



# Sjøkrigsskolen

## Bacheloroppgave

### Sjokkmålinger

Kartlegging av måleutstyr sammen med Sjøkrigsskolens fallmaskin

av

**Frida Dahl Muren**

Levert som en del av kravet til graden:

BACHELOR I MILITÆRE STUDIER MED FORDYPNING LEDELSE OG  
MARINEINGENIØR I VÅPEN, ELEKTRONIKK OG DATA

&

**Johanne Nicolaisen Aunøien**

Levert som en del av kravet til graden:

BACHELOR I MILITÆRE STUDIER MED FORDYPNING I LEDELSE OG  
MARINEINGENIØR MASKIN

Antall ord: 21 719

Innlevert: DESEMBER 2023

**Godkjent for offentlig publisering**



## Publiseringsavtale

### En avtale om elektronisk publisering av bachelor/prosjektoppgave

Kadetten(ene) har opphavsrett til oppgaven, inkludert rettighetene til å publisere den.

Alle oppgaver som oppfyller kravene til publisering vil bli registrert og publisert i Bibsys Brage når kadetten(ene) har godkjent publisering.

Oppgaver som er graderte eller begrenset av en inngått avtale vil ikke bli publisert.

Jeg (Vi) gir herved Sjøkrigsskolen rett til å gjøre denne oppgaven tilgjengelig elektronisk, gratis og uten kostnader	<input checked="" type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nei
Finnes det en avtale om forsinket eller kun intern publisering? (Utfyllende opplysninger må fylles ut)	<input type="checkbox"/> Ja	<input checked="" type="checkbox"/> Nei
Hvis ja: kan oppgaven publiseres elektronisk når embargoperioden utløper?	<input type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nei

## Plagiaterklæring

Vi erklærer herved at oppgaven er vårt eget arbeid og med bruk av riktig kildehenvisning.

Vi har ikke nyttet annen hjelp enn det som er beskrevet i oppgaven.

Vi er klar over at brudd på dette vil føre til avvisning av oppgaven.

**Dato: 02 – 12- 2023**

Frida Dahl Muren  
Kadett Frida Dahl Muren

Johanne Nicolaisen Aunøien  
Kadett Johanne N. Aunøien

## Forord

Oppgaven er skrevet av Frida Dahl Muren og Johanne Nicolaisen Aunøien, i perioden september til november 2023. Den er skrevet som en del av arbeidskravene for henholdsvis *Bachelor i militære studier med fordypning i ledelse og marineingeniør våpen, elektronikk og data*, og *Bachelor i militære studier med fordypning i ledelse og marineingeniør maskin*. Med mye tapt kunnskap om sjokk-faget, samt om Sjøkrigsskolens fallmaskin, ønsker vi å rette søkelyset mot nettopp dette temaet, atter en gang. I en verden hvor store militærmakter trapper opp, mener vi at dette er et steg i riktig retning. Vårt håp er at oppgaven kan bidra til å synliggjøre viktigheten av faget, og prioritere dette i videre forskning.

Vi ønsker å takke Lars Olav Tveita for hjelp i oppstartfasen med oppsett av datainnsamlingssystemet og programvare for analyse. Videre ønsker vi å gi en stor takk til Linn-Kristine Gaupholm som har vært en fremoverlent sparrepartner, sunn kritiker og aktiv motivator. Uten hjelp fra både Gisle Strand, Christophe Maurice Massacand og Frode Wikne, hadde ikke denne oppgaven vært mulig. Takk til dere alle sammen. I tillegg ønsker vi å takke alle som har lest gjennom oppgaven med et kritisk blikk, eller bidratt på andre måter. Selv om samtlige har hatt mange andre arbeidsoppgaver under denne perioden, har de tatt seg tid til å hjelpe på en engasjerende og god måte. Takk skal dere ha.

Grunnet oppgavens utforming med flere store grafer og figurer, anbefales det å skrive ut oppgaven, helst med farger, slik at man kan se på grafene samtidig som man leser om dem. Dette gir en bedre leseropplevelse, men er ikke nødvendig.

Bergen, Sjøkrigsskolen, 02-12-2023

*Frida Dahl Muren*  
Kadett Frida Dahl Muren

*Johanne Nicolaisen Aunøien*  
Kadett Johanne N. Aunøien

## Sammendrag

Gjennom anvendelse av nyinnkjøpte akselerometre og datainnsamlingssystem, har vi begynt kartleggingen av hvordan dette utstyret fungerer sammen med Sjøkrigsskolens fallmaskin. Her prioriteres drøfting rundt hvordan målingene kan anvendes opp mot sjokk-faget. Dette er blitt utført gjennom informasjonsinnsamling av relevante komponenter, testgjennomføring med varierende slipphøyder på fallmaskinens lodd, samt analyse og drøfting av resultater.

Innledningsvis er oppgavens relevans blitt fremlagt, hvor landets sjokk-kunnskap sees på med et kritisk blikk. Videre er relevant teori blitt presentert, etterfulgt av en beskrivelse av komponentene som spiller en viktig rolle for testgjennomføringen. Merk her at informasjon om fallmaskinen baserer seg på lokal kunnskap grunnet mangel på dokumentasjon. Relevante spesifikasjoner rundt brukte sensorer samt datainnsamlingssystemet fremlegges også, og blir viktig i drøftingen for å kunne si noe om hva som fungerer og ikke. Etter resultatene, presenteres analysen som tredelt; Hva ser vi i grafene og hva betyr dette? Hvordan fungerer utstyret sammen? Og til slutt; hvordan ser teorien og realiteten ut, opp mot hverandre?

Oppgaven har ikke gått i den retningen vi opprinnelig hadde planlagt med, hvor ytre faktorer sørget for en sen testgjennomføringsprosess. Dermed ble det oppdaget sent i prosessen av den ene sensor-typen ikke egner seg til måling av pådrag for slike sjokk. Testgjennomføringene ble dermed stanset, og planlagt metode for resultatfremlegging med SRS ble ikke like relevant. Dog er fremgangsmåten for å kunne presentere slike resultater kartlagt, med anbefaling om visse utbedringer.

Utbedringene omhandler, blant annet, anskaffelse av nye sensorer for å måle pådraget. Her er spesifikasjoner presentert i konklusjonen. Videre konkluderes det med at utstyret fungerer godt sammen, men er avhengig av visse utbedringer. Selv om opplevelsen av samarbeidet er god, er det blitt erfart at sjokkmålinger og sjokkberegninger er ekstremt komplisert, og krever et fokus i videre forskning for å kunne være til nytte for Den kongelige norske marine.

Avslutningsvis er anbefaling om veien videre lagt frem, hvor dette i stor grad omhandler den opprinnelige planen for testgjennomføringer. Her ser vi potensiale for å kunne sjokk-teste dempere, og dermed forsikre oss om at skrogets systemer tåler de belastninger den potensielt kan utsettes for.

