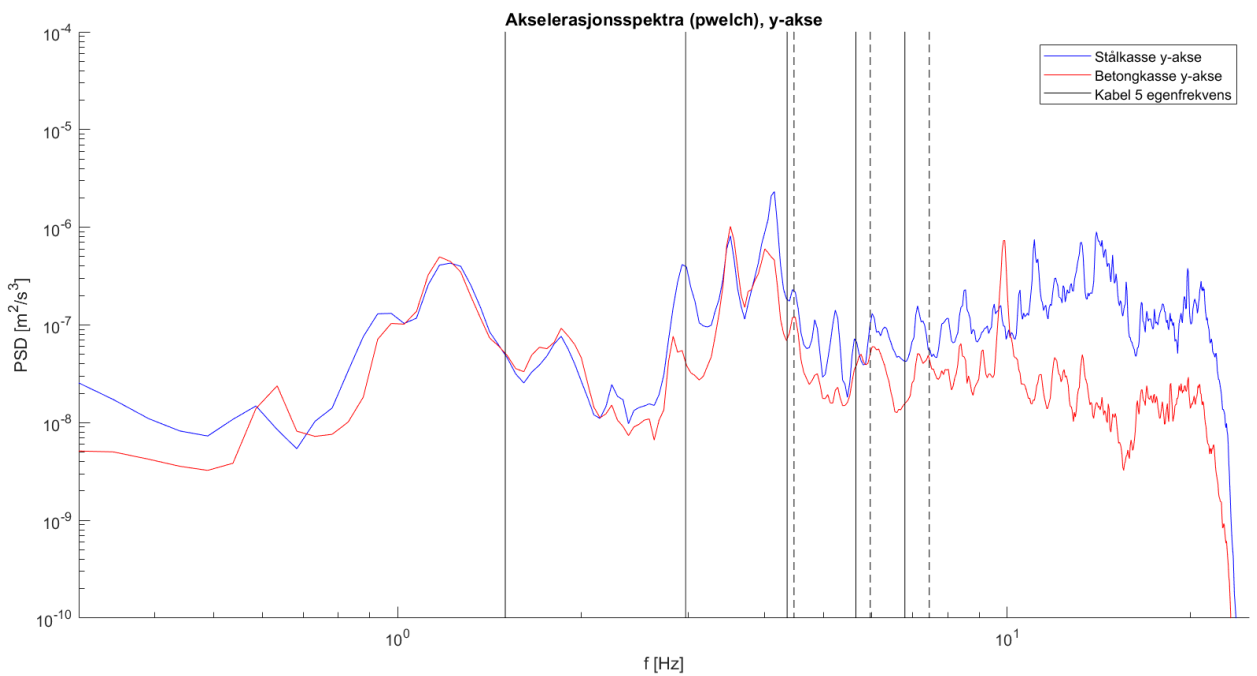
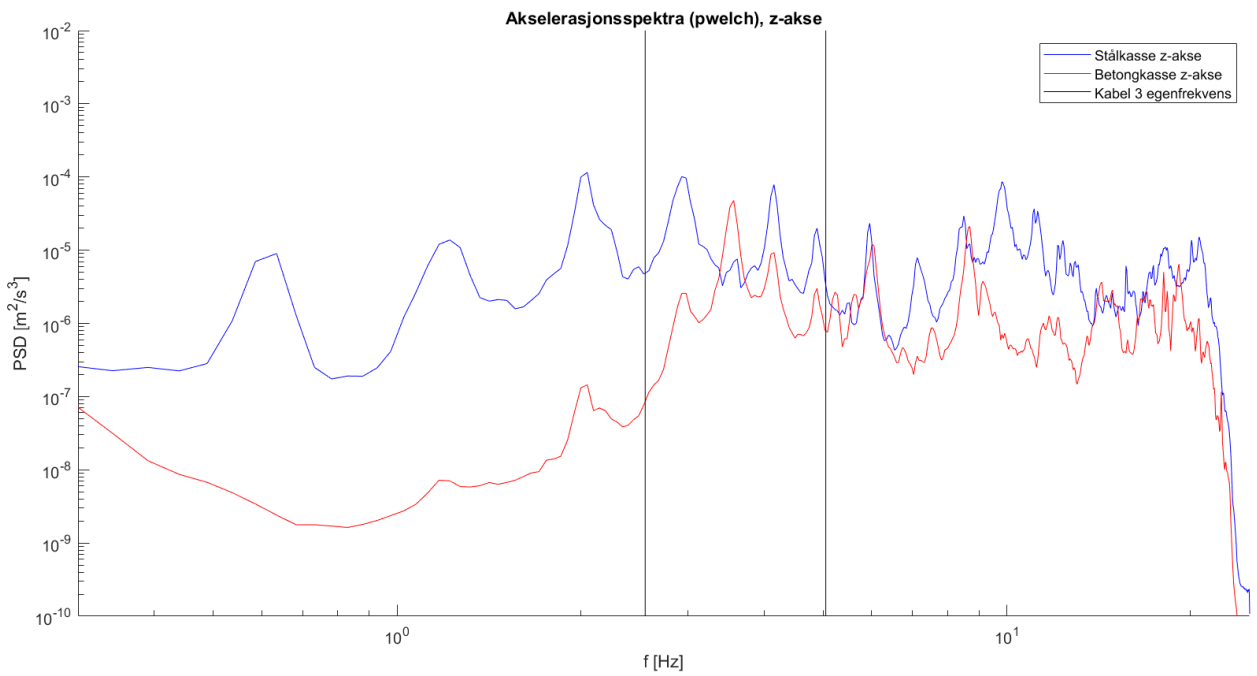
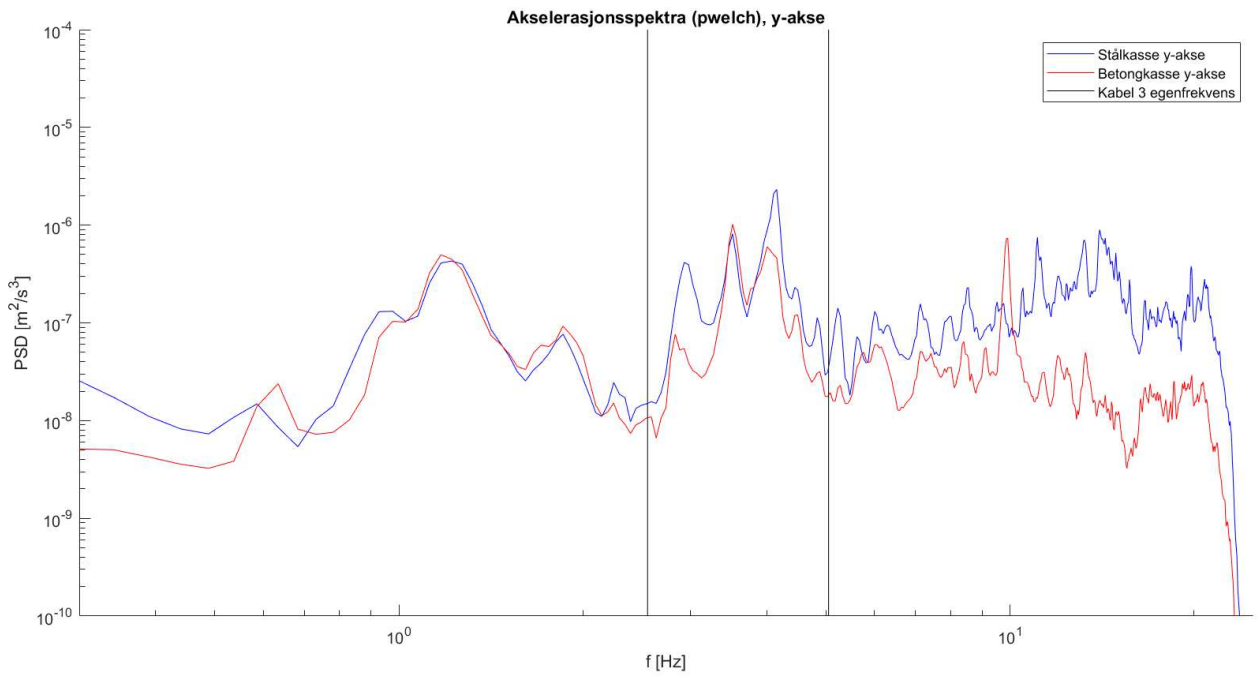


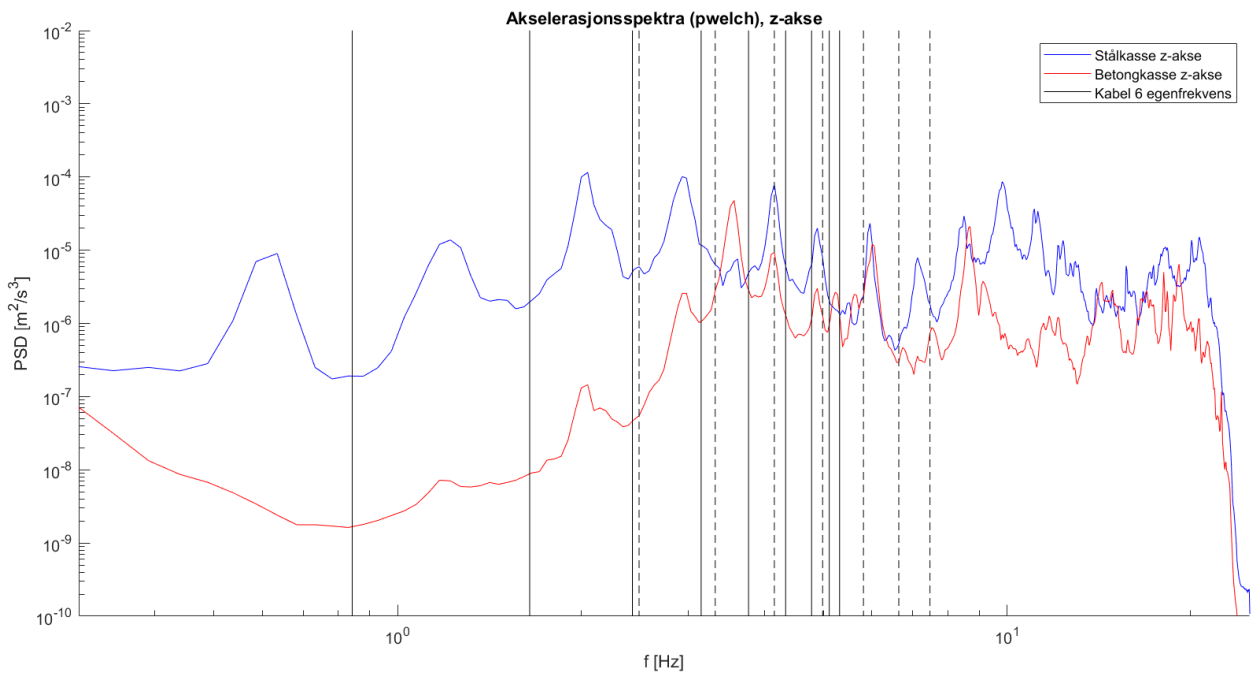
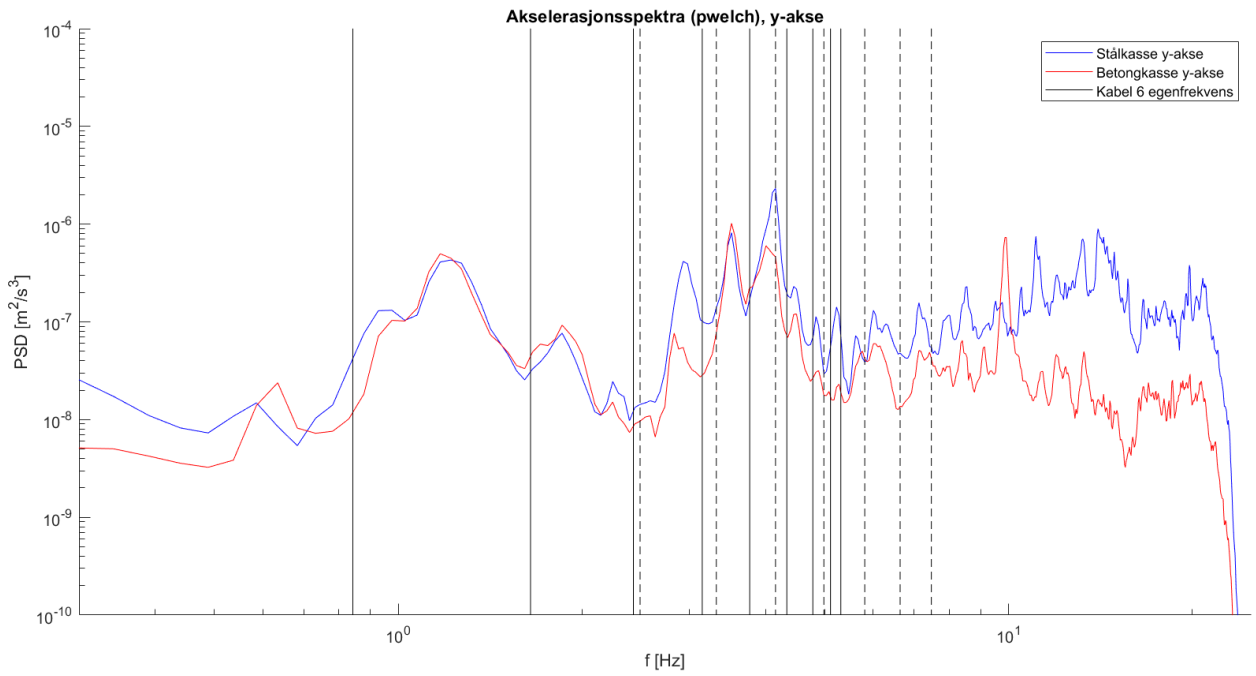
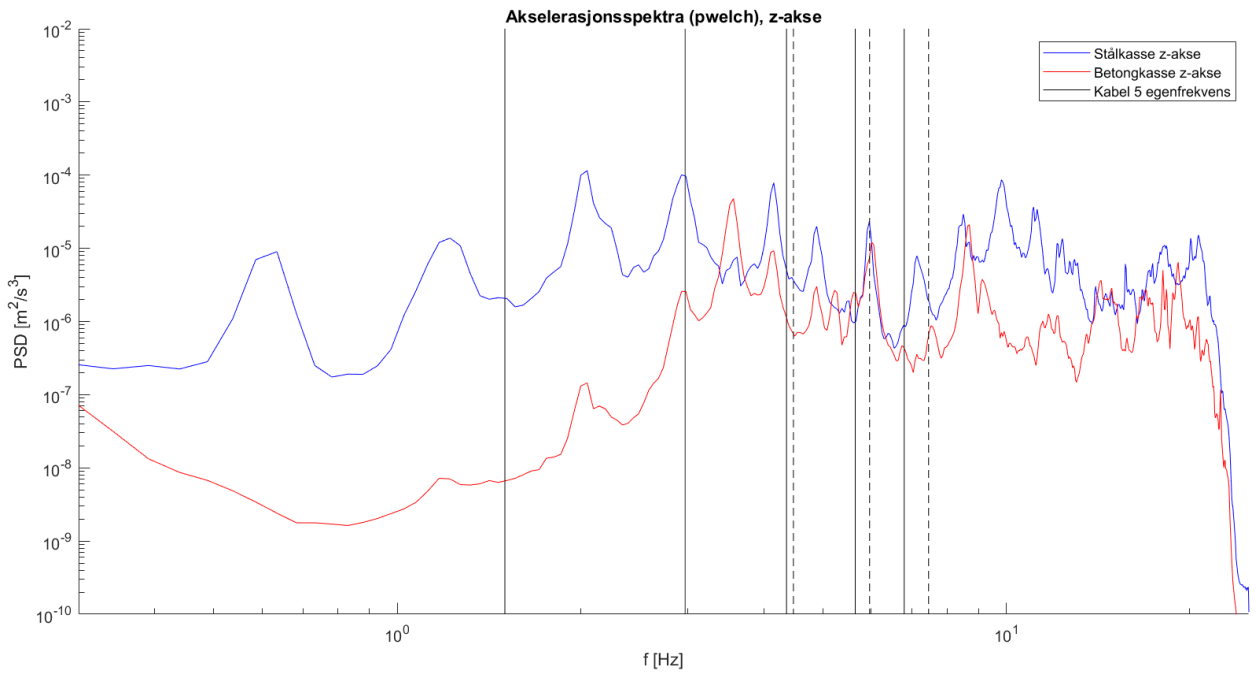