# Innholdsfortegnelse

<b>Forord</b> .....	<b>ii</b>
<b>Sammendrag</b> .....	<b>iii</b>
<b>Innholdsfortegnelse</b> .....	<b>iv</b>
<b>Figurer</b> .....	<b>1</b>
<b>1 Innledning</b> .....	<b>3</b>
1.1 Bakgrunn.....	3
1.2 Mål .....	4
1.3 Problemstilling.....	5
1.4 Avgrensninger.....	5
1.4.1 Målgruppen for oppgaven.....	6
1.5 Metode .....	6
1.5.1 Plan .....	6
1.5.2 Testgjennomføring og datainnsamlingsmetode .....	7
1.6 Struktur .....	8
<b>2 Teori</b> .....	<b>9</b>
2.1 Grunnleggende teori.....	9
2.1.1 Fart og akselerasjon .....	12
2.1.2 Nedbremsing .....	13
2.2 Sjokkresponspekter – Intro.....	14
2.2.1 Fouriertransformasjon.....	17
2.3 Teori signalbehandling.....	18
2.3.1 Sampling .....	18
2.3.2 Analog-til-digital konvertering .....	20
2.3.3 Utregning i Python.....	21
<b>3 Forskningsdesign og oppsett</b> .....	<b>23</b>
3.1 Oppsett.....	23
3.2 Enkeltkomponenter .....	26
3.2.1 Sjøkrigsskolens Fallmaskin .....	26
3.2.2 Sjøkkdempere .....	30
3.2.3 Sensor-innfestning .....	34
3.2.4 Datainnsamlingssystem.....	36
3.2.5 Høyhastighetskamera.....	40

<b>4</b>	<b>Forsøksresultater .....</b>	<b>41</b>
4.1	Antakelser .....	41
4.2	Hensyn .....	42
4.2.1	Hensyn ved lesing av grafer .....	42
4.2.2	Feilkilder .....	42
4.2.3	Festemønster til sjokkdemperne .....	43
4.2.4	Sensorer .....	44
4.3	Resultater .....	44
4.3.1	Fallmaskin – testgjennomføring 50 mm .....	45
4.3.2	Fallmaskin – testgjennomføring 30 mm .....	52
4.3.3	Fallmaskin – testgjennomføring 10 mm .....	63
4.3.4	Målt respons 100 mm .....	68
4.3.5	Sjokkresponspekter .....	70
<b>5</b>	<b>Diskusjon og analyse .....</b>	<b>75</b>
5.1	Grafisk karakteristik .....	75
5.1.1	Skille mellom frigjøring av lodd og sammenstøt .....	76
5.1.2	Skille mellom bremsedemper og støttebein .....	78
5.1.3	Støy i akselerasjonsmålinger .....	79
5.2	Sjokkresponspekter – analyse .....	80
5.2.1	Akselerasjon .....	80
5.2.2	Pseudo-fart og pseudo-forflytning .....	81
5.3	Sensor og DAQ – styrker og begrensninger .....	82
5.3.1	Måleområde for sensorene .....	82
5.3.2	Samplingsfrekvens .....	85
5.3.3	Datainnsamlingssystem med signalbehandlings- og analyseprogram .....	87
5.4	Oppsettet for øvrig – styrker og svakheter .....	88
5.4.1	Bremsedempere sin grad av nedbremsing .....	88
5.4.2	Høyhastighetskameraets relevans .....	90
5.4.3	Feste til sensorene som feilkilde .....	92
5.5	Teoretisk fremstilling sett opp mot realiteten .....	93
5.5.1	Høyde på loddet og energioverføring .....	94
5.5.2	Usikkerhet rundt målinger på akselerasjonen .....	97
5.5.3	Sammenlikning av energi – TNT .....	99
<b>6</b>	<b>Konklusjon .....</b>	<b>101</b>
6.1	Anbefaling om veien videre .....	102
6.1.1	Sensorer og datainnsamlingssystem .....	102
6.1.2	Planlagt oppsett .....	103
6.1.3	Forbedringer fallmaskin .....	105
<b>7</b>	<b>Kildehenvisning .....</b>	<b>106</b>

---

<b>Vedlegg .....</b>	<b>108</b>
Vedlegg A – ORM fallmaskin .....	108
Vedlegg B – Resultater .....	108
Vedlegg C – Målinger .....	108
Vedlegg D – Pythonskript .....	108
Vedlegg E – Spenning-tøyning-diagram .....	108
Vedlegg F – Utregninger av fjærsystem .....	108
Vedlegg G – Video fra høyhastighetskamera .....	108



## Figurer

<b>Figur 2.1</b> - Teoretisk fremstilling av fallmaskin – lodd i øverste posisjon .....	10
<b>Figur 2.2</b> - Teoretisk fremstilling av fallmaskin - lodd i kontakt med aluminiumsplate .....	10
<b>Figur 2.3</b> - Teoretisk fremstilling av fallmaskin - lodd og aluminiumsplate i nedre posisjon .....	10
<b>Figur 2.4</b> – Illustrasjon av hvordan et sjokkresponsspekter dannes.....	14
<b>Figur 2.5</b> – Illustrasjon av et oscillerende system, eller fjærsystem. ....	15
<b>Figur 2.6.</b> Fjærsystemet til forsøkene (det som er markert med en stiplet linje). Legg merke til at en tredjedel av sjokkdempere er tatt med. ....	16
<b>Figur 2.7</b> - Graf som viser fouriertransformasjon gjort på akselerasjonen til et vilkårlig forsøk. Legg merke til sidelobene som oppstår, og gjør at grafen ikke er lesbar. ....	17
<b>Figur 2.8</b> - Illustrasjon av hvordan en samplingsfrekvens på 40 kHz vil gjenskape signaler med lik eller høyere frekvens. Legg merke til at det gjenskapte signalet (stiplede linje) har en lavere frekvens enn inngangssignalet. Hentet fra (Van de Vegte, J. (2001), s. 34).....	19
<b>Figur 2.9</b> - Forenklet illustrasjon av hvordan Sigma-delta-modulasjonen fungerer i en analog-til-digital-omformer.....	21
<b>Figur 3.1</b> - Oversikt oppsett på maskinverksted. ....	23
<b>Figur 3.2</b> - Oppsett sjokkdempere.....	24
<b>Figur 3.3</b> - Fallmaskinen på Sjøkrigsskolen i nedre posisjon. ....	26
<b>Figur 3.4</b> - Sentrale dimensjoner fallmaskin.....	28
<b>Figur 3.5</b> - Utklipp fra TSI Solutions sin nettside av en demper som antas å være av samme type (TSI Solutions, 2023).....	28
<b>Figur 3.6</b> - Dempere lagt skrått (ikke fastmontert). ....	29
<b>Figur 3.7</b> - Sjokkdempere lagt rett (ikke fastmontert). ....	29
<b>Figur 4.1</b> - Samtlige målinger av pådrag med slipp høyde 50mm plottet. Høyeste akselerasjonsmåling er på 102 km/s <sup>2</sup> , og laveste er på –88 km/s <sup>2</sup> .....	45
<b>Figur 4.2</b> - Forsøk 12 med slipp høyde 50 mm. Sammenlikning av pådragets akselerasjon, fart og forflytning innenfor samme tidsintervall. Høyeste akselerasjonsmåling er på 56 km/s <sup>2</sup> , og laveste er på –82 km/s <sup>2</sup> . ....	47
<b>Figur 4.3</b> - Samtlige målinger av respons med slipp høyde 50 mm plottet. Øverste graf er målingene fra sensor 3, nederste graf er målingene fra sensor 4.....	49
<b>Figur 4.4</b> - Kartlegging av høyfrekvente svingninger i stålplaten til fjærsystemet. Målt med en samplingsfrekvens på 20 kHz. ....	50
<b>Figur 4.5</b> - Forsøk 12 med slipp høyde 50 mm. Sammenlikning av responsens akselerasjon, fart og forflytning innenfor samme tidsintervall. ....	51
<b>Figur 4.6</b> - Samtlige målinger av pådrag med slipp høyde 30 mm plottet. Høyeste akselerasjonsmåling er på 102 km/s <sup>2</sup> , og laveste er på –88 km/s <sup>2</sup> .....	53
<b>Figur 4.7</b> - Forsøk 2 med slipp høyde 30 mm. Sammenlikning av pådragets akselerasjon, fart og forflytning innenfor samme tidsintervall. Høyeste akselerasjonsmåling er på 102 km/s <sup>2</sup> , og laveste er på –76 km/s <sup>2</sup> .....	54

<b>Figur 4.8</b> - Utklipp fra forsøk 2 fra slipp høyde 30 mm, hvor det blir synlig hvordan pådraget ikke klarer å hente seg inn igjen. ....	55
<b>Figur 4.9</b> - Forsøk 4 med slipp høyde 30 mm. Sammenlikning av pådragets akselerasjon, fart og forflytning innenfor samme tidsintervall. Høyeste akselerasjonsmåling er på 102 km/s <sup>2</sup> , og laveste er på -76 km/s <sup>2</sup> . ....	56
<b>Figur 4.10</b> - Samtlige målinger av respons fra slipp høyde 30mm plottet. Øverste graf inneholder målingene fra sensor 3, nederste graf er inneholder målingene fra sensor 4. ....	58
<b>Figur 4.11</b> - Forsøk 2 med slipp høyde 30 mm. Sammenlikning av responsens akselerasjon, fart og forflytning innenfor samme tidsintervall. ....	60
<b>Figur 4.12</b> - Forsøk 4 med slipp høyde 30 mm. Sammenlikning av responsens akselerasjon, fart og forflytning innenfor samme tidsintervall. ....	62
<b>Figur 4.13</b> - Forsøk 1 med slipp høyde 10 mm. Sammenlikning av pådragets akselerasjon, fart og forflytning innenfor samme tidsintervall. Høyeste akselerasjonsmåling er på 102 km/s <sup>2</sup> (metning), og laveste er på -86 km/s <sup>2</sup> . ....	64
<b>Figur 4.14</b> - Forsøk 1 med slipp høyde 10 mm. Sammenlikning av responsens akselerasjon, fart og forflytning innenfor samme tidsintervall. ....	66
<b>Figur 4.15</b> - Respons ved 100 mm slipp høyde. Sensor 3 er øverst og sensor 4 er nederst. ....	68
<b>Figur 4.16</b> - Respons ved 100 mm slipp høyde. Sensor 3 er øverst og sensor 4 er nederst. ....	69
<b>Figur 4.17</b> - Sjokkresponspekter for pådraget i forsøk 2 med 30 mm slipp høyde. $Q = 1,92$ er dempefaktoren til fjærsystemet i forsøkene. ....	71
<b>Figur 4.18</b> - Teoretisk fremstilt respons i tidsdomenet over faktisk målt respons til samme pådrag. ....	72
<b>Figur 4.19</b> - Sjokkresponspekter for pådraget i forsøk 4 med 30 mm slipp høyde. $Q = 1,92$ er dempefaktoren til fjærsystemet. ....	73
<b>Figur 4.20</b> - Teoretisk fremstilt respons i tidsdomenet over faktisk målt respons til samme pådrag. ....	74
<b>Figur 5.1</b> - Sjokkbevegelse (Harris & Piersol, 2002, s.23.4). Komplekst sjokk er illustrert i grafen nederst til venstre. ....	76
<b>Figur 5.2</b> - Begge grafene er et utklipp fra figur 4.9, og tar for seg hva som skjer i den første pulsen til sjokket. Øverste grafen viser pådraget målt, legg merke til hvor få punkter det er for hver svingning. Nederste viser responsen målt, legg merke til at det er flere målinger per svingning. ....	86
<b>Figur 5.3</b> - Fartsgraf produsert av analyseprogrammet til høyhastighetskameraet ut fra manuelt markerte samplinger i bildet. ....	89
Figur 5.4 - Forenkling fartsgraf fra høyhastighetskamera. ....	90
<b>Figur 5.5</b> - Utklipp fra programmet Photron FASTCAM Viewer tilhørende høyhastighetskameraet. ....	92
<b>Figur 5.6</b> - Mulig skjevhet i festet til sensor B11. ....	93
<b>Figur 5.7</b> – Sammenlikning halvsinus vs. forenkling av måling. ....	97
<b>Figur 6.1</b> - Teoretisk oppsett for testgjennomføring med både horisontal og vertikal innfestning. (F. Wikne, 2023). ....	104

# 1 Innledning

Innledningen vil ta for seg oppgavens bakgrunn, målet med oppgaven, problemstilling, avgrensninger, metode og struktur.

## 1.1 Bakgrunn

«Float, move, fight»

Dette er selve essensen med militære fartøy. Besetningen er avhengig av å holde fartøyet flytende og i bevegelse for at oppdraget skal kunne løses. Viktigheten av det å holde seg operativ, samt belastningene fartøyet må kunne tåle, er noen faktorer som skiller militære fartøy fra sivile fartøy. En essensiell faktor sivile fartøyer ikke behøver å forholde seg til, er faren for undervannsminer og torpedoer, samt fartøyets evne til å fungere etter et slikt angrep. Det er mange kritiske og skjøre komponenter om bord som ikke tåler å bli utsatt for brå og kraftige bevegelser, derfor har det norske Forsvaret krav til sjokkdempere som skal følge standarder i for eksempel RAR (Rules And Regulations).

«The topic shock response is a subset of the science of vibration. The last is well studied and documented which may be the case since it is connected to the important field of fatigue in construction. Engineers are not equally familiar with shock response. » (Andreassen, 2020, s.7).

Poenget til Andreassen om at det mangler sjokk-kunnskap blant ingeniører, særlig sammenliknet med kunnskapen om vibrasjon, har blitt synliggjort gjennom arbeidet med sjokkmålinger. Med sivile leverandører som til vanlig forholder seg til vibrasjonsdemping, kan man ikke garantere at materiellet faktisk tåler de kreftene et marinesfartøy kan utsettes for uten å teste dette selv.

«When it comes to Norway, we lack expertise in the field and we have presently no test cites specialized on shock response.» (Andreassen, 2020, s.7). Andreassens observasjon om manglende norsk kompetanse rundt sjokk kan skyldes at det er lenge siden den norske marine i stor grad har måttet forholde seg til den reelle faren ved undervannsminer og torpedoer. Dermed kan også *interessen*, eller oppfattelsen av viktigheten rundt tema, avta. Som tekniske offiserer i Den norske marinen er dette et tema vi mener man må ha kjennskap til. I tillegg synes vi det er viktig å ha nok kunnskap om sjokk, til å kunne forsikre seg om at ens fartøy er i stand til å tåle det den skal tåle. Slik er det ikke

nødvendigvis i dag. Sjokktesting og dimensjonering er primært relevant i militære sammenhenger. Både det faktum at ikke så mange jobber med sjokk, og det at militære sjokk-tester ikke nødvendigvis offentliggjøres, gjør at tilgjengeligheten blir mindre. Militære organisasjoner har interesse av å holde informasjon unna eksterne trusler når det kommer til beregninger på hvor store krefter et fartøy kan tåle. Dette legger opp til at lokal kunnskap, med egne beregninger og erfaringer, blir essensielt.