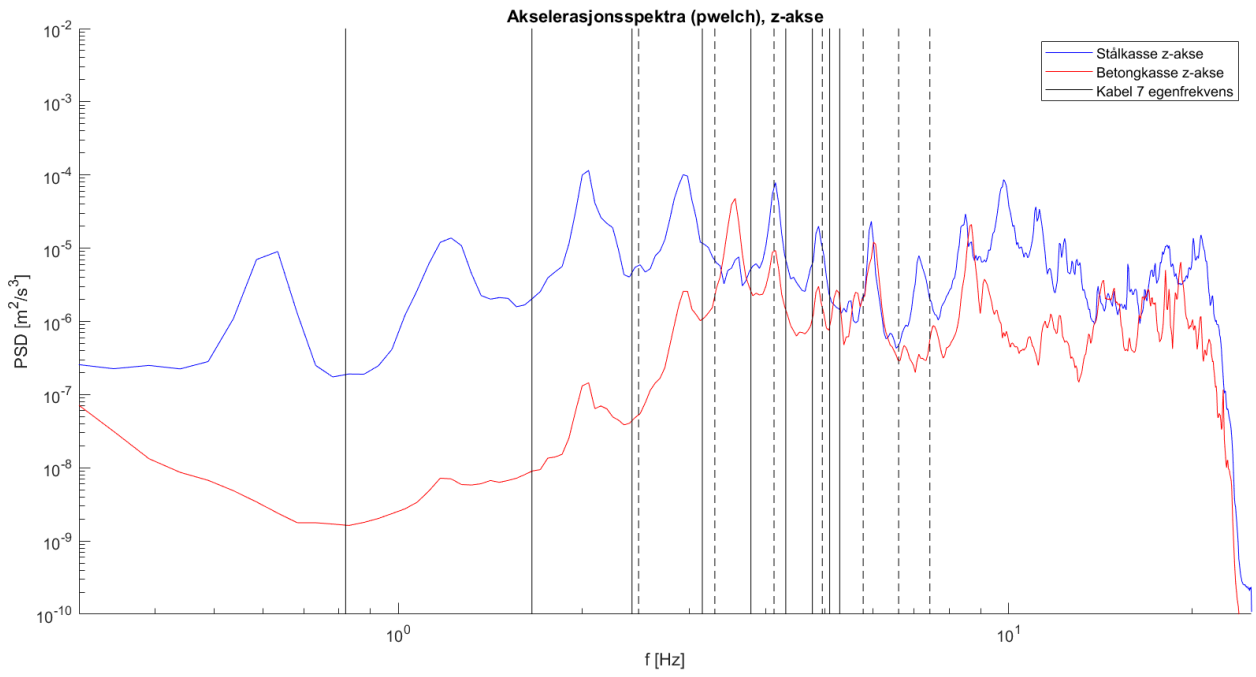
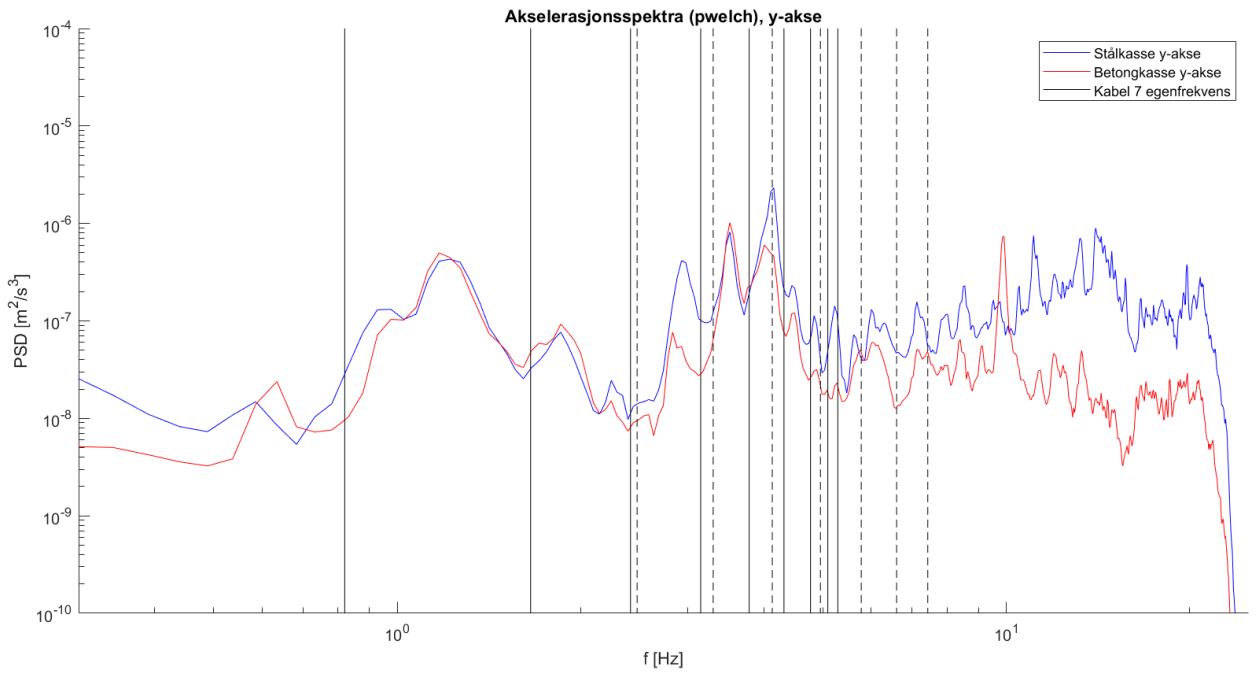
Resultat egenfrekvenser kabler



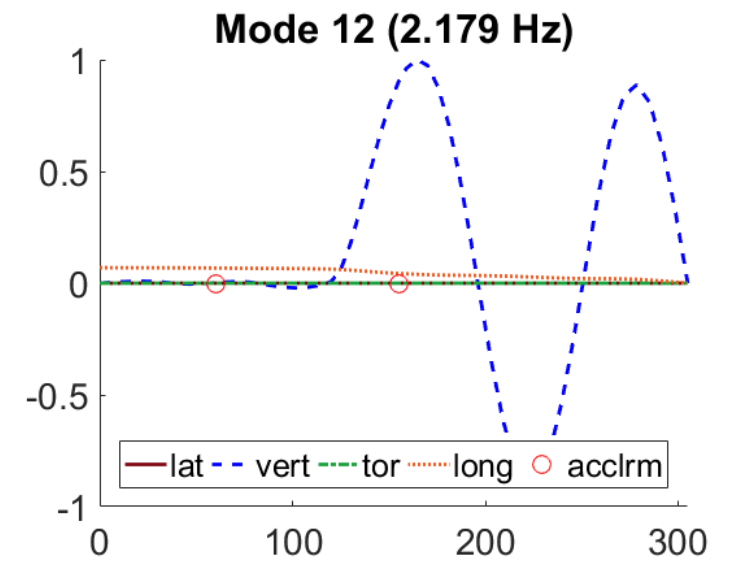
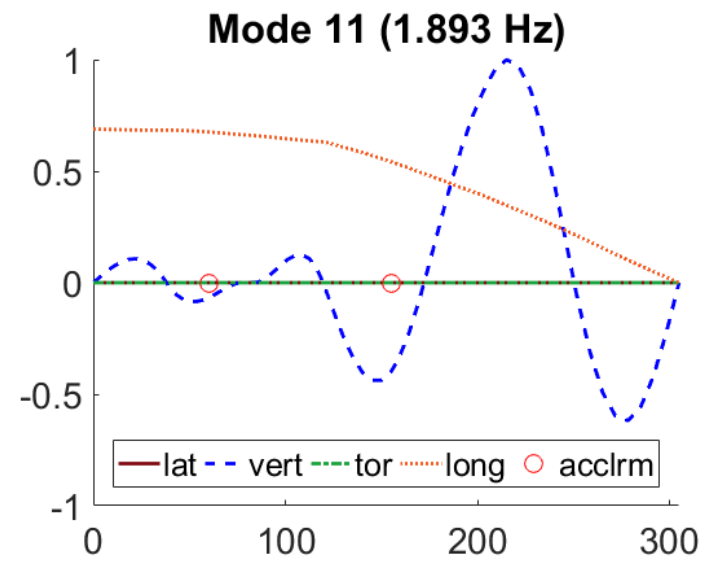
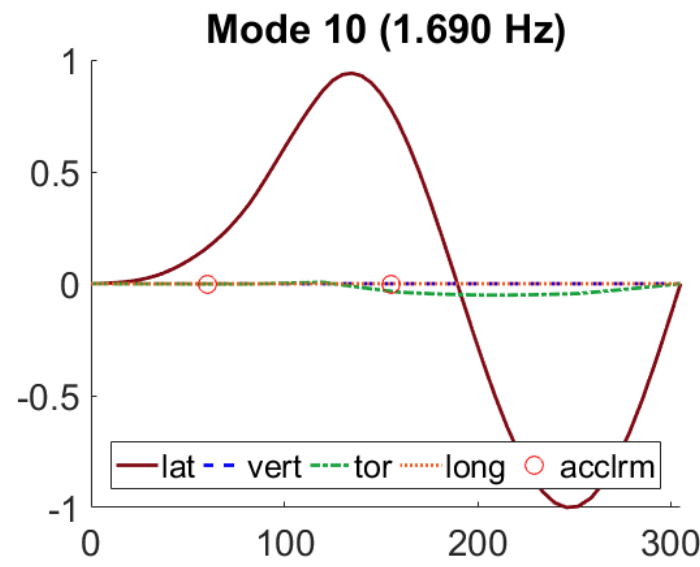
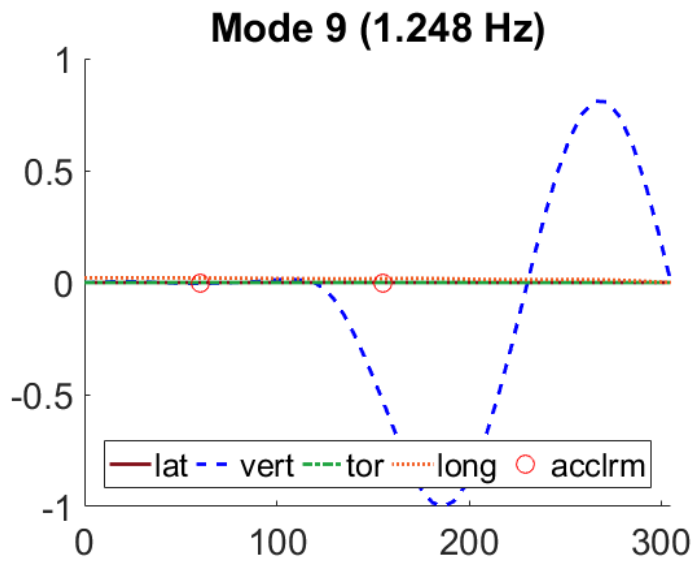
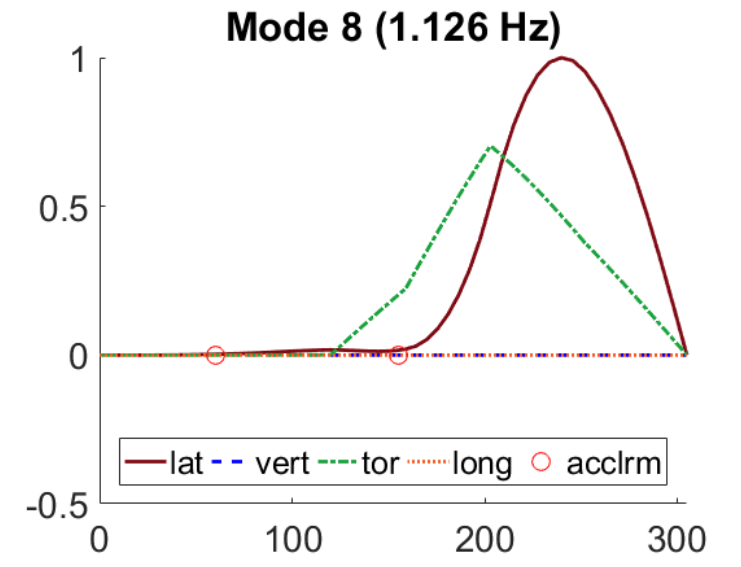
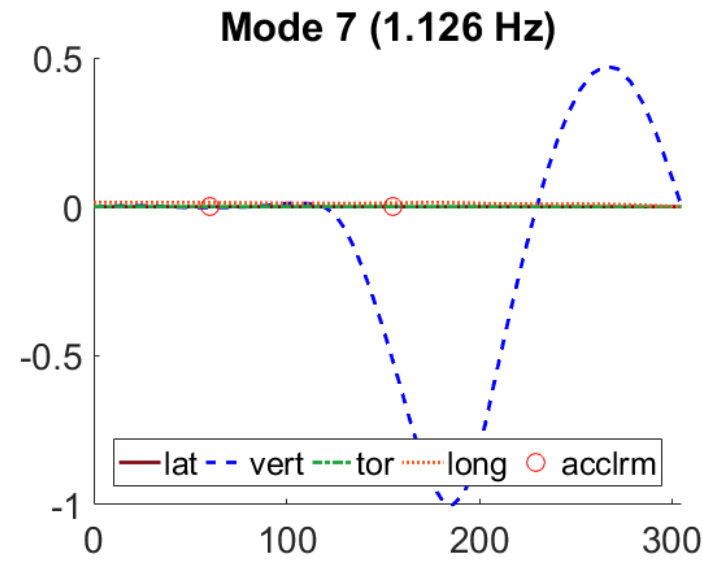
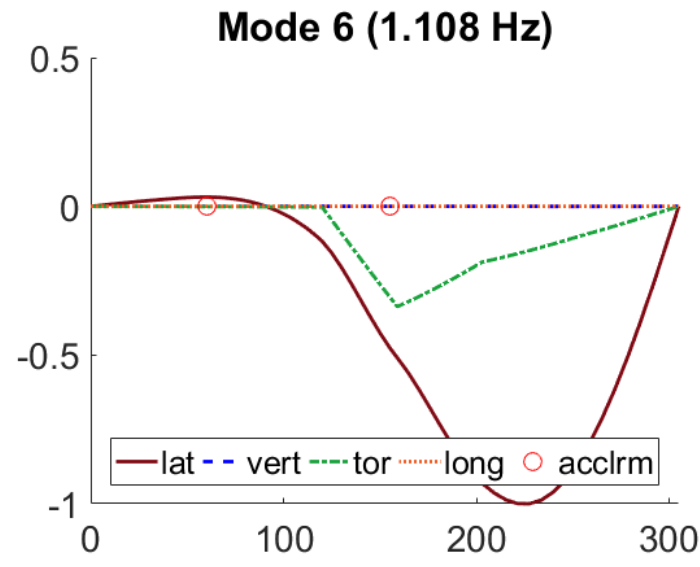
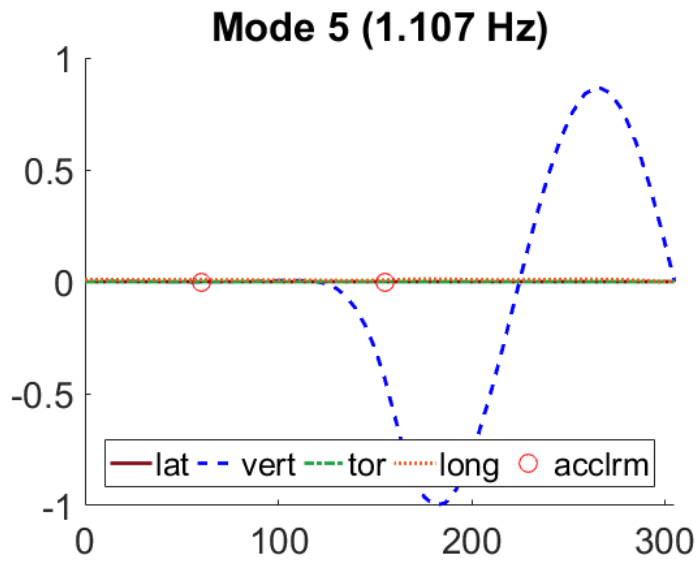
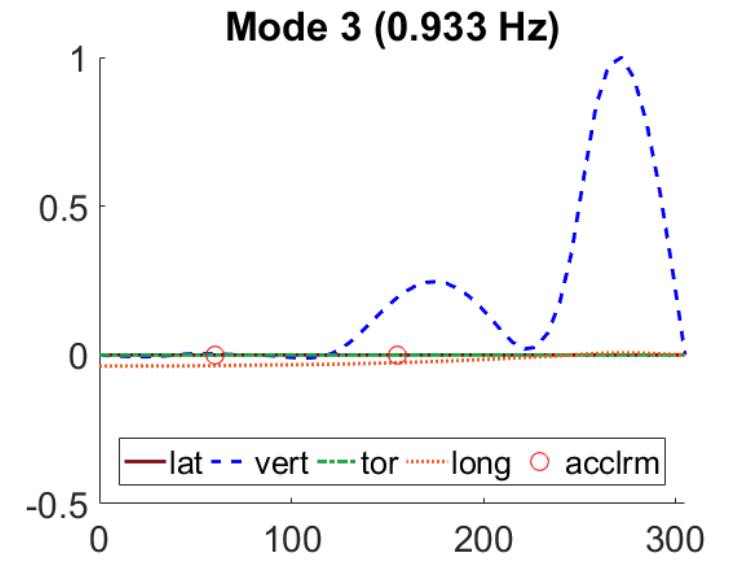
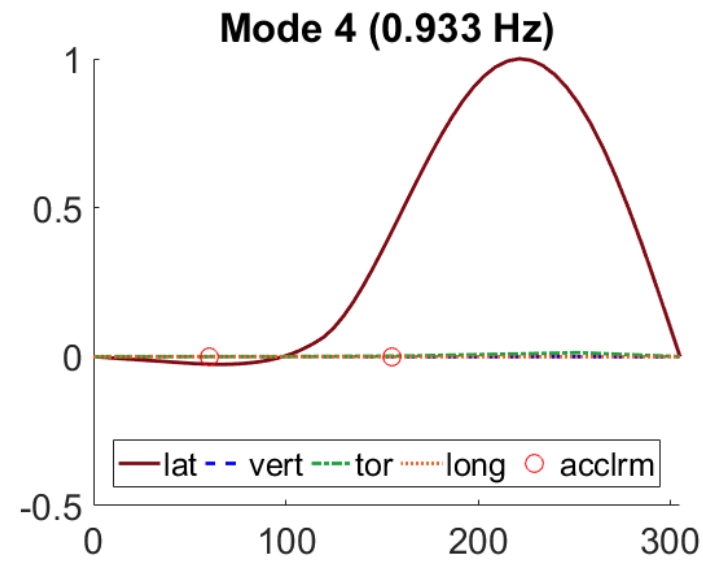
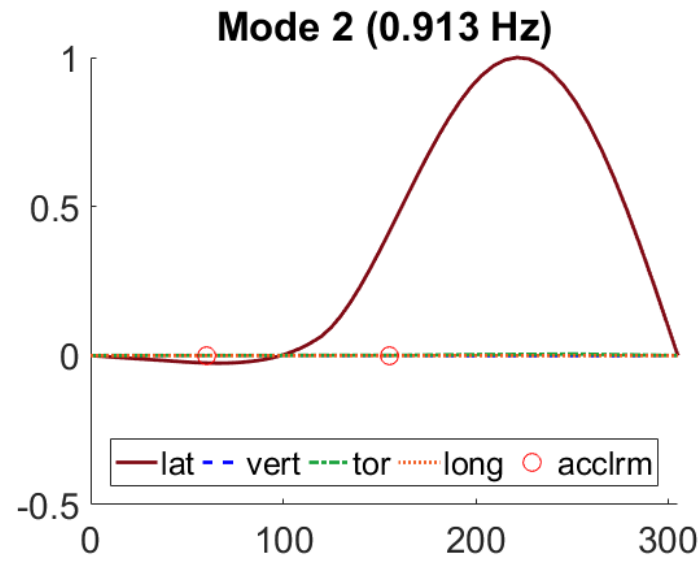
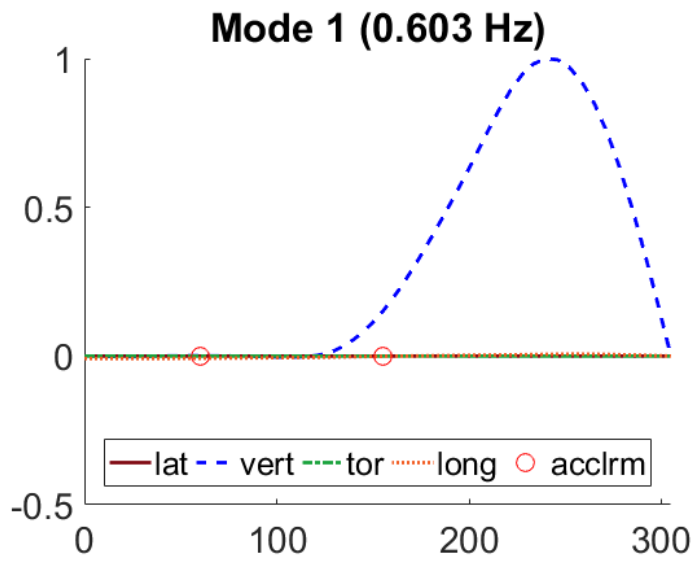


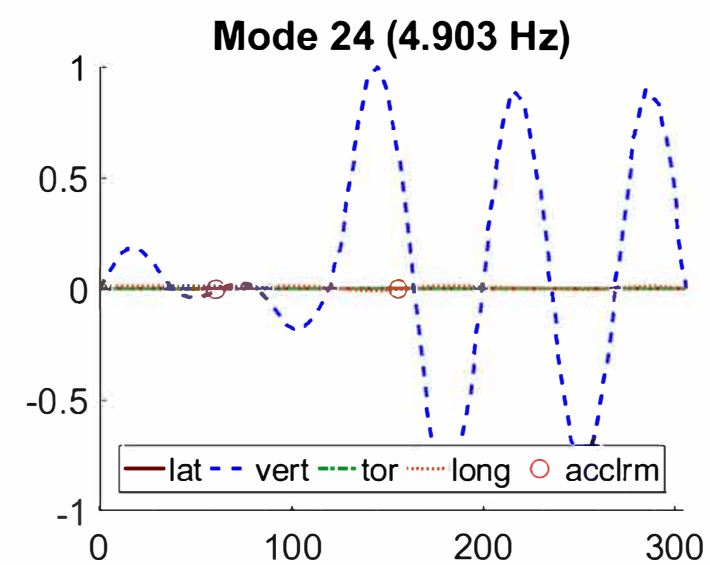
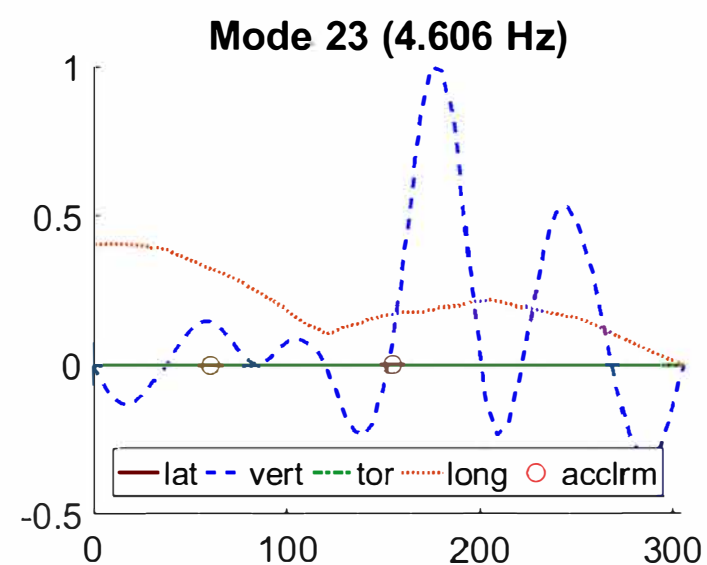
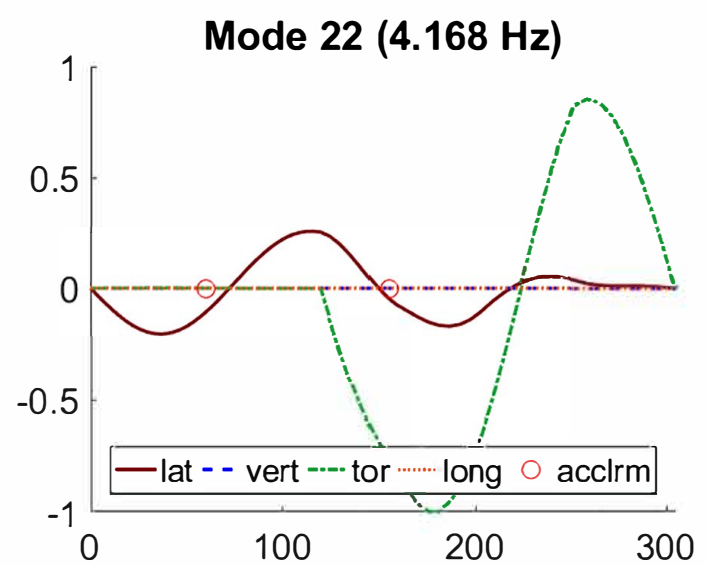
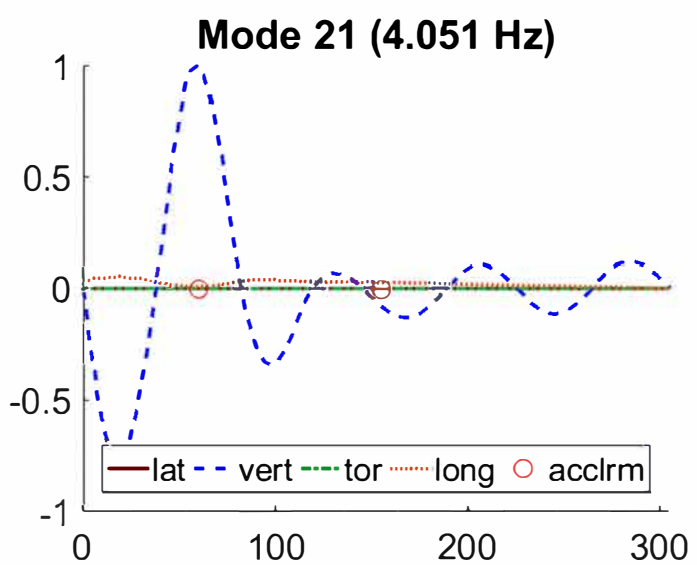
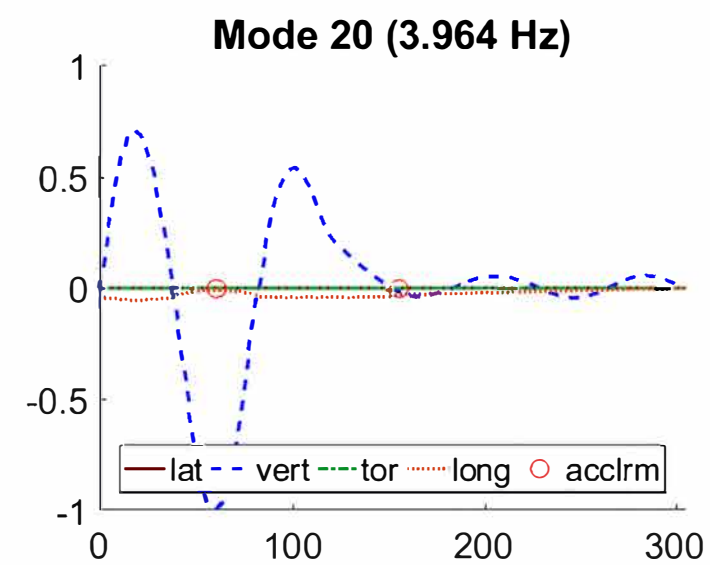
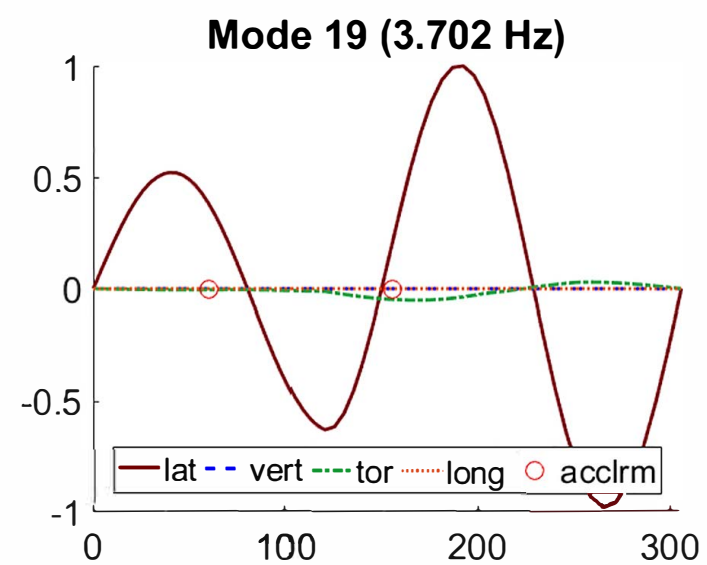
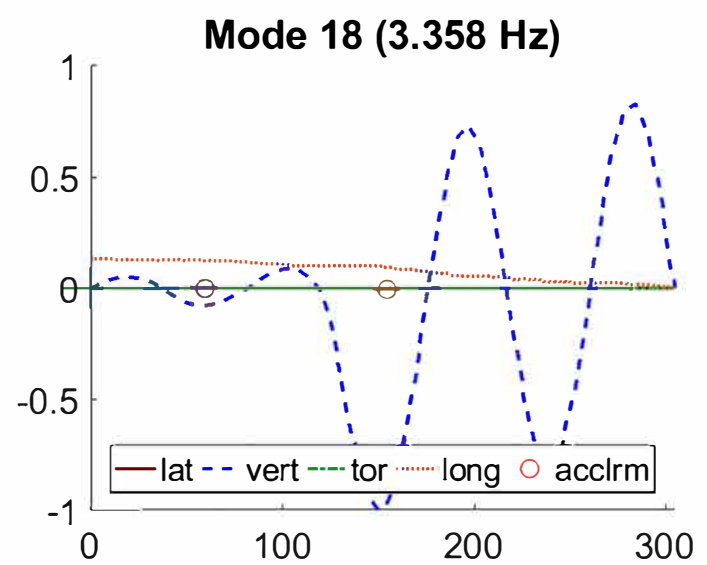
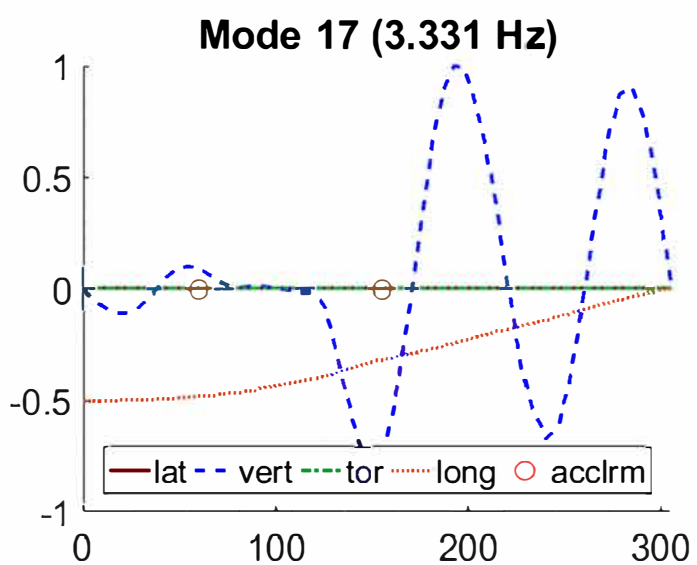
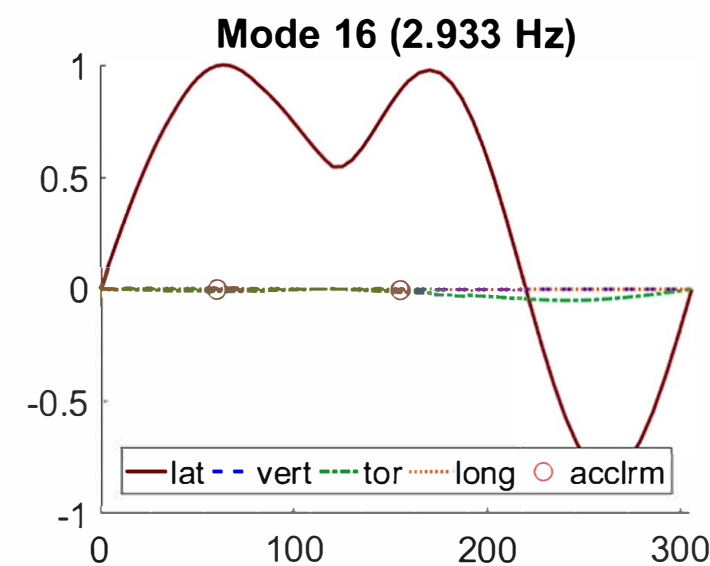
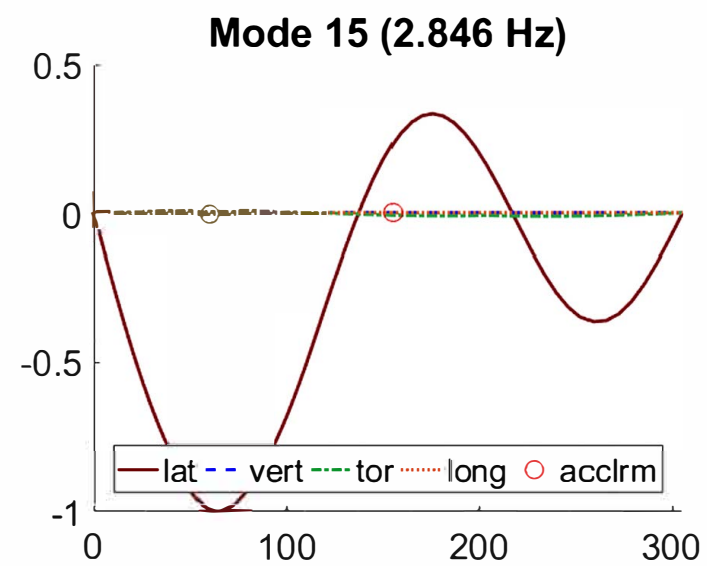
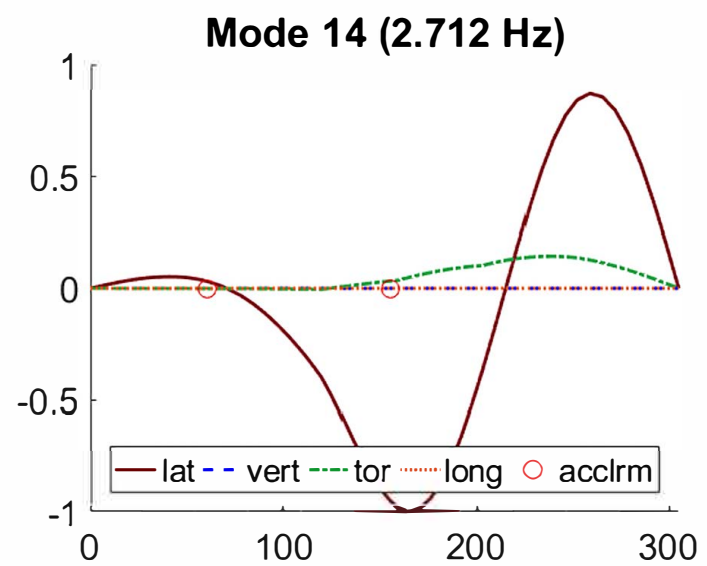
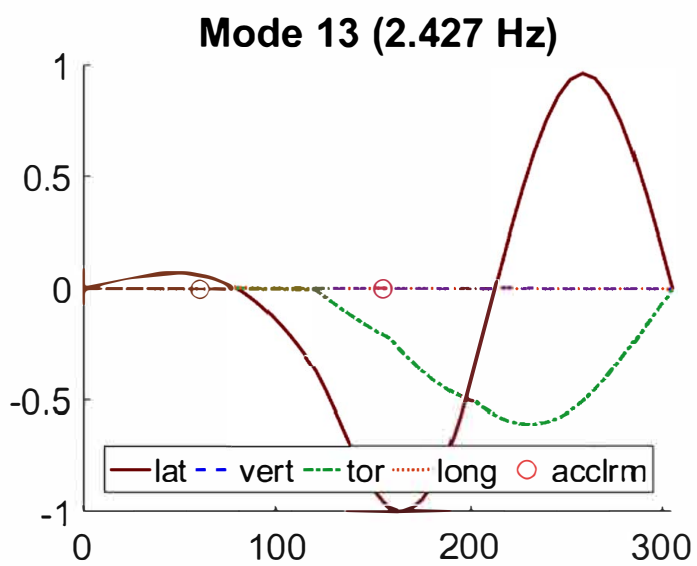