I 2021 ble det gjort målinger av den lite brukte fallmaskinen tilhørende Sjøkrigsskolen, hvor tilgjengelig målingsutstyr var høyhastighetskamera og gamle akselerometre. Erfaringer fra dette studiet var at «sjokkmaskinen ikke evner å reprodusere konsistente akselerasjonstopper» (Svarstad og Rød, 2021, s.26). I dag har skolen i samarbeid med Forsvarsmateriell gått til anskaffelse av nytt og mer moderne måleutstyr, i håp om å gjøre fallmaskinen relevant igjen.

Dette er bakgrunnen for å undersøke om Sjøkrigsskolens fallmaskin kan gjøres relevant atter en gang, ved hjelp av nyere teknologi.

## 1.2 Mål

Ved utprøving av det nyanskaffede måle- og datainnsamlingssystemet, sammen med Sjøkrigsskolens fallmaskin, ønsker vi å danne grunnarbeidet for videre studier rundt temaet sjokk. Herunder bidra til økt forståelse rundt fenomenet sjokk for nåværende og kommende kadetter, militært ansatte og lærere. Dette gjennom å kartlegge styrker og svakheter med oppsettet. Her anses det som viktig å ikke bare gjøre målinger, men også klare å bruke resultatene til å se på teoretisk sjokk opp mot det fysiske konseptet sjokk.

Gruppen motiveres i stor grad til å gjøre et grundig arbeid med testing av det nyanskaffede måleutstyret. Dette for å tilrettelegge for videre testing, skape engasjement rundt tema og spre kunnskapen om og viktigheten av sjokkmålinger og sjokkberegninger. Gjennom vårt arbeid legges det dermed opp til videre forskning. Forslag til veien videre er beskrevet i kapittel 6.1 – *Anbefaling om veien videre*.

### 1.3 Problemstilling

I hvor stor grad er de nye akselerometrene og datainnsamlingssystemet egnet til å gjennomføre sjokktesting sammen med Sjøkrigsskolens fallmaskin, og høyhastighetskamera?

### 1.4 Avgrensninger

Det er mange faktorer en kan trekke inn i en oppgave om sjokk, som bølgemønster, plassering av komponenter om bord, utforming av skrog osv. Vi velger å avgrense oss til å kun se på effekten et sjokk har på en enkeltkomponent med fire sjokkdempere installert, hvor man ser på *single degree of freedom* (SDOF), altså kun bevegelse i fallretning. Dermed, grunnet oppgavens bredde, begrenses det hvor dypt vi dykker ned i de ulike temaene.

Skolen har gått til innkjøp av nye sjokkdempere av typen *H95-216-90-125-8 FF* som vil bli anvendt under forsøkene. Det er ikke selve demperne som er i fokus under forsøkene i denne oppgaven. Før man kan teste ulike dempere og deres egenskaper, er det viktig å kartlegge måleutstyret som skal anvendes. Dette for å fokusere på måleutstyrets virkemåte.

Av dynamiske laster velger vi å kun se på enkeltstående slaglaster, og ikke repeterende slaglaster. Det vil i praksis si at oppgaven skal måle akselerasjon for ett sjokk, og ikke flere. Dette er fordi fokuset er på sjokk som kommer av undervannsekspløsjoner, og ikke hendelser som, eksempelvis, å slå mot et skjær. Dette har en påvirkning på oppsettet og dermed hvordan kurvene i grafene vil se ut.

Sikkerhetsmessige begrensninger og rammer er lagt frem og diskutert i ORMen (Operational Risk Management) som er produsert i forbindelse med bruk av fallmaskinen. Deltakende personell må sette seg inn i dokumentet før testgjennomføringer. Dette kan leses i vedlegg A - *ORM fallmaskin*.

I tillegg vil det kun utføres forsøk i fallretning, og ikke skjærretning. Den opprinnelige planen var å ha begge, men dette lar seg ikke gjøre. Derfor legges det frem hvordan vi teoretisk hadde tenkt å gjennomføre forsøk i skjær, uten å gjøre forsøk på dette selv. Teoretisk oppsett kan leses om i *6.1 – Anbefaling om veien videre*.

### **1.4.1 Målgruppen for oppgaven**

Denne bacheloroppgaven er en tverrfaglig oppgave, hvor hensikten er at oppgaven skal være relevant for både en våpentekniker og en maskinist. I tillegg er det ønskelig at lærere på Sjøkrigsskolen skal kunne anvende deler av det som blir lagt frem i oppgaven for å kunne bruke sjokkmålinger og sjokkberegninger i undervisningen. Dette fører til en viss bredde i oppgaven og en prioritert beskrivelse av oppgavens komponenter.

## **1.5 Metode**

Under metode vil planen for gjennomføring av prosjektet, samt metode for datainnsamling og behandling av målingene, bli lagt frem.

### **1.5.1 Plan**

Arbeidet ble delt inn i fem faser, hvor skriving av rapport ble gjennomført simultant med alle fasene. Vi valgte å bli kjent med måleutstyret på en data-lab først, for så å sette utstyret sammen med fallmaskinen. Denne inndelingen ble gjort grunnet leveringstid på sjokkdempere og annet støtteutstyr, og tilrettela for å komme raskere i gang med forsøkene når bestilte deler først ankom.

Fase 1: strukturering av arbeidet, innhenting av relevant teori, samt bli kjent med måleutstyret sammen med en vibrasjonsmaskin på Sjøkrigsskolens automasjonslab. Her ble det produsert en ORM, med et krav om at deltakende personell skulle lese over denne før de kunne delta i testingen.

Fase 2: bli kjent med fallmaskinen på maskinlaben og gjøre seg kjent med det nye oppsettet, inkludert høyhastighetskameraet.

Fase 3: gjennomføring av forsøk.

Fase 4: analyse og drøfting av resultater innhentet under forsøksfasen.

Fase 5: utlevering av oppgave til eksterne i den hensikt å sørge for at materialet er forståelig presentert, for så å revidere oppgaven.

## 1.5.2 Testgjennomføring og datainnsamlingsmetode

Forsøkene ble gjennomført ved bruk av en fallmaskin som står plassert på Sjøkrigsskolens maskinverksted. De nye akselerometrene ble plassert før og etter fire sjokkdempere som skal dempe sjokket de blir påført. Oppsettet for testgjennomføring beskrives i kapittel 3.1 *Oppsett*, og gangen i testgjennomføringen beskrives i 2.1 *Grunnleggende teori* og 3.2.1 *Fallmaskin*.

For å samle inn målingsdata fra forsøkene med fallmaskinen ble det tatt i bruk et datainnsamlingssystem som består av flere ulike komponenter. Disse komponentene kan leses mer om i kapittel 3.2 *Enkeltkomponenter*.