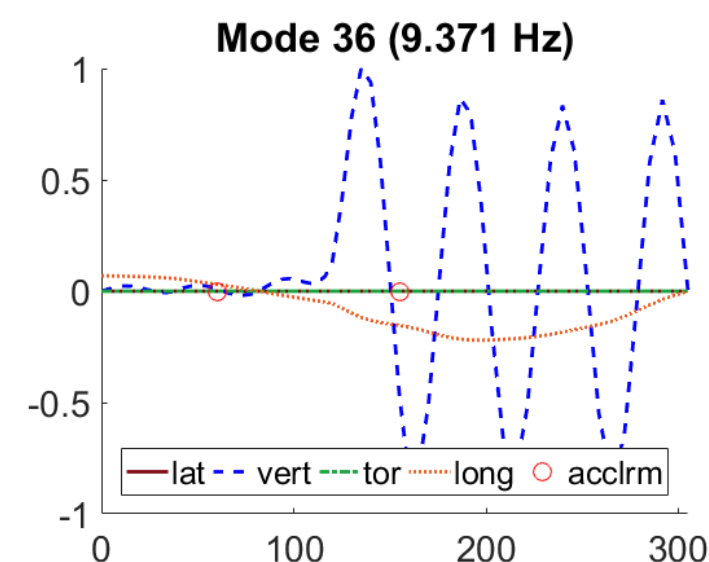
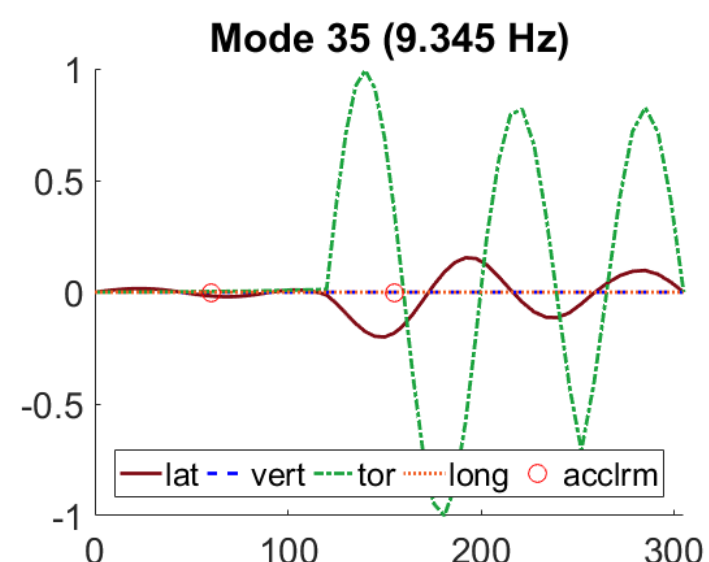
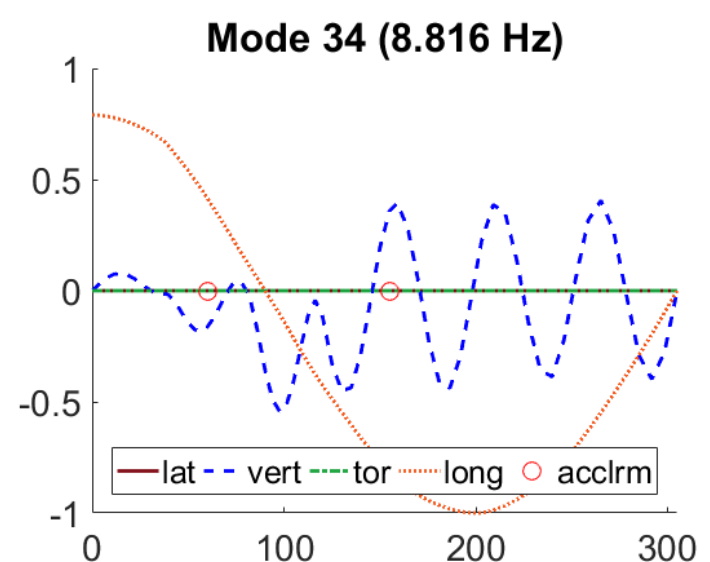
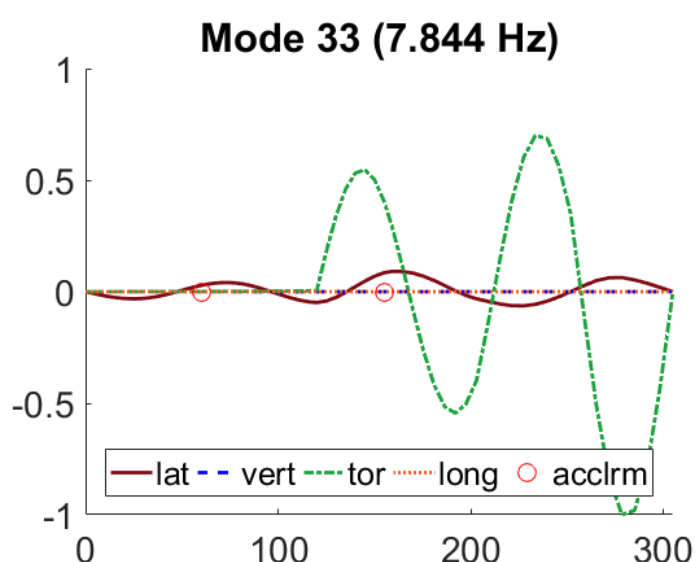
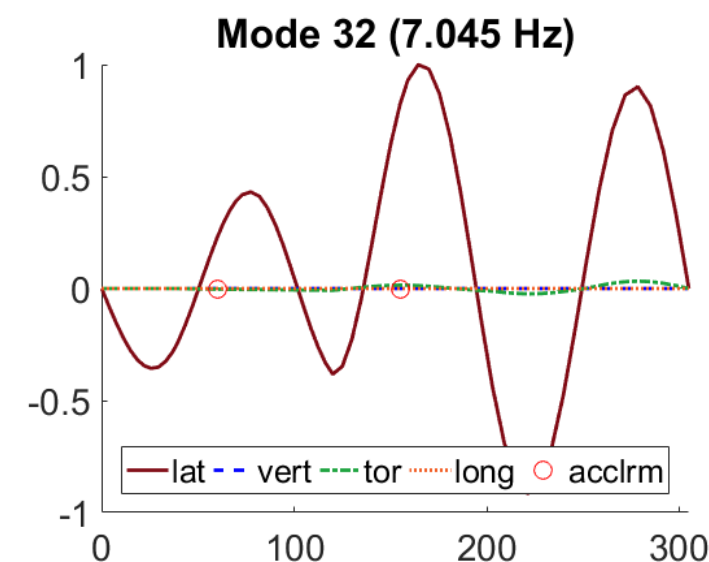
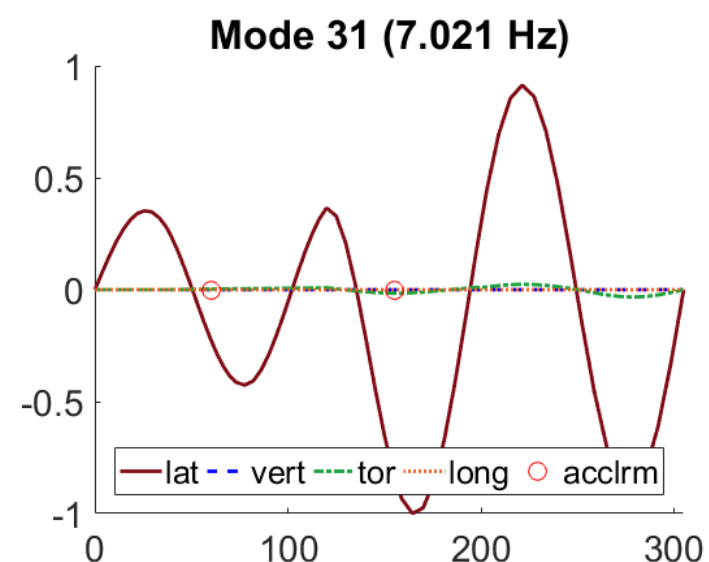
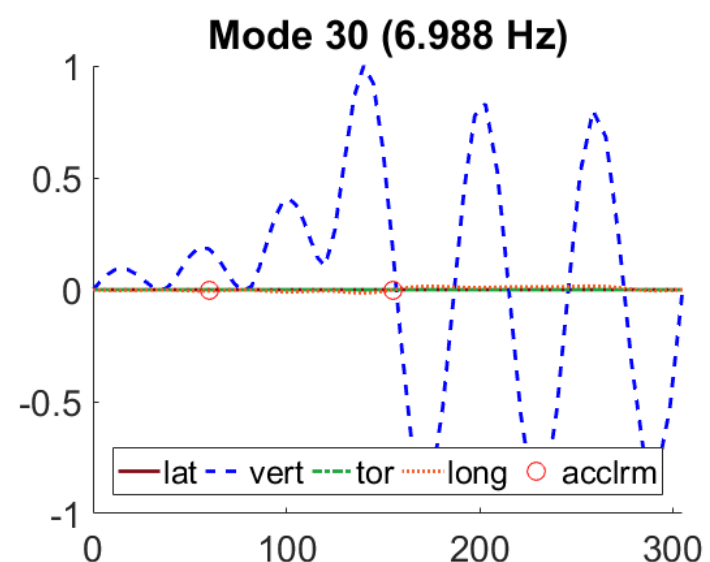
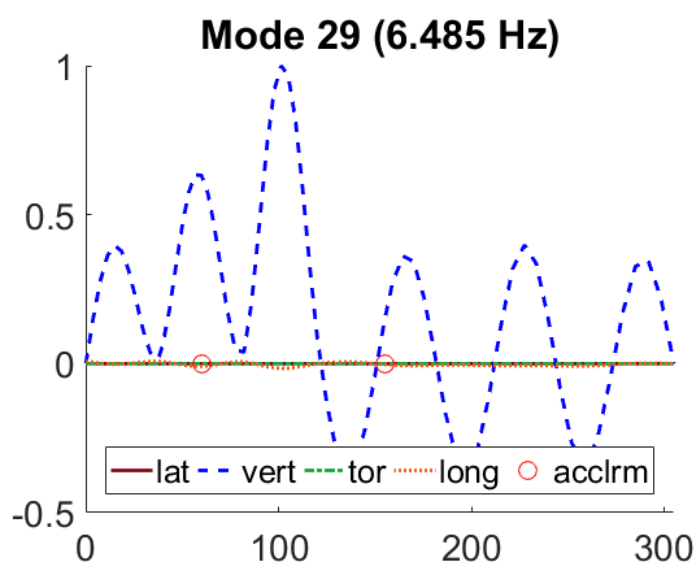
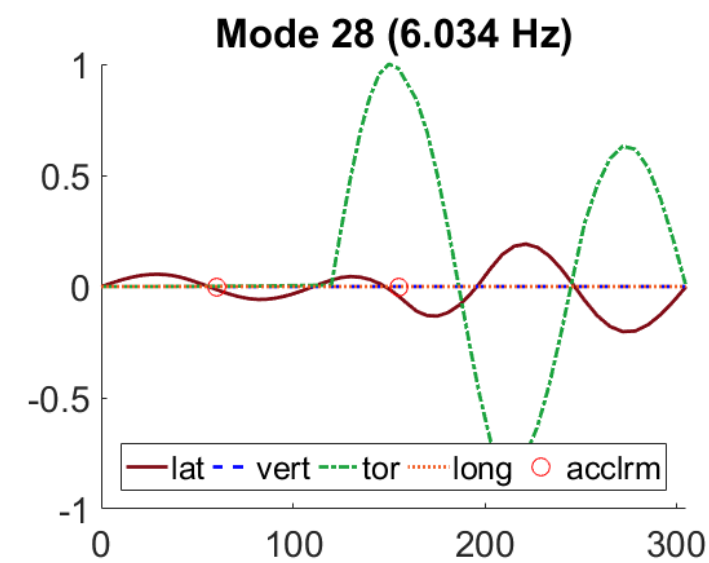
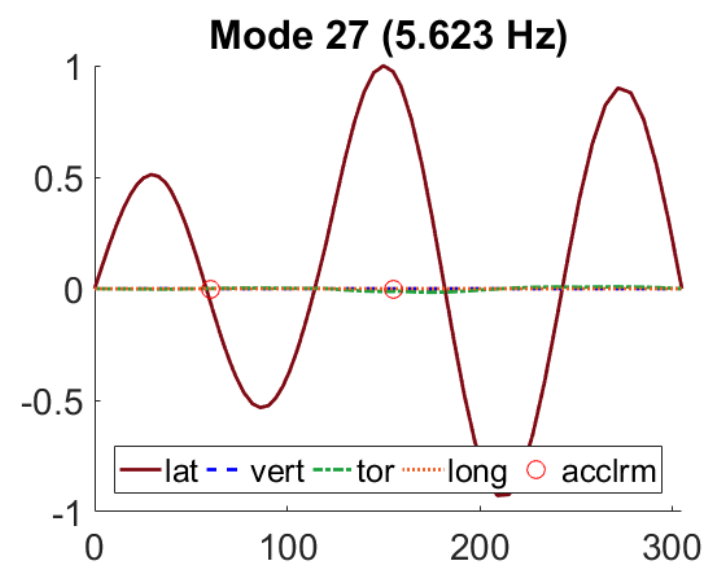
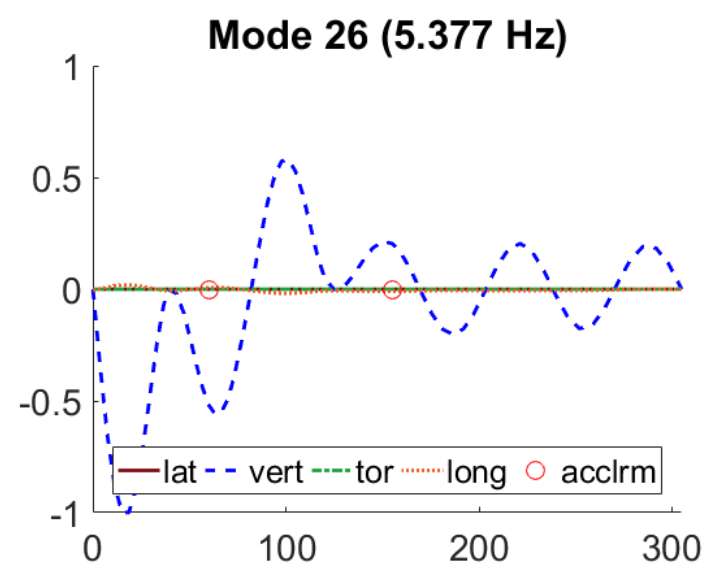
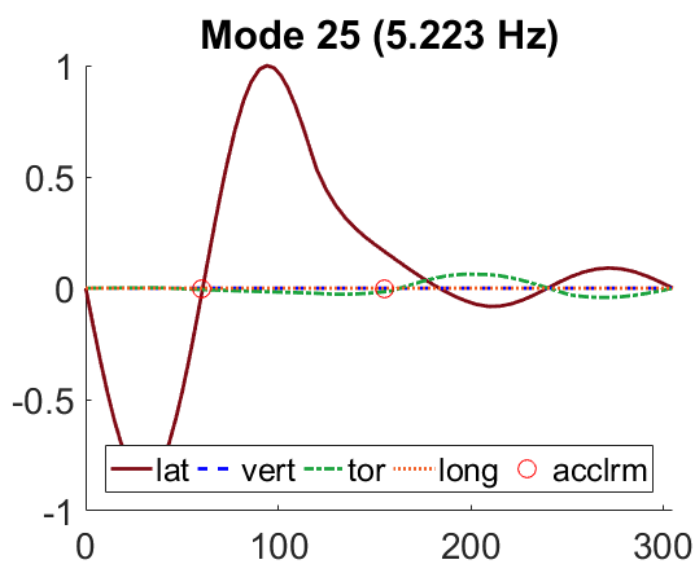