Samtidig som sjokktesten ble gjennomført, startet både loggingen av måleverdiene til akselerometrene i GI.bench, som er et program for datainnsamling, samt opptak med høyhastighetskamera. Loggingen fra GI.bench ble lagret i en tekstfil, i «.csv»-format, som ble videresendt til et program i LabVIEW hvor verdiene til de ulike sensorene ble lest av og presentert som en graf. Her ble det lagret en ny tekstfil, «.txt»-format, med det avgrensede området. Det er denne filen som ble anvendt videre, og satt inn i et Python-skript for videre analyse. I den anvendte plattformen for programmering, Python, ble verdiene til sensorene lest av og presentert som grafer.

I tillegg anvendes sjokkresponsspekter (SRS) for å fremstille en teoretisk respons ut ifra det målte pådraget. «SRS er en kvantisering av maks akselerasjon, hastighet, eller forflytning i en plutselig endring som funksjon av frekvens» (Andreassen, 2020, s.8). Ved hjelp av et SRS blir det dermed mulig å predikere hvordan ulike sjokk kan påvirke en komponent om bord. Det anvendes SRS for å lage en teoretisk fremstilling av hvordan responsen til gjeldende system kan se ut.

Med dette som metode for testgjennomføring og datainnsamling fra forsøkene våre, vil de ferdigfremstilte grafene bli kommentert og diskutert videre i kapittel 5 *Diskusjon og analyse*.

## 1.6 Struktur

I oppgaven vil det først bli presentert relevant teori, forsøket vil bli beskrevet og komponenter forklart. For å kunne svare best mulig på problemstillingen prioriteres det å kartlegge relevante komponenter for å forstå helheten av oppgaven. Resultatene vil så bli lagt frem, etterfulgt av en drøfting rundt funnene som ble gjort, samt dets troverdighet og relevans. Avslutningsvis vil oppgaven oppsummeres i form av en konklusjon, og anbefaling for videre arbeid vil legges frem og begrunnet.



## 2 Teori

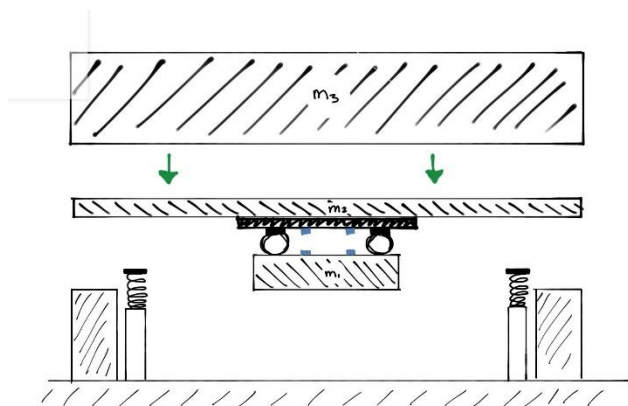
Teoridelen av oppgaven vil ta for seg generell teori om sjokk og sjokkrespons. Dette struktureres og fremlegges som grunnleggende teori, sjokkresponspekter og teori om signalbehandling.

Innledningsvis vil anvendt terminologi kartlegges for å danne et felles språk. Gjennom oppgaven vil det skilles på to forskjellige dempere. De første demperne er sjokkdemperne som er montert under aluminiumsplatene. Den andre typen demper er de som er fastmontert på fallmaskinen. For bedre å kunne skille disse vil de fastmonterte demperne bli kalt bremsedempere. I tillegg er det flere typer plater det henvises til. Her er det snakk om en aluminiumsplate som er plassert under loddet, samt en stålplate som henger under sjokkdemperne. Det er viktig å merke seg forskjellen på disse.

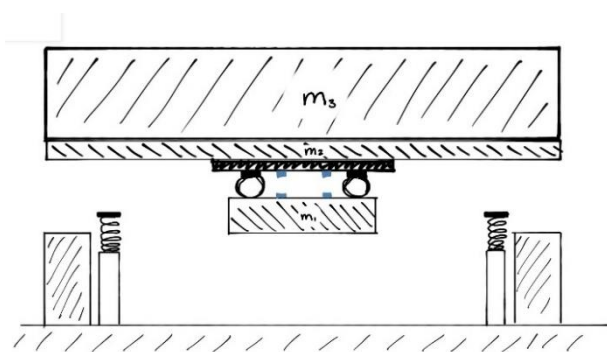
### 2.1 Grunnleggende teori

Sjokk defineres i denne oppgaven til å være et mekanisk sjokk som er en ikke-periodisk overføring av energi, og karakteriseres med bråhet og alvor (Harris og Piersol, 2002, s. 1.23). Dette sjokket fører til et pådrag som virker på sjokkdemperne. Reaksjonen til systemet etter sjokkdemperne, omtales som responsen. Pådraget og responsen måles med akselerometre som er montert før og etter demperne, slik man kan se i figurene under.

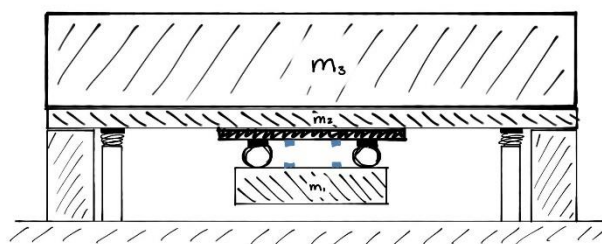
Sjokkberegninger på et fartøy er svært komplekst og avhenger av mange komponenter. Alt fra undervannsbombens egenskaper og fysiske faktorer i området, til skrogets oppbygning og komponentenes plassering, er med på å bestemme utfallet av en undervannsdetonasjon. En trykkpuls, som sendes sfærisk ut fra detonasjonsstedet avhenger av, blant annet, saltinnhold, temperatur og dybde (Urban, 2002, s.101). Kompleksiteten i utformingen til et fartøy gjør også at undervannssjokket gir varierende sjokk-karakteristikk avhengig av hvor man er i skipet. Utfordringen rundt beregninger av sjokk gjør at det er viktig med praktiske forsøk for å observere og erfare hva utstyret faktisk tåler.



**Figur 2.1** - Teoretisk fremstilling av fallmaskin – lodd i øverste posisjon



**Figur 2.2** - Teoretisk fremstilling av fallmaskin - lodd i kontakt med aluminiumsplate



**Figur 2.3** - Teoretisk fremstilling av fallmaskin - lodd og aluminiumsplate i nedre posisjon

Sjokkberegninger på enkeltkomponenter er derimot håndterbart. En metode for å gjøre sjokkmålinger på enkeltkomponenter er ved anvendelsen av en fallmaskin. Konseptet med Sjøkrigsskolens fallmaskin er å simulere et undervannsjokk. Øvre posisjon før en sjokktest er illustrert i figur 2.1. Loddet slippes så ned på en aluminiumsplate, som her illustrerer en hudplate på skroget til et fartøy. Figur 2.2 illustrerer loddet idet det treffer aluminiumsplatens. Videre faller loddet og platen ned og treffer to bremsedempere, som simulerer dempingen vannet utøver i en undervannseksplisjon, før fallet så stoppes av fire støttebein. Dette er illustrert på figur 2.3. Dempene som er festet mellom aluminiumsplatens og det hengende loddet, altså slåtplate merket med  $m_1$ , er ikke tegnet med illustrerende bevegelser etter sjokket. Her avhenger sjokkets størrelse av vekten til loddet,  $m_3$ , samt avstanden mellom aluminiumsplatens, markert  $m_2$ , og loddet. Videre vil massen til enkeltkomponenten,  $m_1$ , ha en påvirkning på hvilken effekt sjokket har på demperne.

Med dette som introduksjon til hva en fallmaskin er, vil det nå forklares i detalj hva som fysisk skjer og hva teorien bak sjokkmålingene er.

Loddet med en høyde  $h$  over aluminiumsplatens har en potensiell energi, slik vist i figur 2.1. I første omgang vil fallet forenkles til at all den potensielle energien går over til kinetisk energi gjennom hele fallbevegelsen. Grunnet loddets tyngde vil aluminiumsplatens utløses fra klaffene som holder platen oppe, idet loddet treffer platen. Dette skjer når loddet er i posisjonen som er illustrert i figur 2.2. Friksjonen som oppstår her, samt luftmotstand under hele fallet og tap av energi i metallene, vil neglisjeres i den teoretiske fremstillingen. Herfra vil loddet og platen falle ned sammen før de treffer to bremsedempere som er installert for å senke farten den siste delen av fallet som en simulering av vannets dempende effekt. Dette er fordi gjeldende fallmaskinen skal simulere undervannsjokk hvor en av de største forskjellene på undervannsjokk og sjokk i forbindelse med en veibombe for eksempel, er at man må ta høyde for vannets påvirkning.

Sjokkdemperne, som har et lite lodd hengende under seg, er festet under aluminiumsplatens, slik som illustrert på alle figurene over. Det er over og under disse demperne at sensorene som skal måle akselerasjon, blir festet. Dette er de blå firkantene som er tegnet inn i figurene over. Det antas, i forkant av testgjennomføringene, at idet loddet treffer aluminiumsplatens vil sjokkdemperne oppleve en komprimering, etterfulgt

av en svingning. Deretter vil sjokkdemperne strekkes idet aluminiumsplaten treffer bremsedemperne og deretter støttebeina, etterfulgt av en dempet svingning.

Hvilken del av sjokket som vil ha størst utslag på demperne er vanskelig å predikere. Med tanke på hva demperne tåler, vil den begrensende faktoren være idet loddet treffer bremsedemperne og støttebeina. Dette fordi det er her sjokkdemperne strekkes og demperne tåler mindre i strekk-retning enn i kompresjonsretning. Sjokkdemperne vil bli ytterligere kommentert i kapittel 3.2.2 *Sjokkdempere*.

### 2.1.1 Fart og akselerasjon

For å kunne gjøre et anslag på farten loddet vil ha rett før den treffer aluminiumsplaten, tas det utgangspunkt i potensiell energi. Når loddet er låst i øvre posisjon har loddet potensiell energi,  $E_P$ . Fordi luftmotstand og friksjon mellom loddet og støttene neglisjeres, samt at det antas at loddet lander horisontalt og fordeler slaget jevnt, kan man si at den potensielle energien som loddet har er den samme som den kinetiske energien,  $E_K$ , rett før sammenstøtet. Det antas å være et fullstendig uelastisk støt. Her må det nevnes at energi er bevart i fritt fall fordi konservative krefter virker, hvor tyngdekraften er en konservativ kraft.

$$E_P = E_K$$

$$m_{\text{lodd}} g h_0 = \frac{1}{2} m_{\text{lodd}} v_{\text{lodd}}^2$$

Her er  $m_{\text{lodd}}$  massen til loddet,  $h_0$  er avstanden mellom loddet i utgangsposisjon og ned til aluminiumsplaten,  $v$  er farten loddet har i sammenstøtet med platen, og  $g$  er tyngdeakselerasjonen. Fordi massen er den samme, kan man stryke massen på begge sider og løse formelen for farten loddet har rett før sammenstøtet med aluminiumsplaten,  $v$ .

$$v = \sqrt{2gh_0}$$

Denne tilnærmingen til fart kan anvendes så lenge det er snakk om fritt fall. Derfor kan man anvende formelen også etter at loddet har truffet aluminiumsplaten og de sammen faller i tilnærmet fritt fall.

Videre kan man anvende bevaring av bevegelsesmengde for å se på den teoretiske sammenhengen mellom farten loddet har rett før sammenstøt og farten aluminiumsplaten,

sammen med loddet, har etter sammenstøtet. Med samme antakelser som listet over, gir dette sammenhengen:

$$m_{\text{lodd}} v_{\text{før}} = (m_{\text{lodd}} + m_{\text{alu,plate}}) v_{\text{etter}}$$

Fordi massen til aluminiumsplatene er tilnærmet forsvinnende liten i forhold til loddets masse, tilsier dette at det ikke er veldig stor forskjell i farten før og etter sammenstøtet.

Videre er det relevant å se på sammenhengen mellom farten, tiden og akselerasjon i støtet.

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

Farten trenger ikke å være spesielt stor for å få særdeles høye akselerasjoner, hvis tidsforskjellen er veldig liten. Mindre tidsforskjell vil gi høyere teoretisk akselerasjon. For å være sikker på at den målte tidsforskjellen er representativ, må den være mye høyere enn samplingsfrekvensen på målingene. Det betyr at man bør ha flere samplinger innenfor tidsintervallet.

### 2.1.2 Nedbremsing

For å kunne beregne en bremskraft rent teoretisk, slik man vil se i bremsedemperne, gjøres det en antakelse om at aluminiumsplatene og loddet sammen utsettes for en impuls fra en konstant kraft  $F$  under oppbremsingen. Dermed blir akselerasjonen konstant, altså avtar farten lineært. Følgelig sees sammenhengen mellom høyden på demperne i øverste posisjon og nederste posisjon, hvor lang tid platen bruker fra øvre punkt til nedre punkt, samt farten platen har rett før den stoppes av de fire støttebeina. Det gir sammenhengen:

$$\Delta p = F \Delta t$$

$$m(v_f - v_i) = F \Delta t$$

Bevegelsesmengden  $\Delta p = mv$  tar høyde for start- og slutfarten  $v_i$  og  $v_f$ . Her er  $m$  massen,  $v_f$  er farten i nedre posisjon,  $v_i$  er farten i øvre posisjon,  $F$  er kraften og  $\Delta t$  er tiden aluminiumsplatene og loddet, bruker på å komme seg fra øvre punkt til nedre punkt på demperen.

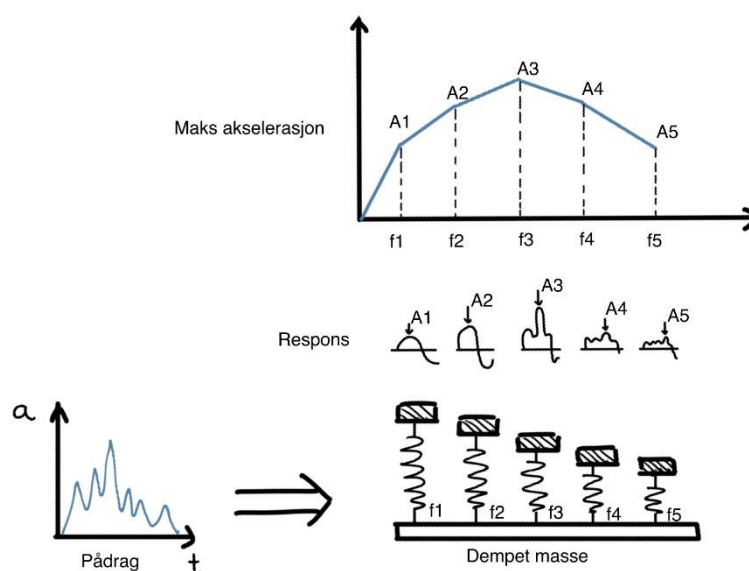
Teorien vil kunne anvendes uavhengig om at man ønsker å se på systemet når farten rett før sammenstøt med beina er null, eller ikke.