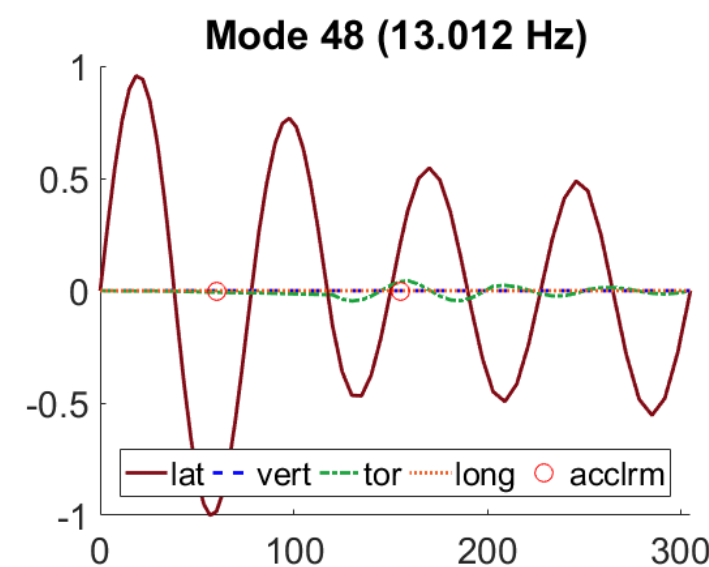
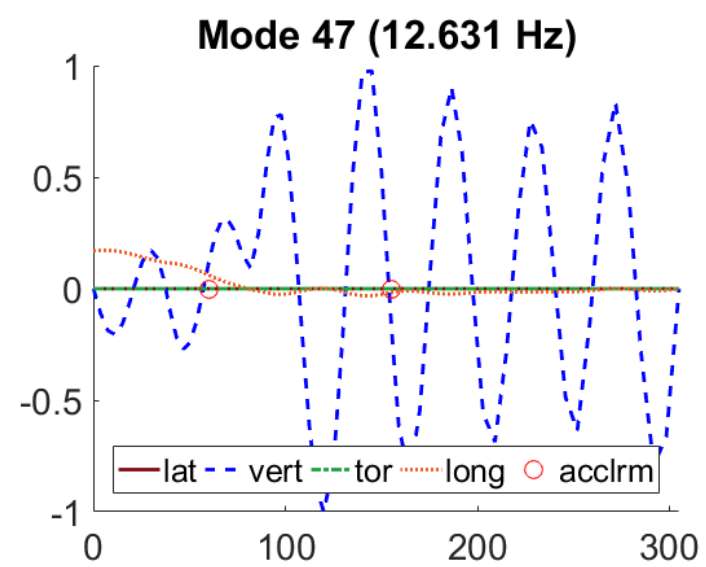
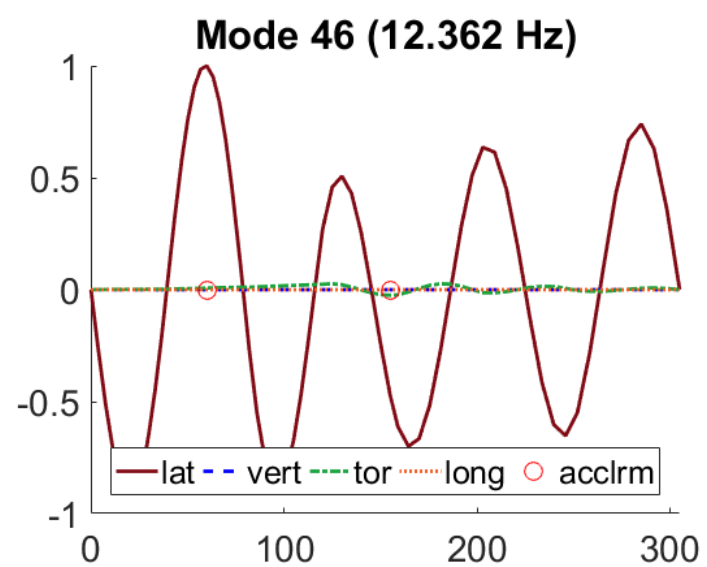
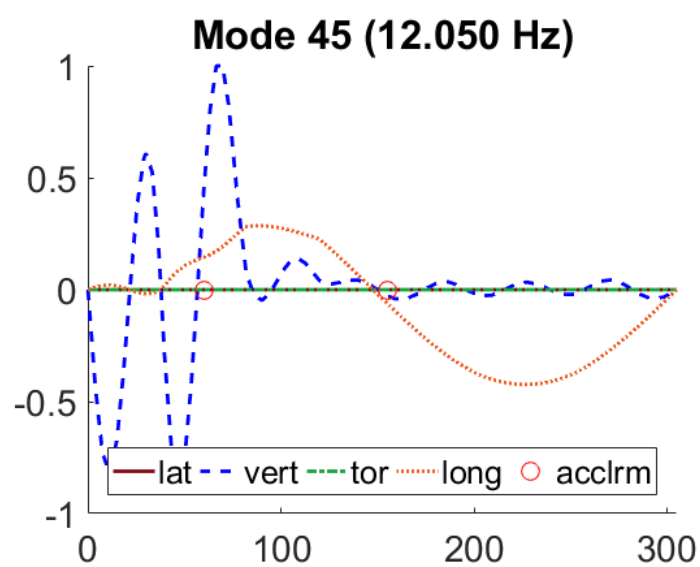
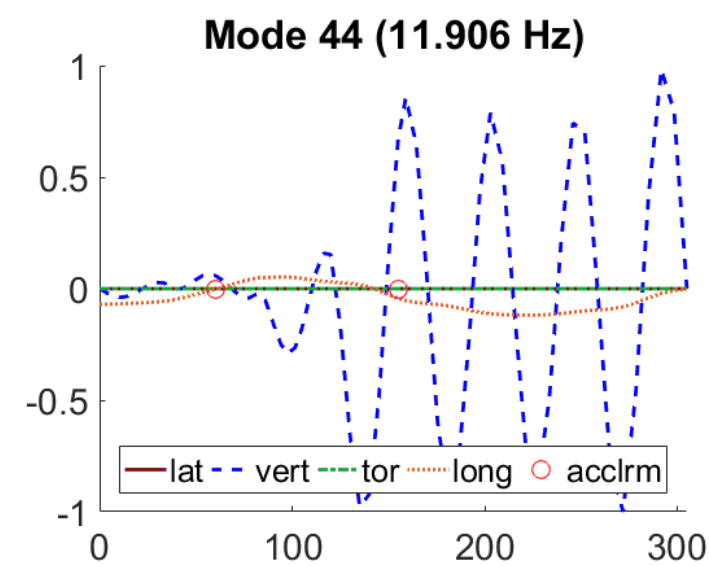
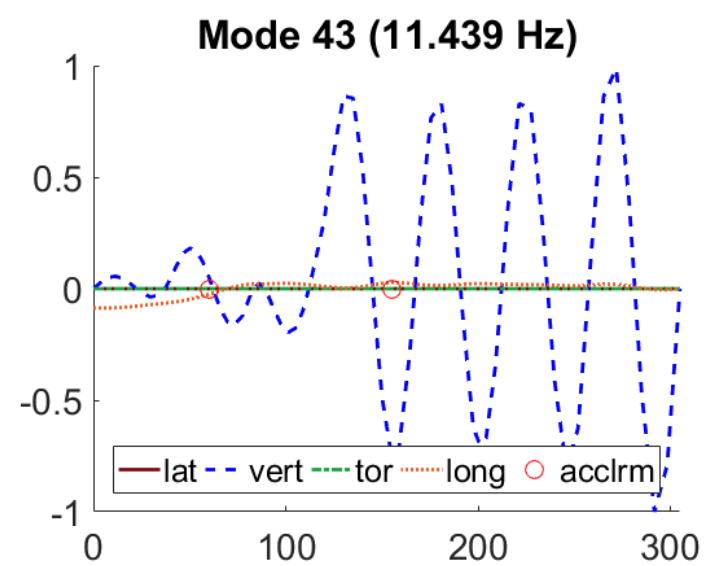
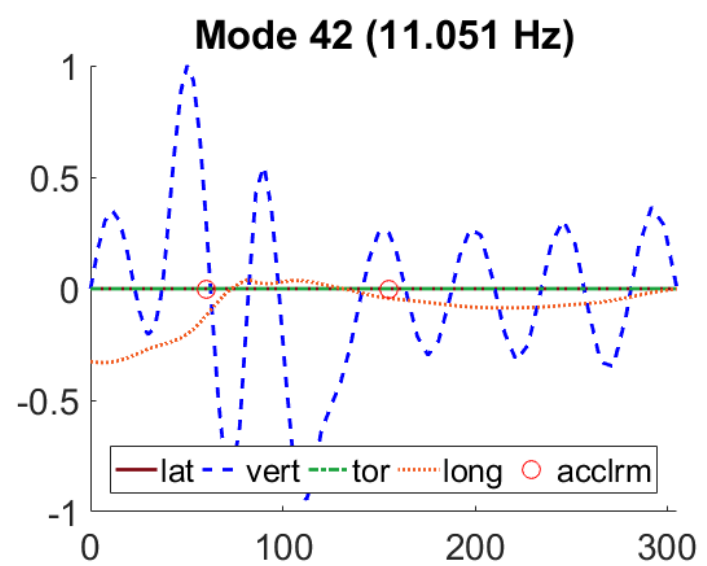
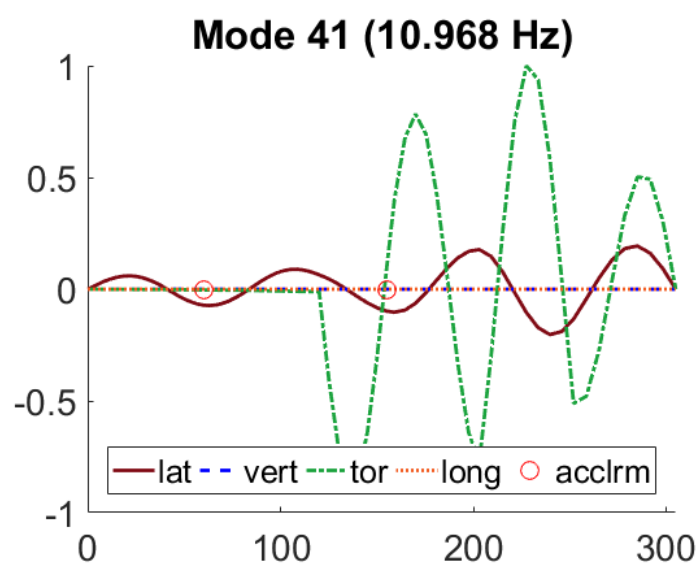
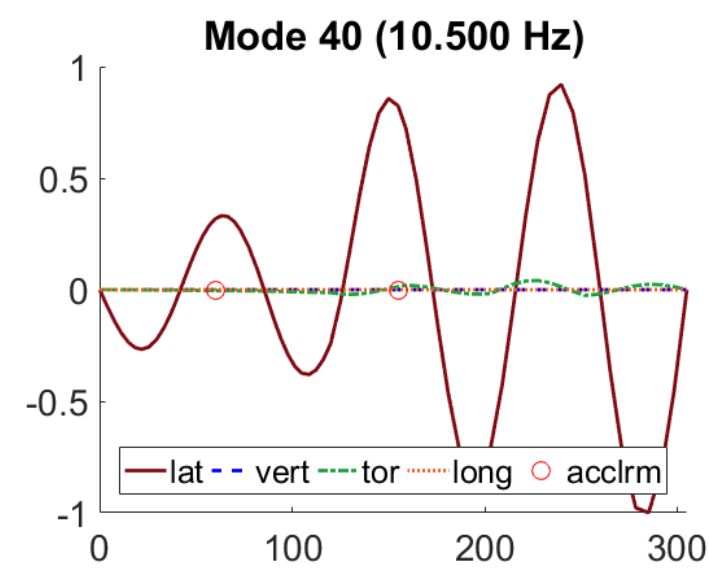
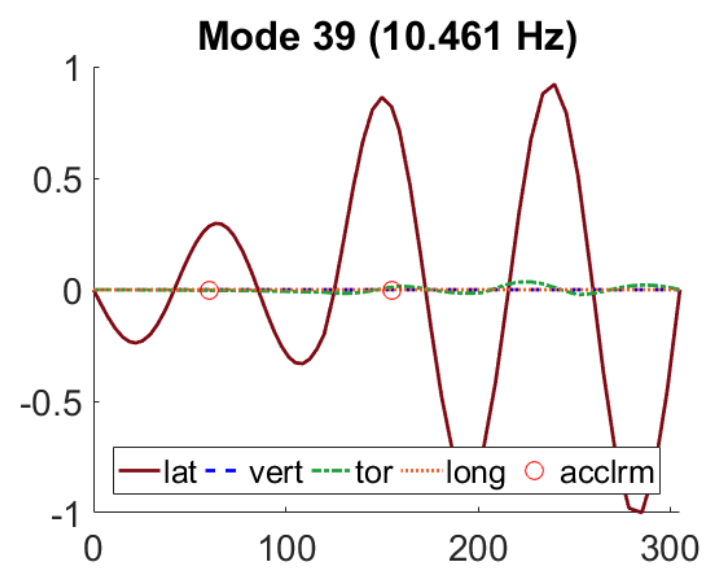
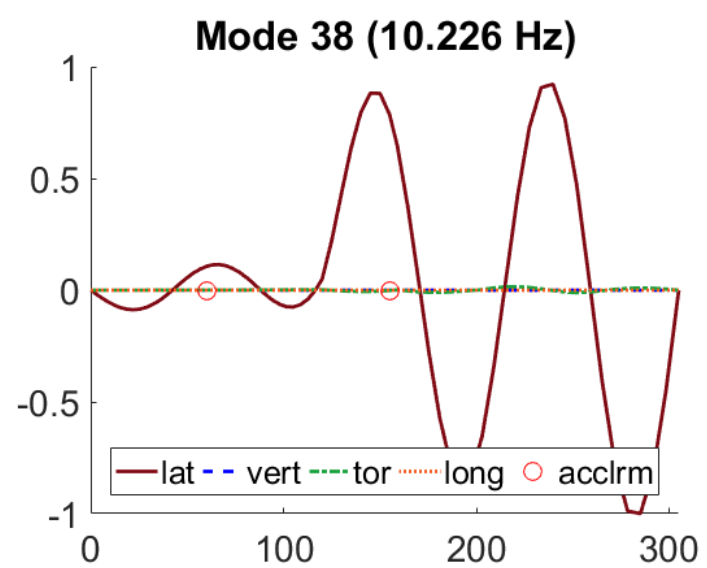
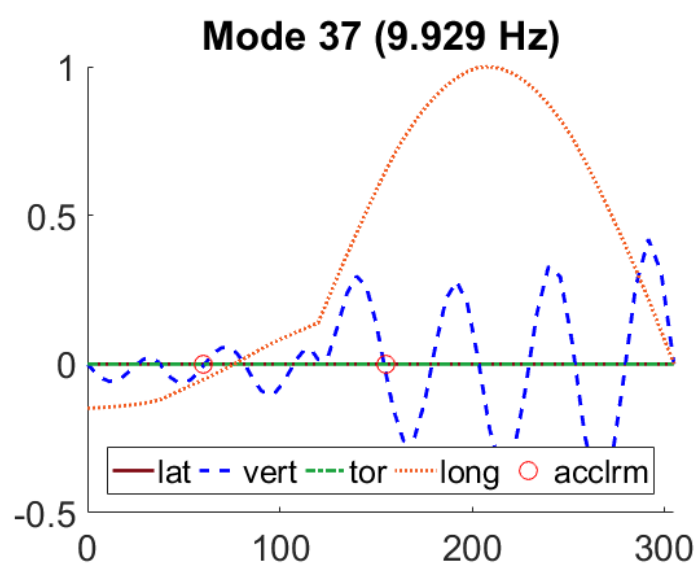


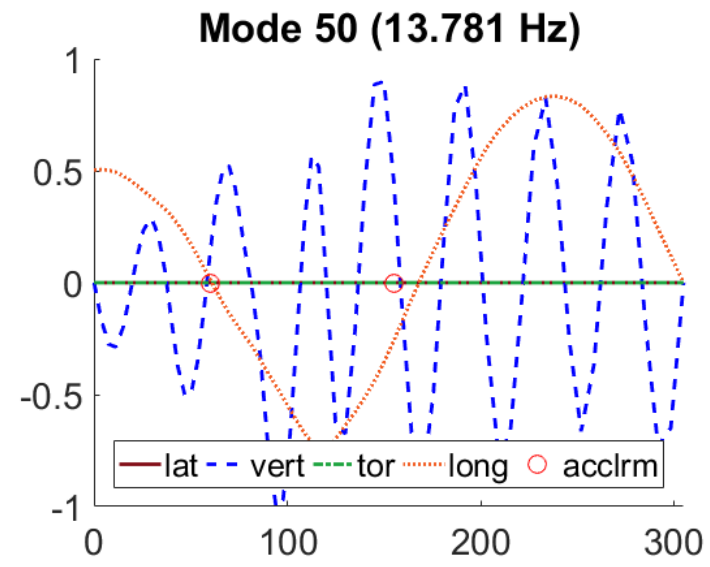
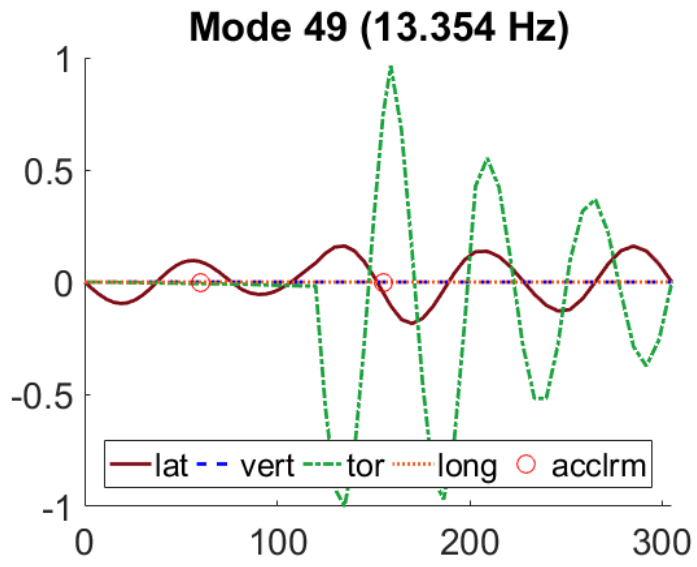
Abaqus modeplotter - brodekket, situasjon 1 (kapittel 5.3)



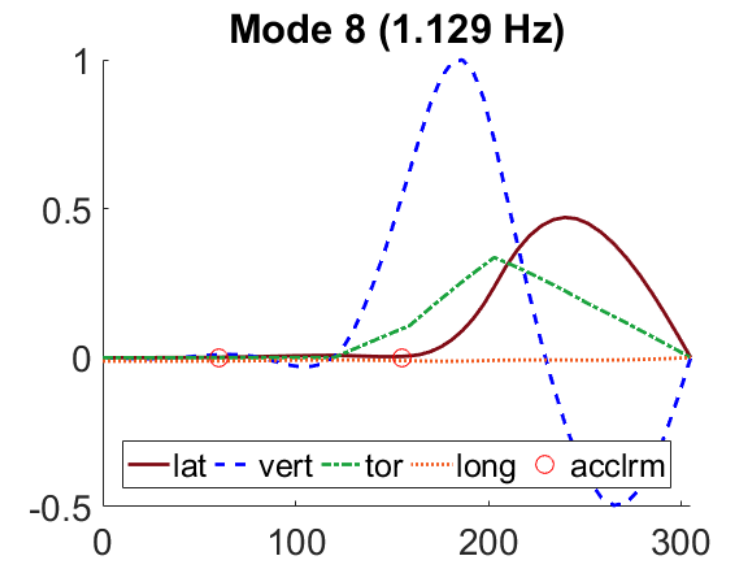
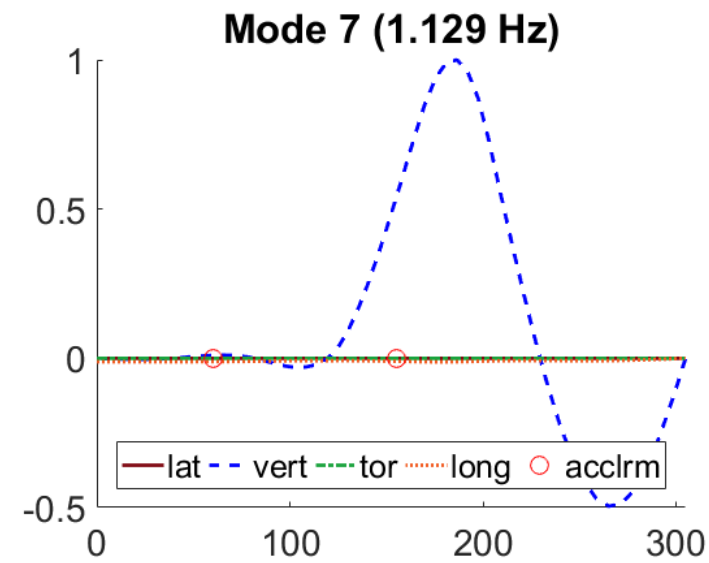
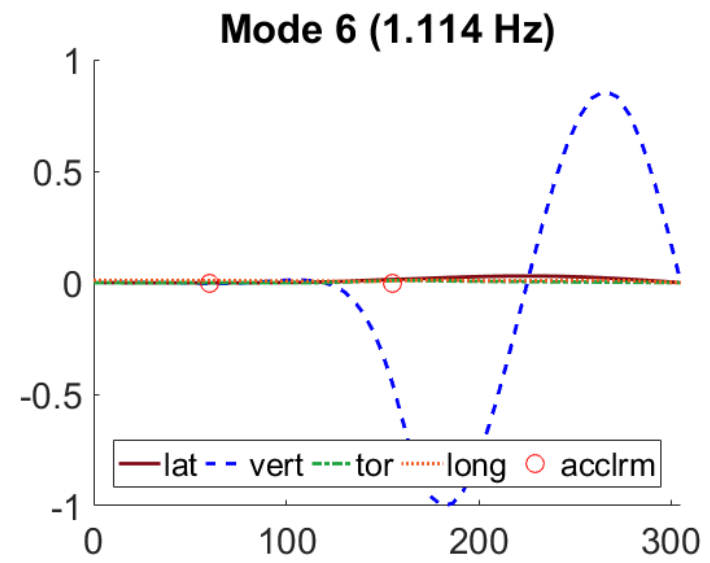
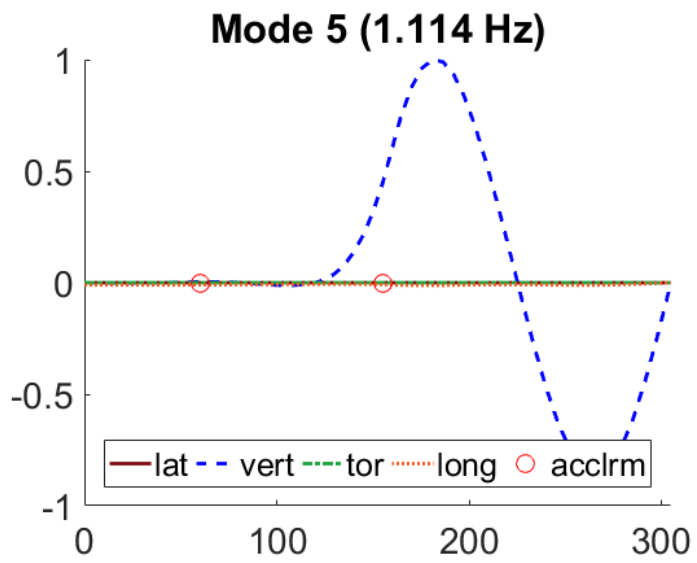
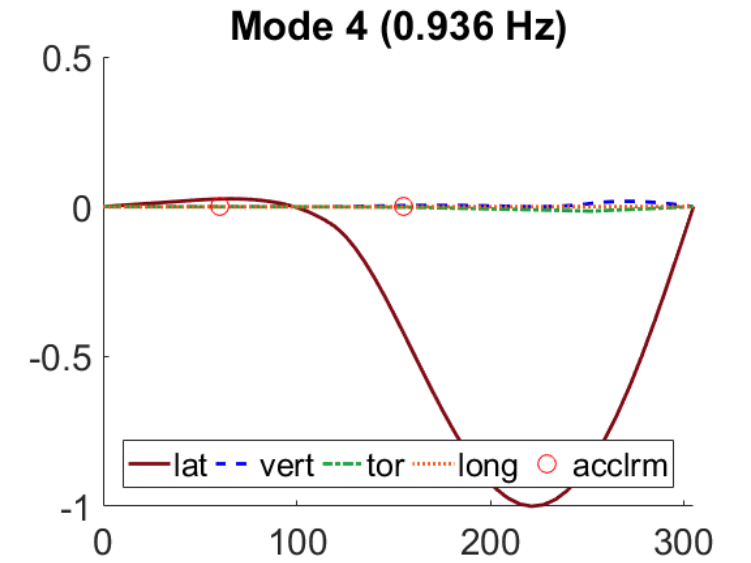
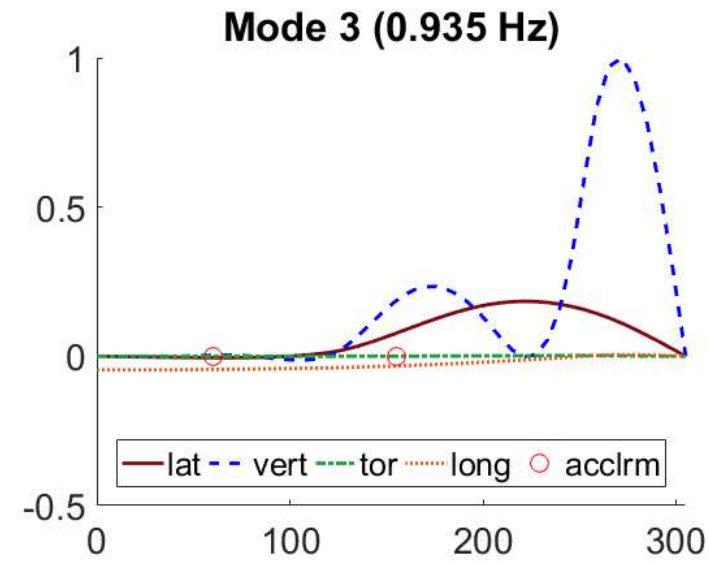
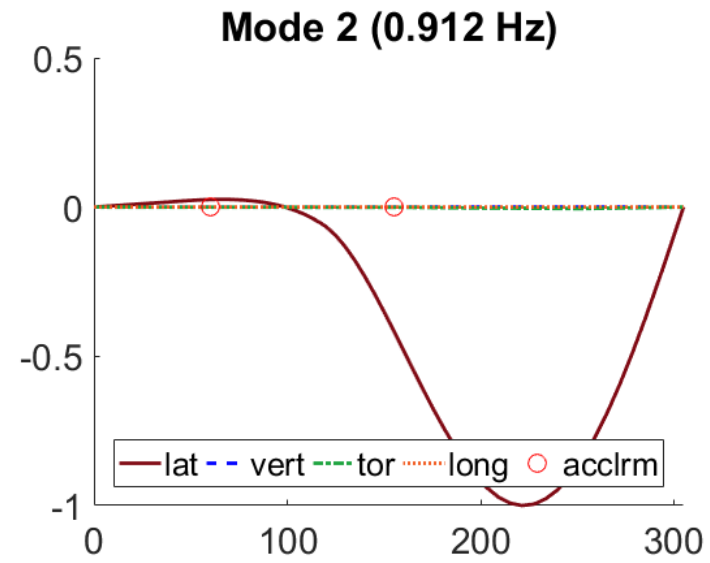
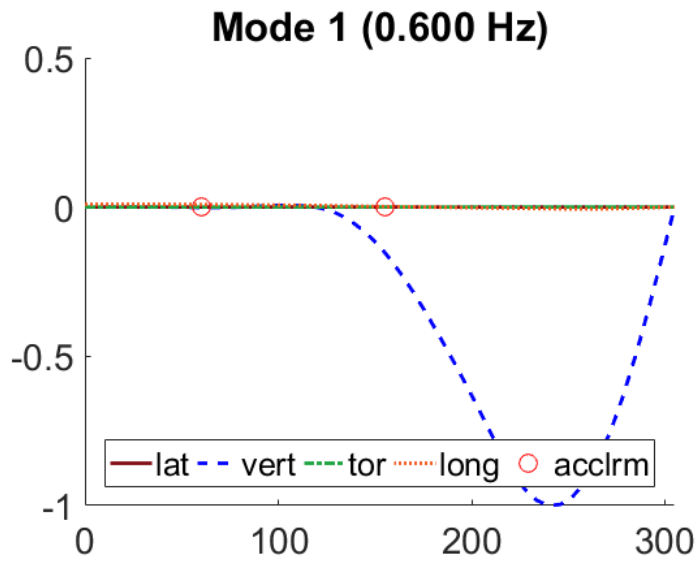


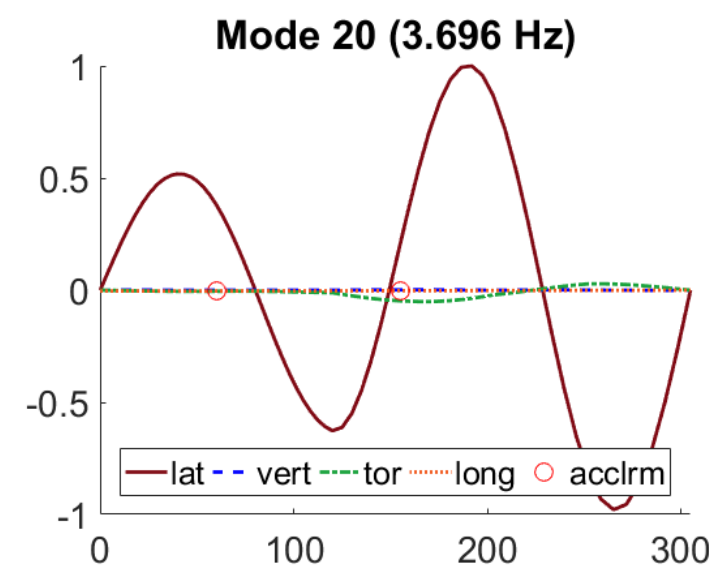
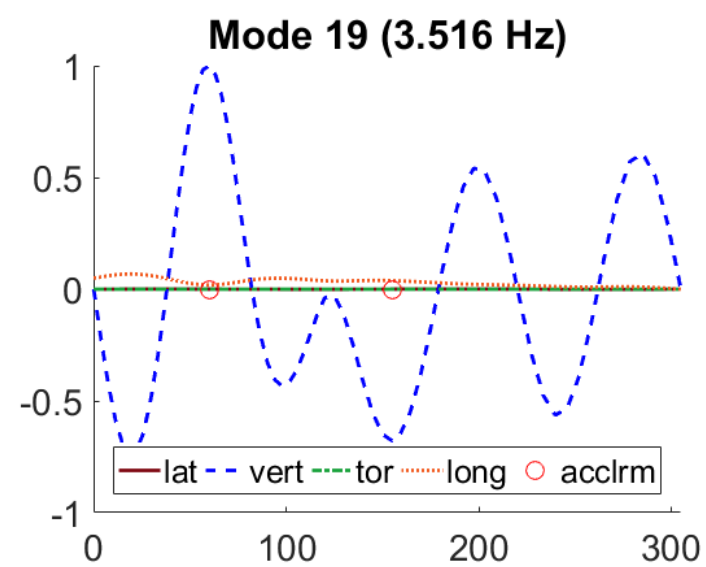
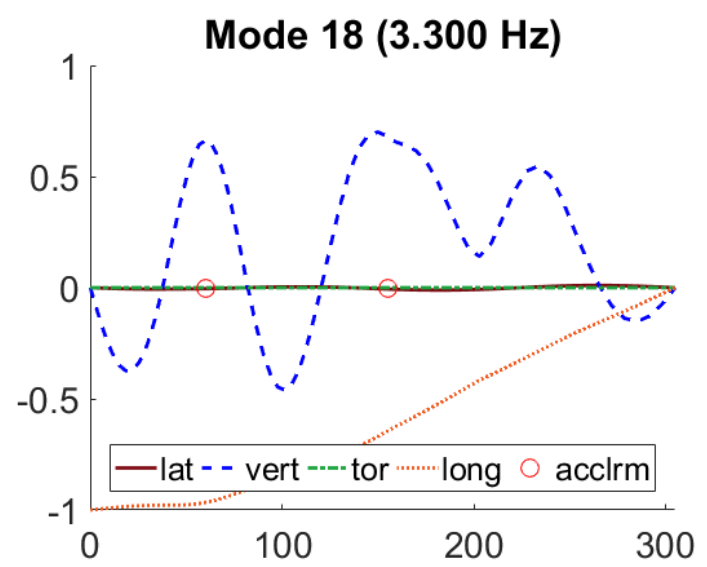
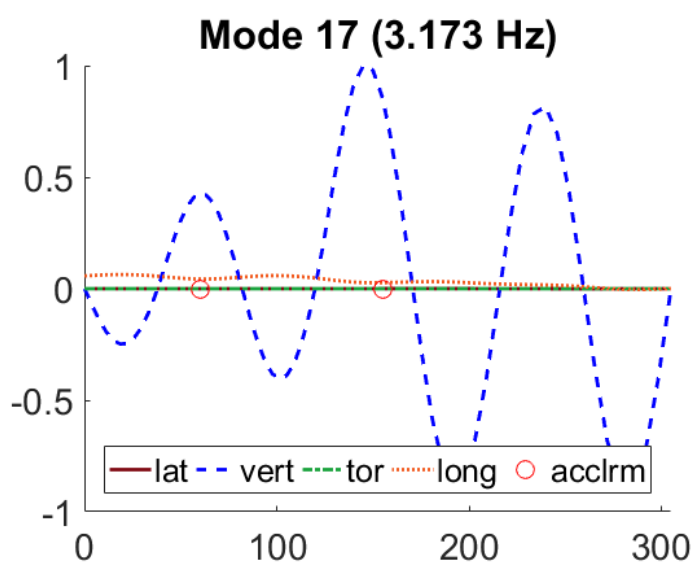
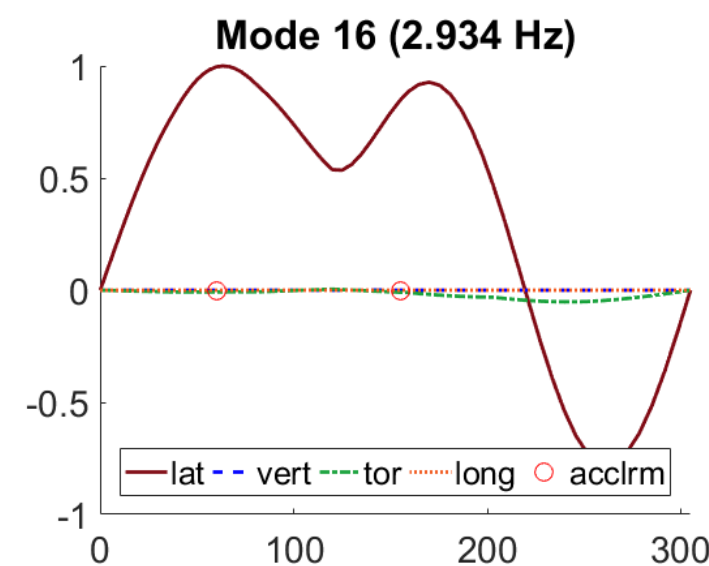
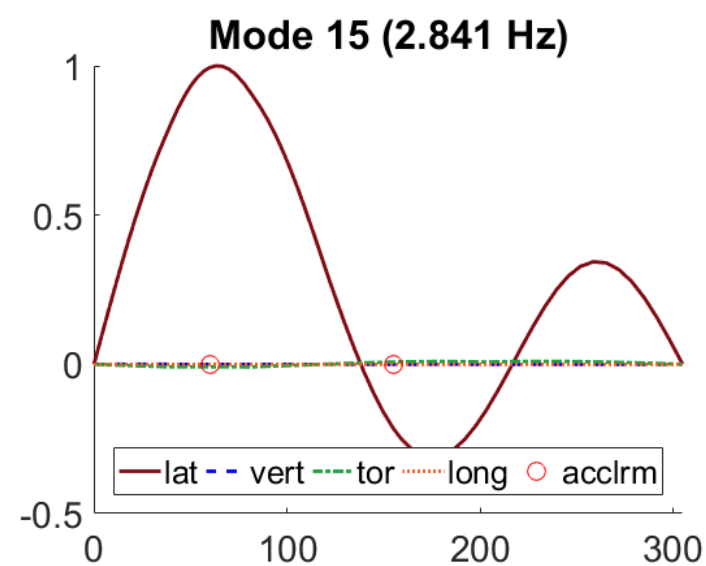
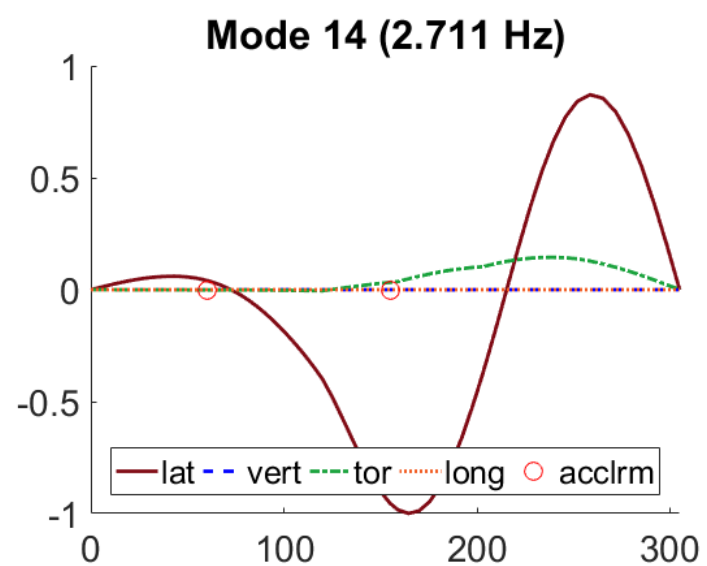
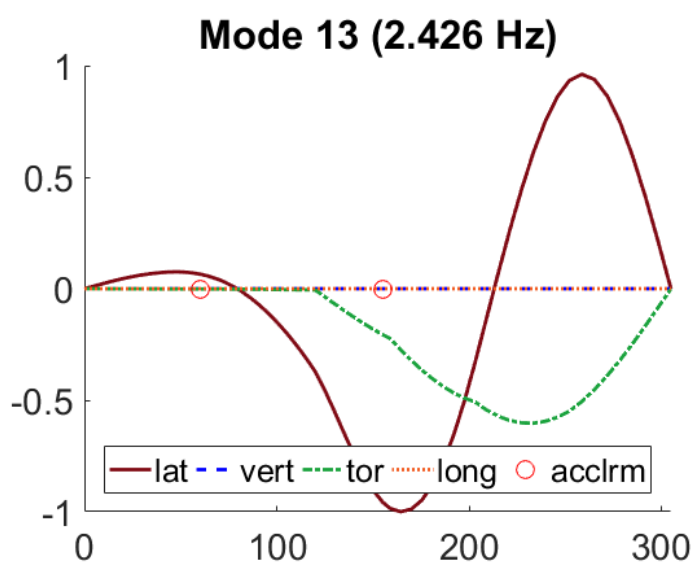
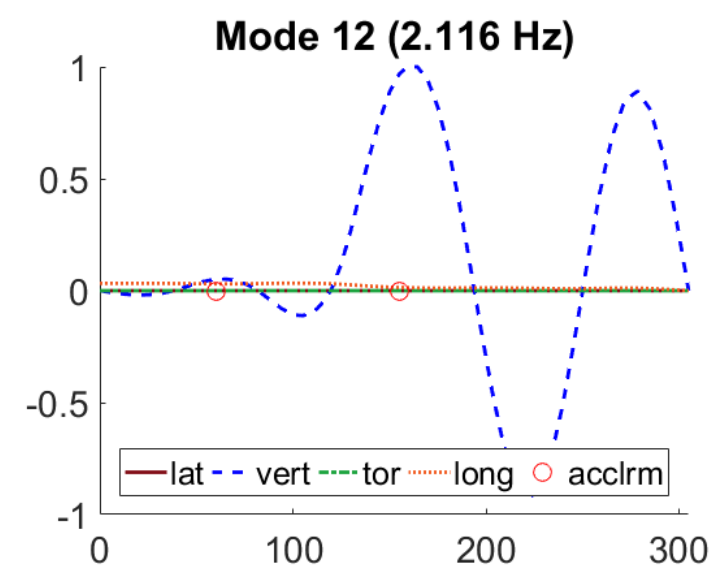
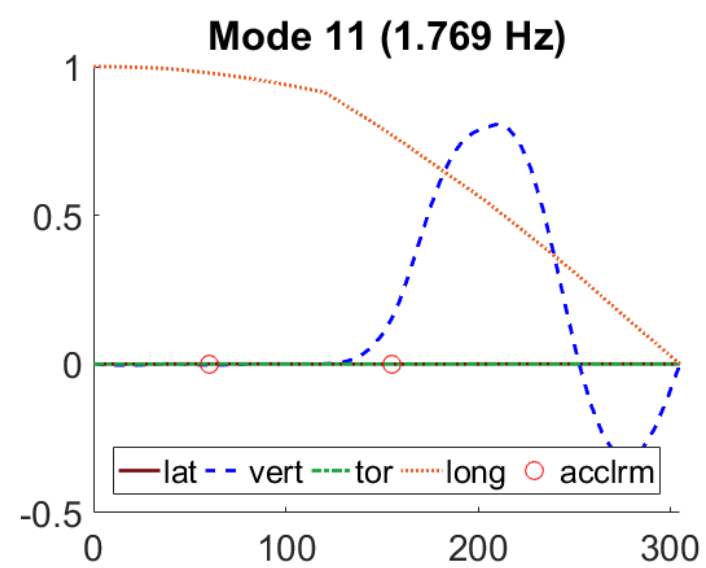
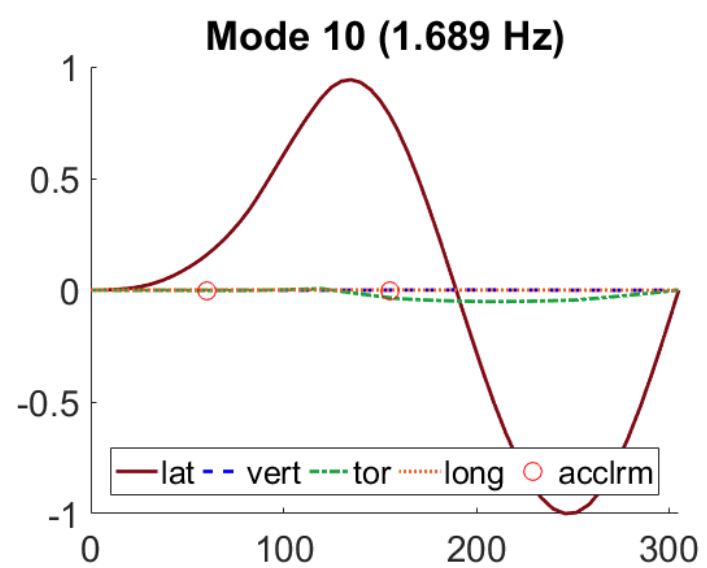
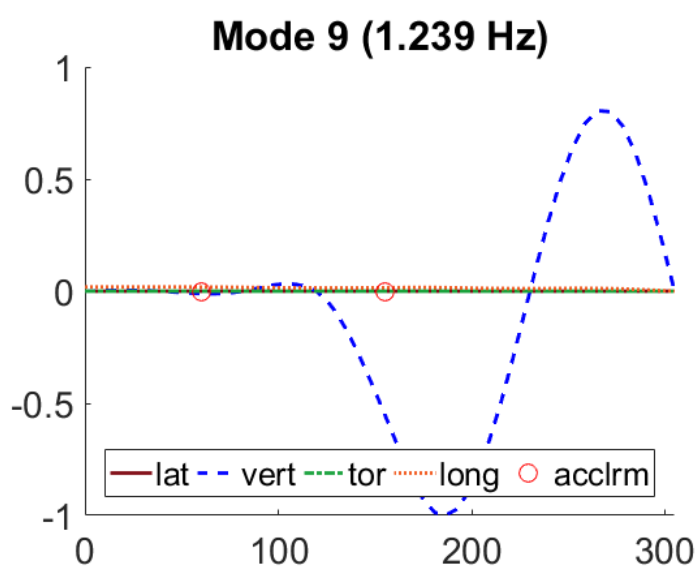