## 2.2 Sjokkresponspekter – Intro

Spekteret vi referer til i *sjokkresponspekteret* (SRS) tar for seg de naturlige frekvensene til hver enkelt oscillator. Den naturlige frekvensen, eller egenfrekvensen, til en oscillator er frekvensen den svinger med uten ytre forstyrrelser, og er avhengig av masse, fjærstivhet og dempeforhold. Enhver oscillator vil dermed respondere ulikt på samme pådrag, fordi egenfrekvensen påvirker hvordan svingningen til oscillatoren utformer seg.

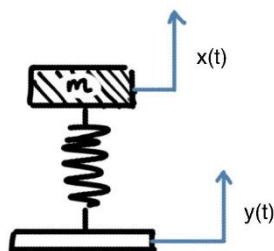
For å forstå hvordan man kommer frem til et sjokkresponspekter, skal vi først skape et bilde av hvordan man går fra et sjokk målt i akselerasjon som funksjon av tid, til en teoretisk respons som funksjon av naturlige frekvenser.

I figur 2.4 illustreres hvordan et SRS dannes. Se for deg en planke som det er montert flere oscillatorer på. Disse oscillatorene består av et dempeelement med en masse på. Hver oscillator har en unik naturlig frekvens. Når denne planken blir utsatt for et sjokk, tenk at vi utsetter den for et pådrag vi allerede har målt, vil samtlige oscillatorer respondere på sjokket ulikt, grunnet de unike egenfrekvensene. Det vi er interessert i fra svingningene er den maksimale akselerasjonen man kan finne i svingebevegelsen. Denne maksimale akselerasjonen kalles *maximax* i en SRS-analyse. Maximax plottes inn i en graf som en funksjon av de tenkte oscillatorene på planken, og man ender opp med et SRS (Andreassen, 2020, s. 8-17).



Figur 2.4 – Illustrasjon av hvordan et sjokkresponspekter dannes

Videre gås det inn på matematikken bak SRS, og vi begrenser oss til å se på en enkelt oscillator, se figur 2.5. Fremgangsmetoden for utregningen inneholder likheter i ulik faglitteratur, men her følges utregningene fra FFI sin rapport *Introduction to Shock-response Spectra* (Andreassen, 2020, s. 9-17).



**Figur 2.5** – Illustrasjon av et oscillerende system, eller fjærsystem.

Figur 2.5 viser til et SDOF-system med dempet tvungen svingning. Platen oscillatoren står på blir satt i bevegelse av akselerasjonen  $\ddot{y}(t)$ , og posisjonen er gitt av  $y(t)$ . Posisjonen til massen  $m$  er gitt av  $x(t)$ . Differansen mellom de to er  $u(t) = x(t) - y(t)$ .

Ligningen for bevegelse av massen er gitt ved

$$m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{y}) + k(x - y) = 0.$$

Legger man til dempeforholdet  $\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}}$ , samt den naturlige vinkelfrekvensen til fjærsystemet

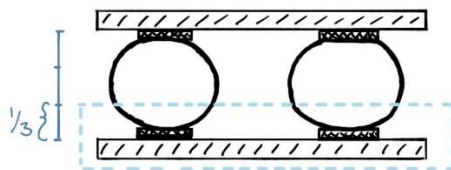
$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ , får vi likningen for et SDOF system med dempet tvungen svingning

$$\ddot{u} + 2\zeta\omega_n\dot{u} + \omega_n^2 u = -\ddot{y}.$$

Ut ifra dette får man likningen for responsen (se (Andreassen, 2020, s. 12) for detaljert utregning)

$$\ddot{x} = -2\zeta\omega_n\dot{u} - \omega_n^2 u.$$

Både  $u$  og  $x$  representerer responsen til sjokket, og vi ser at  $\ddot{x}(t)$  er avhengig av den naturlige vinkelfrekvensen til fjærsystemet  $\omega_n$ , samt dempeforholdet  $\zeta$ . Disse faktorene er igjen avhengig av det spesifikke systemet. I figur 6 illustreres fjærsystemet brukt i forsøkene. Som nevnt er responsen til et slikt system avhengig av dets masse  $m$ , fjærstivhet  $k$  og dempeforhold  $\zeta$ .



**Figur 2.6.** Fjærssystemet til forsøkene (det som er markert med en stiplet linje). Legg merke til at en tredjedel av sjokkdemperne er tatt med.

Siden systemet brukt i forsøkene inneholder dempeforholdet  $\zeta$ , vil vinkelfrekvensen endres:

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}. \text{ Dermed blir den korresponderende egenfrekvensen til systemet } f = \frac{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}}{2\pi}.$$

Ved å regne ut akselerasjonen til responsen  $\ddot{x}_i(t)$  for en rekke med oscillatorer med unike egenfrekvenser  $f_i$ , er det mulig å finne frem til den absolutte maksimale akselerasjonen for hver responderende svingning, som er basen til SRS. Definisjonen til SRS blir da

$$A(f_i) = \max\{|\ddot{x}_i|\}, \quad \text{for hver } i = 0, 1, \dots, n.$$

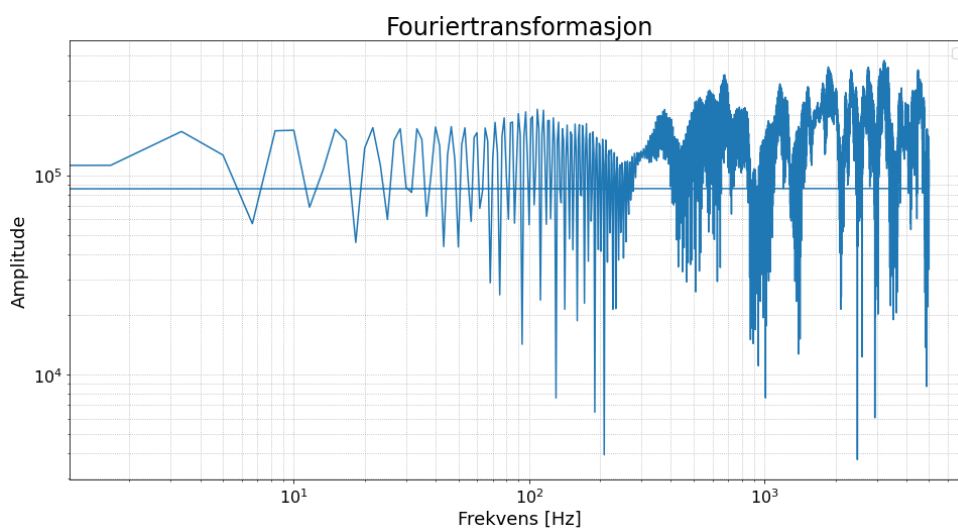
I tillegg til at et sjokkresponsspekter viser til maximax for en serie med egenfrekvenser, er det mulig å teoretisk fremstille maksimal fart og forflytning ut ifra akselerasjonen. På grunn av at farten og forflytningen hentes ut fra maximax, som er en teoretisk fremstilling av responsen, kalles disse vanligvis *pseudo-fart* og *pseudo-forflytning*. Pseudo-fart regnes ut fra likningen  $v_i = a_i / (2\pi f_i)$ , og pseudo-forflytning regnes ut fra  $d_i = a_i / (2\pi f_i)^2$ .