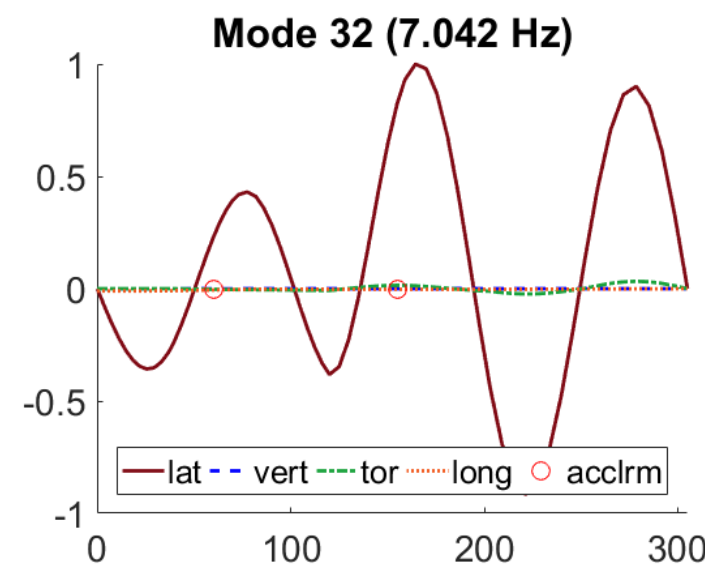
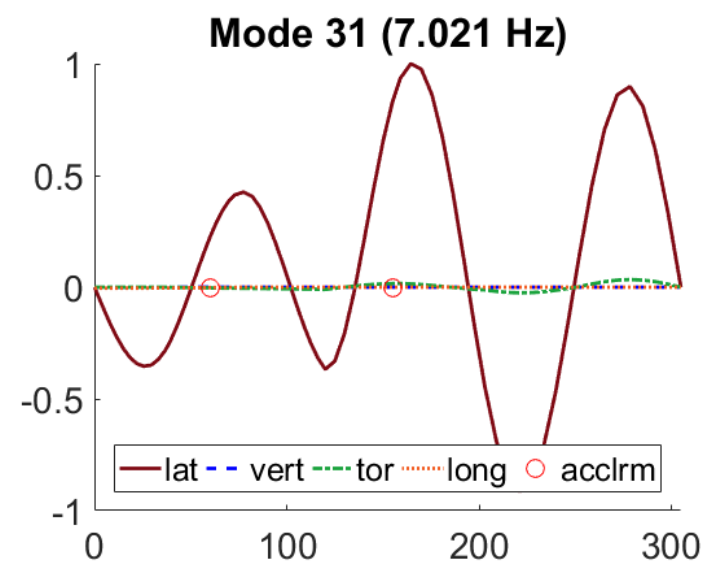
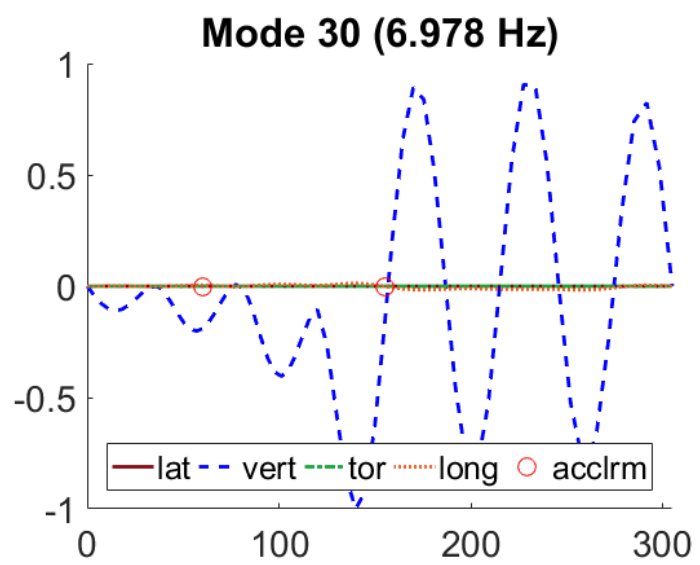
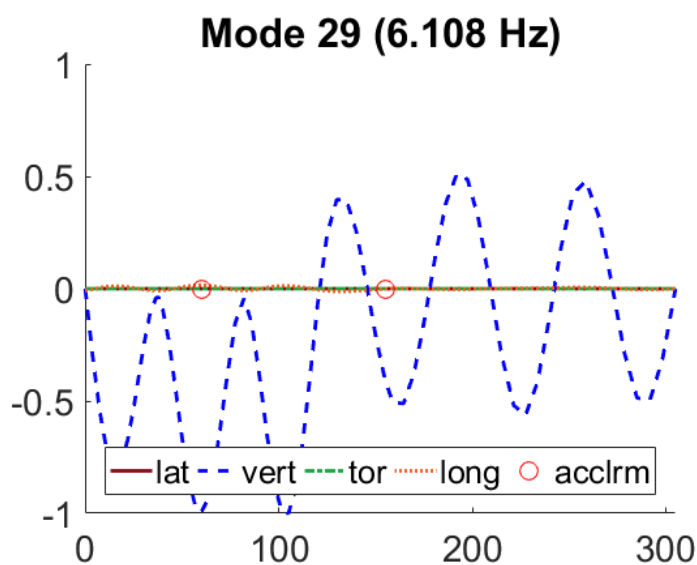
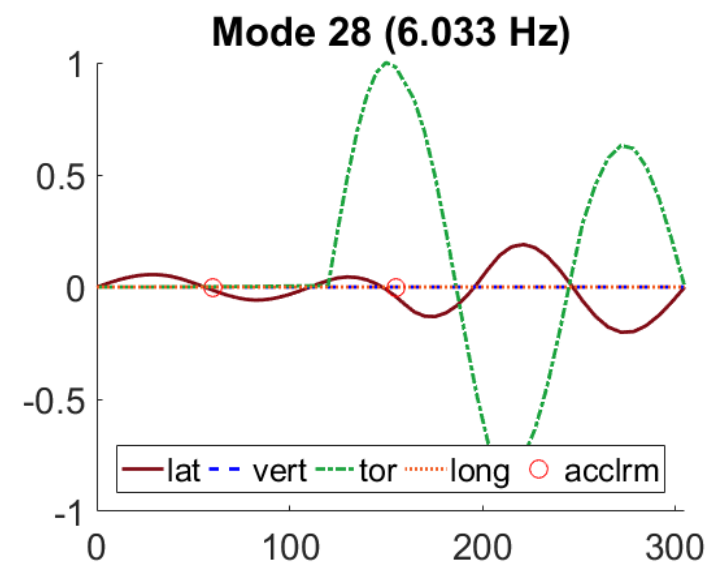
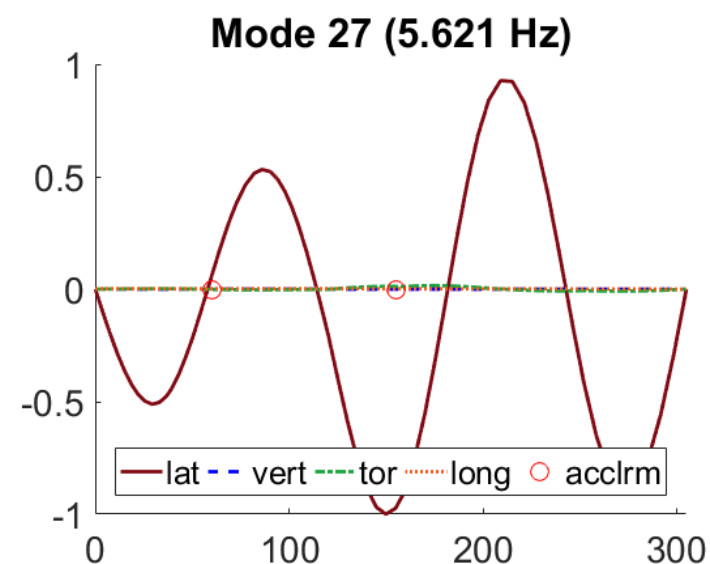
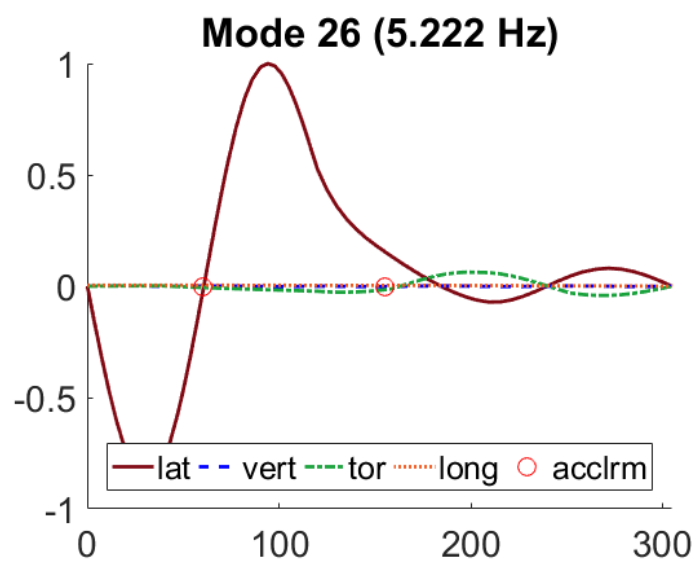
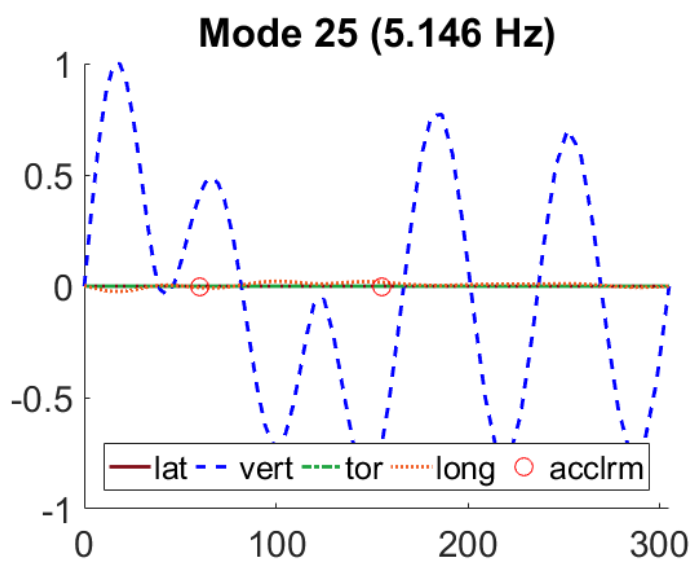
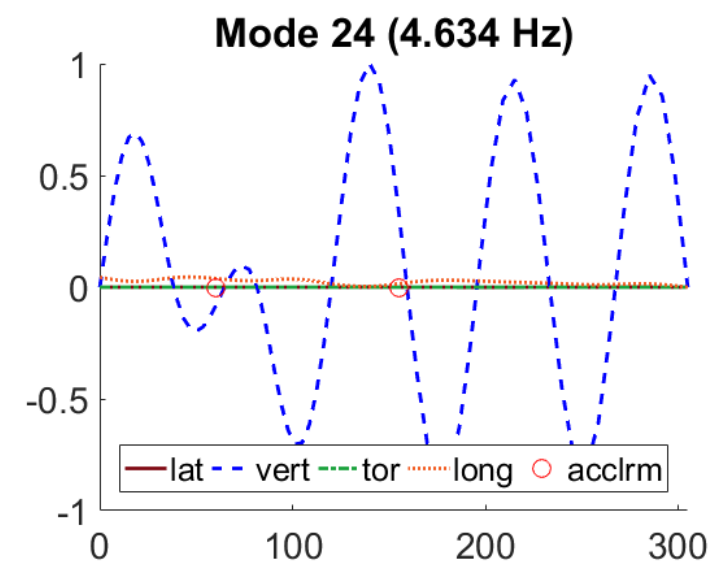
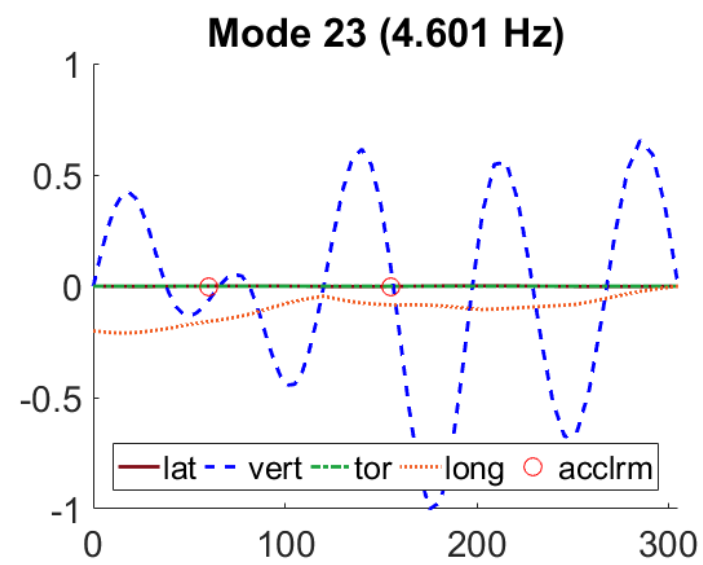
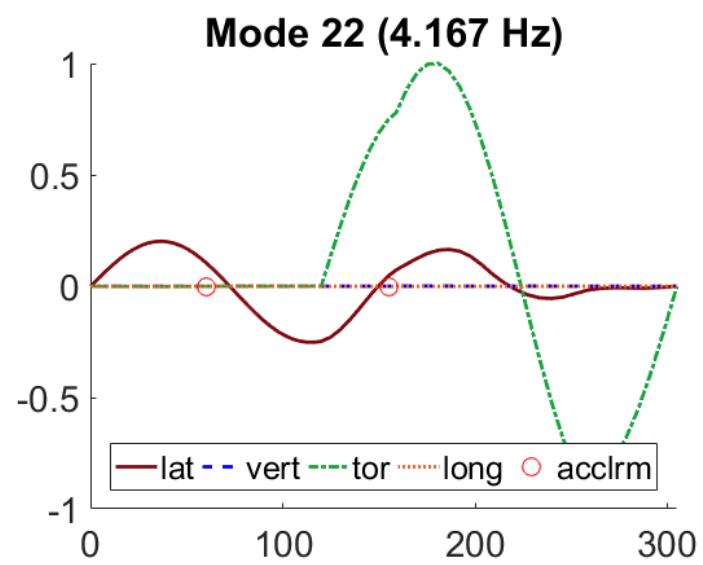
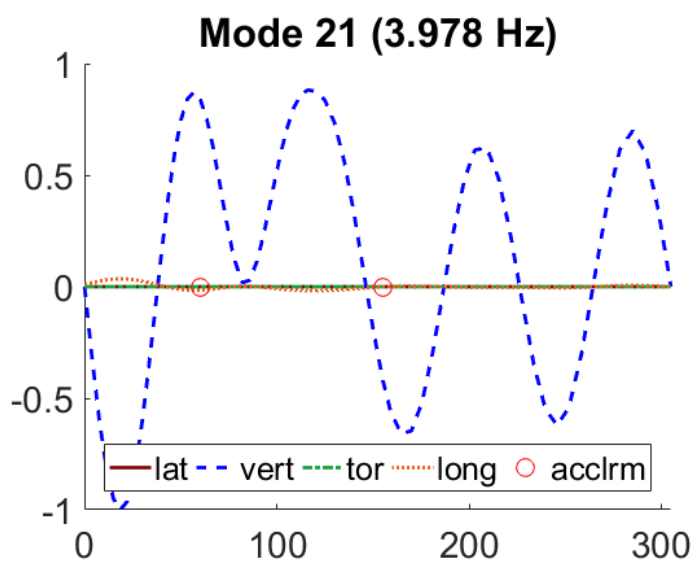


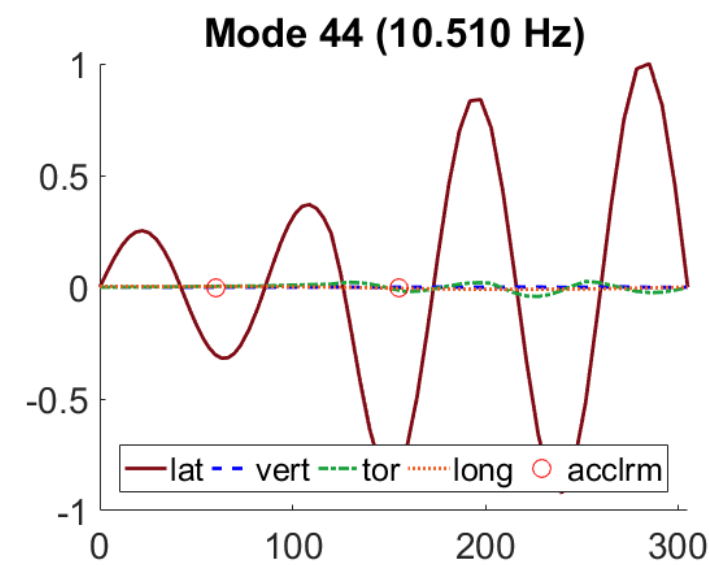
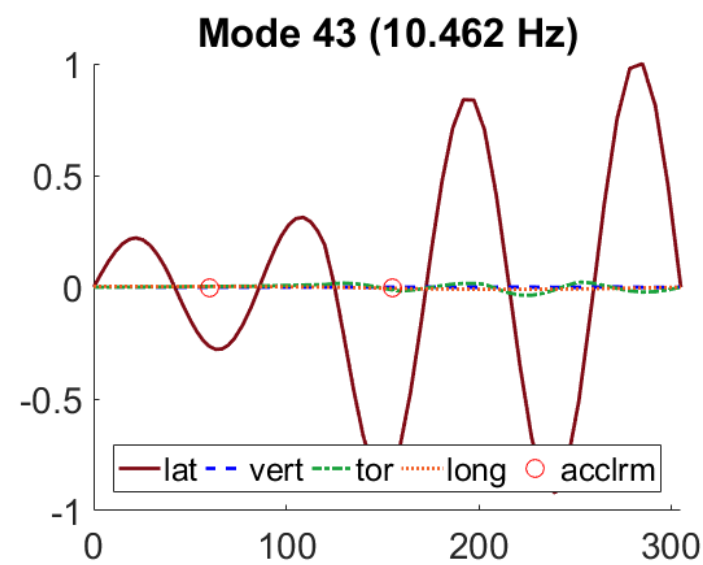
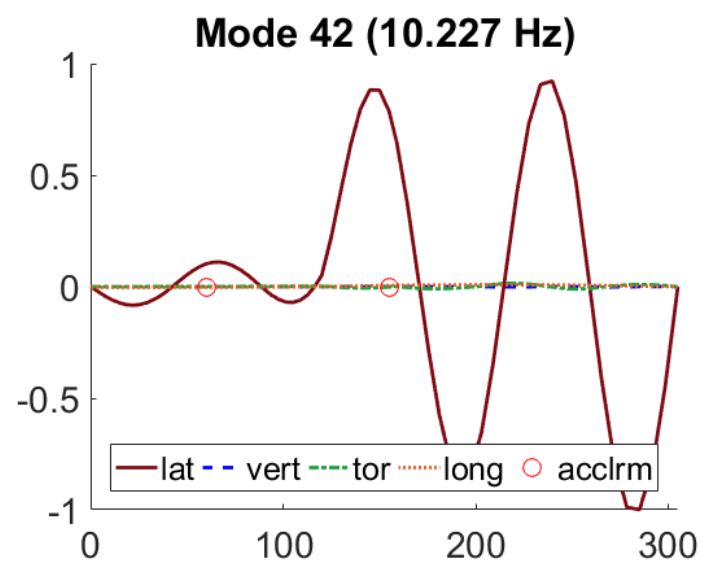
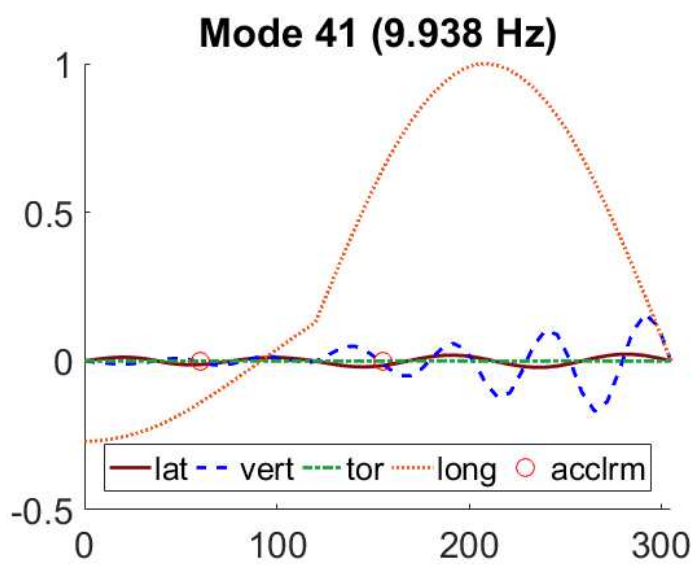
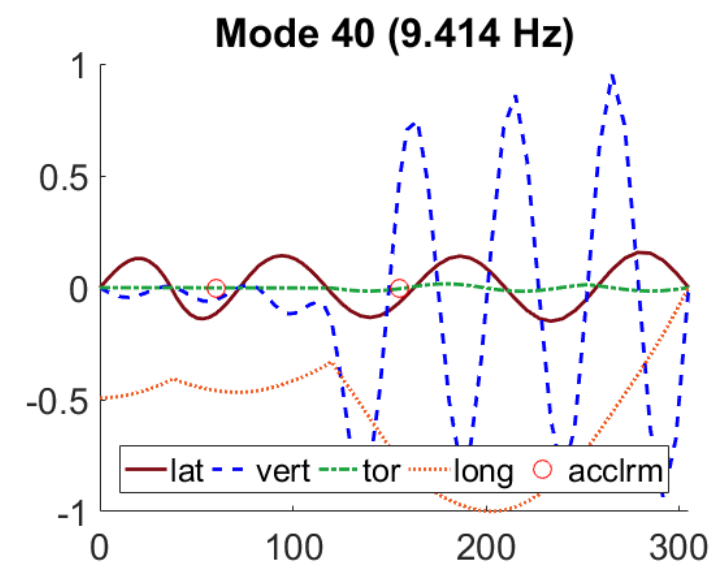
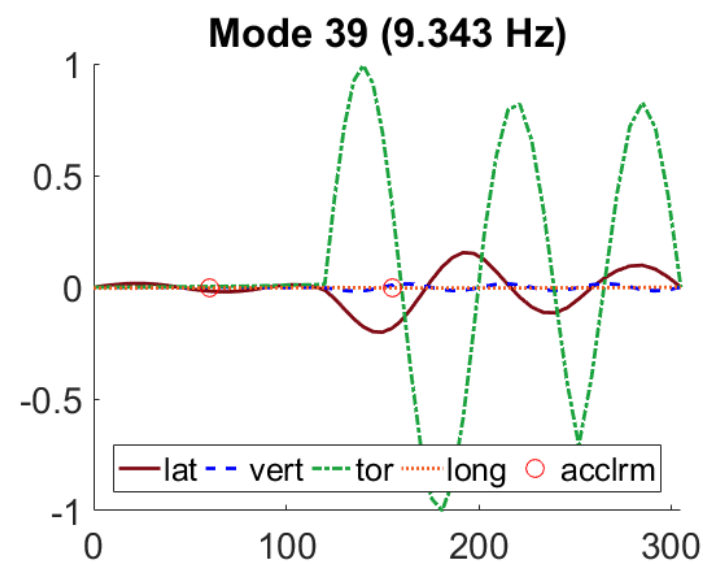
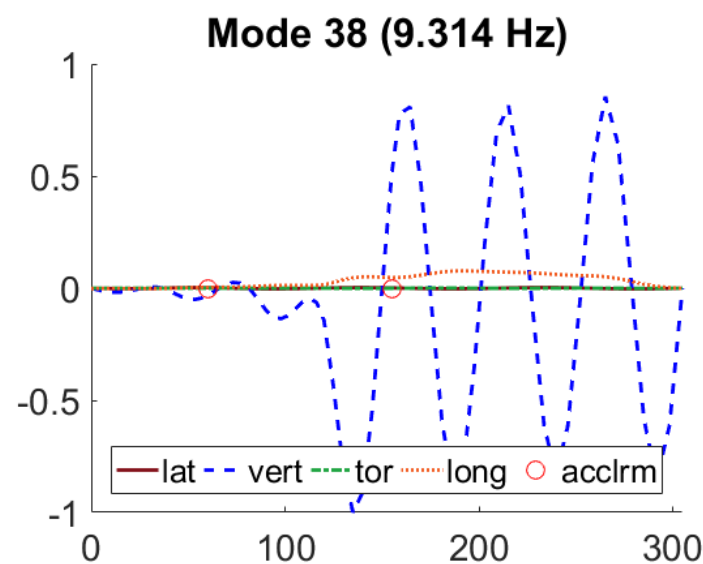
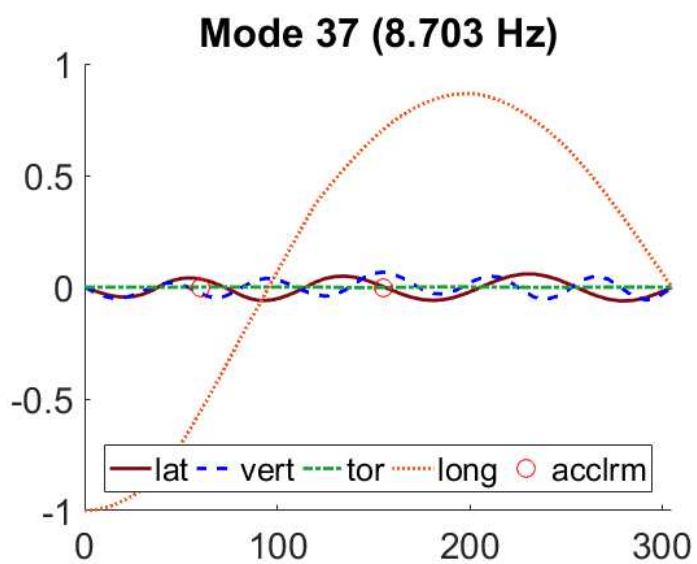
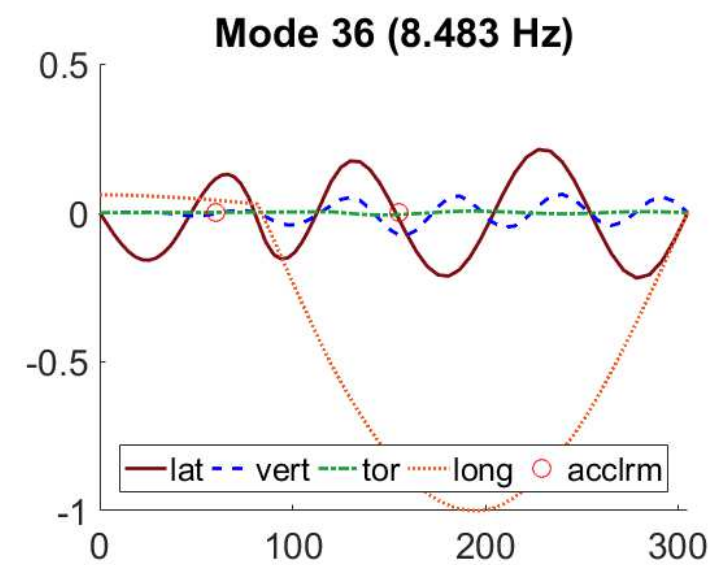
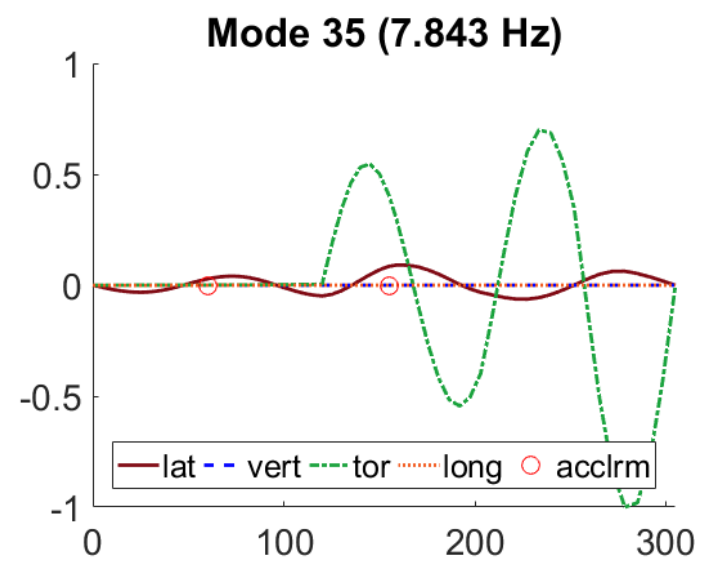
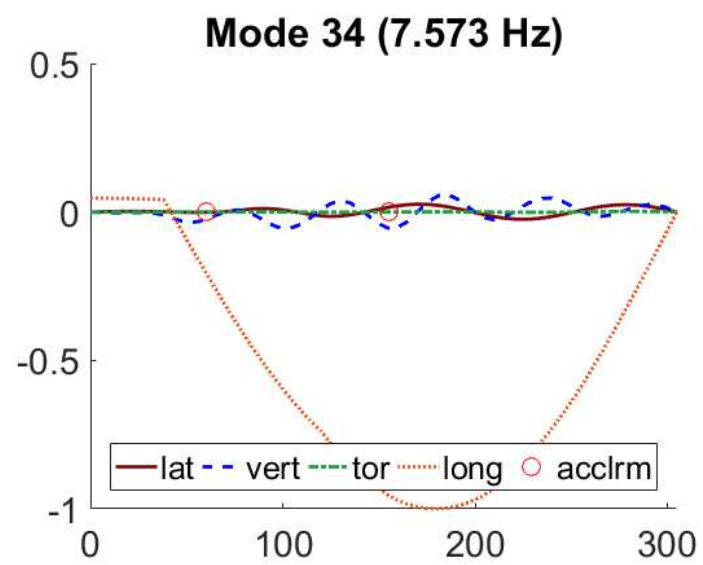
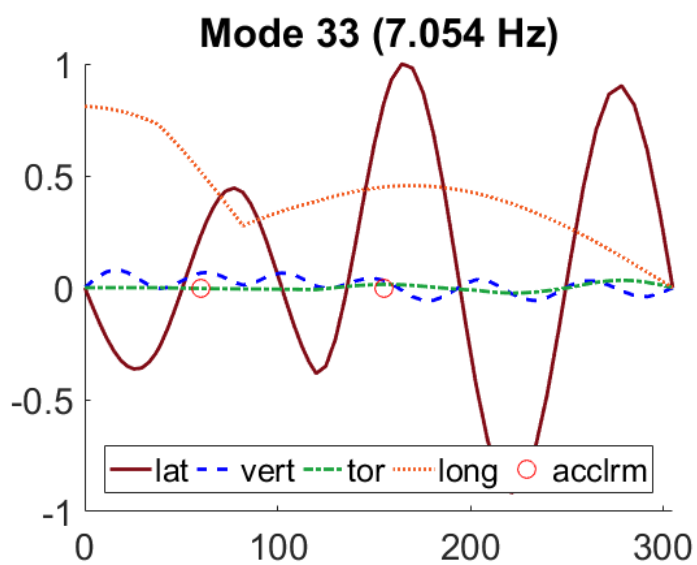


Abaqus modeplotter - brodekket, situasjon 2 (kapittel 5.4)

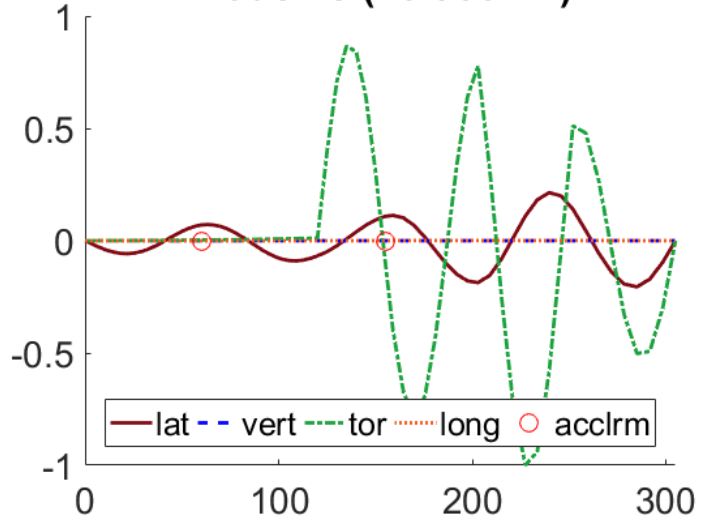




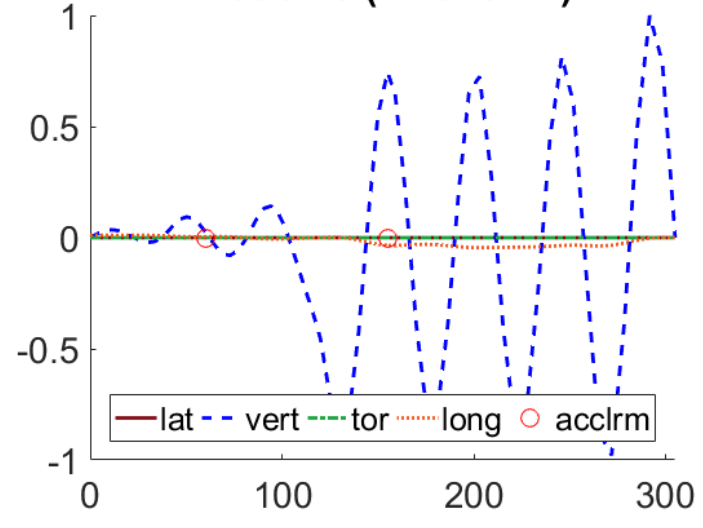




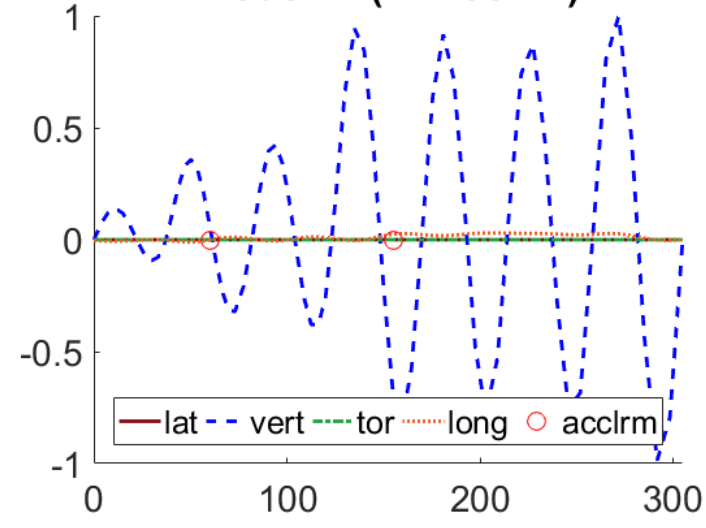
Mode 45 (10.966 Hz)



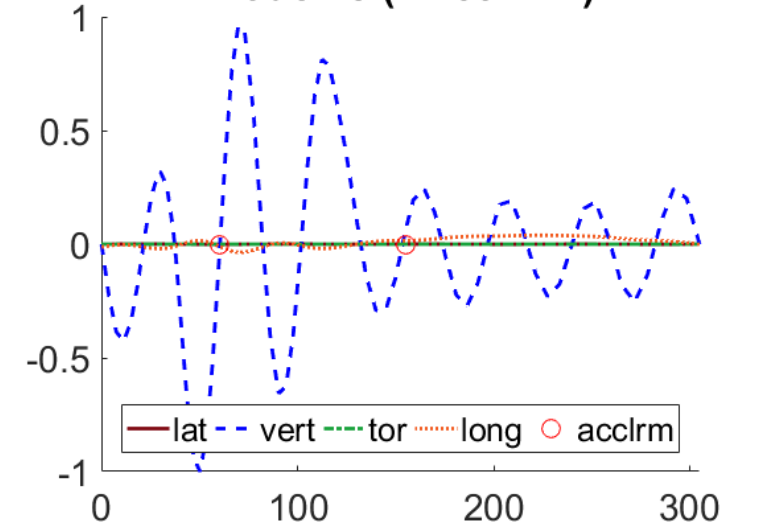
Mode 46 (11.325 Hz)



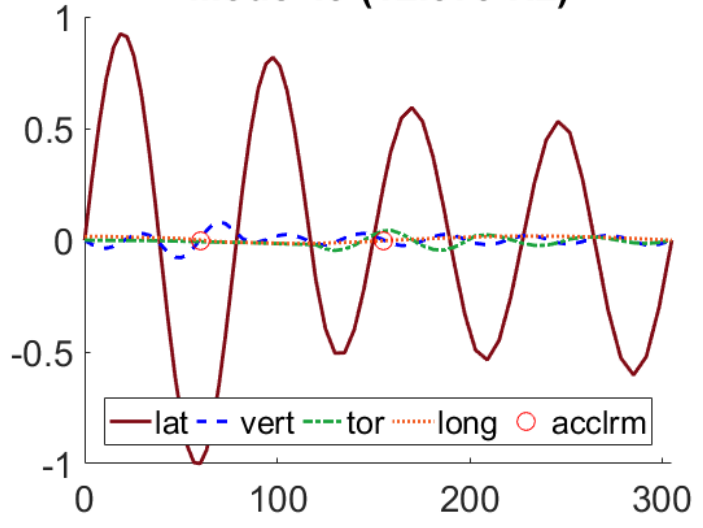
Mode 47 (11.796 Hz)



Mode 48 (12.394 Hz)



Mode 49 (12.979 Hz)



Mode 50 (13.004 Hz)