For å oppsummere har det blitt illustrert hvordan ulike oscillatorer responderer på et pådrag ut ifra sin egenfrekvens. Ved å se på responsen kan den maksimale akselerasjonen hentes ut fra hver oscillator og plasseres inn i en graf med maks akselerasjon som funksjon av egenfrekvenser, som er spekteret vi referer til i SRS. Til slutt kan maximax for hver oscillator brukes for å regne ut pseudo-fart og pseudo-forflytning slik at vi kan estimere maks fart og forflytning for fjærssystemet brukt i forsøkene.



## 2.2.1 Fouriertransformasjon

Ofte når en skal transformere et plott fra tidsdomenet til frekvensdomenet, er den naturlige fremgangsmetoden å benytte seg av en fouriertransformasjon. Siden denne oppgaven tar for seg måling av sjokk, vil ikke denne typen transformasjon være tilstrekkelig. Grunnen til dette kommer av at en fouriertransformasjon egnest seg best for periodiske og langvarige målinger, men ved test av sjokk vil målingene være ikke-periodiske og relativt korte (Andreassen, 2020, s. 22-23). I tillegg kan sampling av raske endringer over kort tid, resultere i signaler med kanter. Her blir det vanskelig å lese av frekvensen til signalet, da signaler med kanter inneholder flere frekvenser. Resultatet som oppstår ved bruk av fouriertransformasjon blir tungt påvirket av *sidelober* som kommer av at det er vanskelig å lese av frekvensen til inngangssignalet, se figur 2.7. Med sidelober refereres det til, i dette tilfellet, støy som gjør at man ikke får lest av hvilken frekvens signalet har.



**Figur 2.7** - Graf som viser fouriertransformasjon gjort på akselerasjonen til et vilkårlig forsøk. Legg merke til sidelobene som oppstår, og gjør at grafen ikke er lesbar.

## 2.3 Teori signalbehandling

Under kapittelet om teori rundt signalbehandling vil primært grunnleggende teori om sampling og analog-til-digital konvertering fremlegges. I tillegg vil det bli nevnt hvordan vi har regnet om akselerasjonsmålingene til fart og forflytning.

### 2.3.1 Sampling

Teorien om sampling omhandler samplingsteorem, under- og oversampling og aliasing.

#### 2.3.1.1 Samplingsteoremet

Å *sample* betyr å lese av en verdi fra et signal. Ofte gjøres dette i intervaller kalt en *samlingsperiode*, tiden det tar mellom hver sampling. Samplingsperioden er bestemt av *samlingsfrekvensen*  $f_s$ , antall samplinger per sekund og måles i Hertz, dermed er sammenhengen

$$\text{Samplingsfrekvens} = \frac{1}{\text{Samplingsperiode}}$$

(Van de Vegte, J. (2001), s. 30).

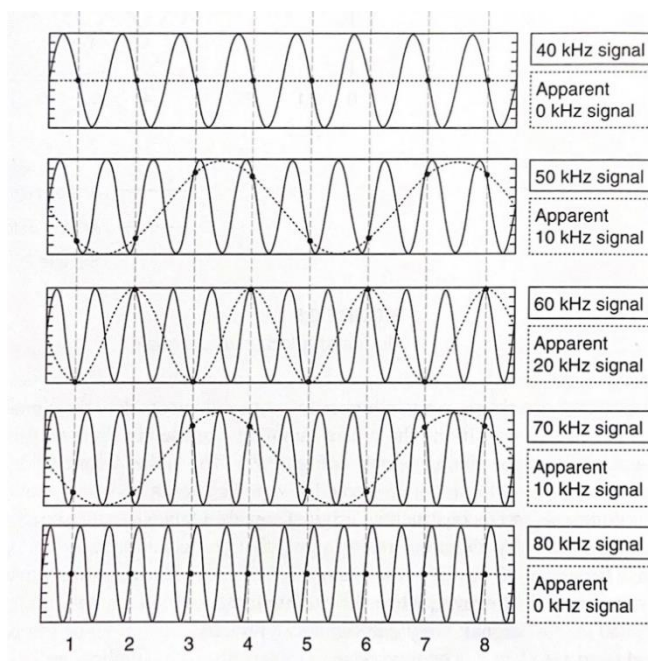
Samplingsteoremet går ut på at for å, så presist som mulig, gjenskape et analogt signal må samlingsfrekvensen  $f_s$  være minst dobbelt så stor som den største frekvensen til det analoge signalet  $f_{a(\max)}$ . Dette er kjent som *Nyquist-frekvensen* (Nyquist frequency).

$$f_s > 2f_{a(\max)}$$

Den minste verdien  $f_s$  kan ha, kalles *Nyquist-raten* (Nyquist samle rate). Spekteret av frekvenser fra null og frem til Nyquist frekvensen kalles Nyquist-spekteret (Nyquist range) (Van de Vegte, J, 2001, s. 32).

### 2.3.1.2 Under- og oversampling

Dersom samplingsfrekvensen blir satt til å være under Nyquist-frekvensen, blir signalet *undersamlet*. Det kan medføre at når det samlede signalet skal gjenskapes vil signalet få en lavere frekvens enn originalt, og dermed ikke stemme overens, se figur 2.8.



**Figur 2.8** - Illustrasjon av hvordan en samplingsfrekvens på 40 kHz vil gjenskape signaler med lik eller høyere frekvens. Legg merke til at det gjenskapte signalet (stiplede linje) har en lavere frekvens enn inngangssignalet. Hentet fra (Van de Vegte, J. (2001), s. 34).

Ved å benytte seg av *oversampling*, sampling med frekvenser over Nyquist-raten, er det mulig å unngå dette.

### 2.3.1.3 Aliasing

En konsekvens av undersampling kan være at et *alias* oppstår. Da skjer det som blir illustrert i figur 2.8; I det gjenskapte signalet vil det forekomme et signal med lavere frekvens enn Nyquist-frekvensen, et alias, som poserer som en del av inngangssignalet. Alias-signalet forårsaker dermed forstyrrelser i utgangssignalet.

For å motvirke aliasing kan vi benytte oss av et lavpassfilter. Lavpassfilteret, eller antialiasing-filter, fjerner de analoge frekvensene over minimumsfrekvensen i samplingsspekteret. I tillegg vil det hjelpe å øke samplingsfrekvensen betraktelig, men ofte vil komponenter i måleutstyret begrense hvor mye det er mulig å øke frekvensen (Floyd T.L., 2015, s.699-700).

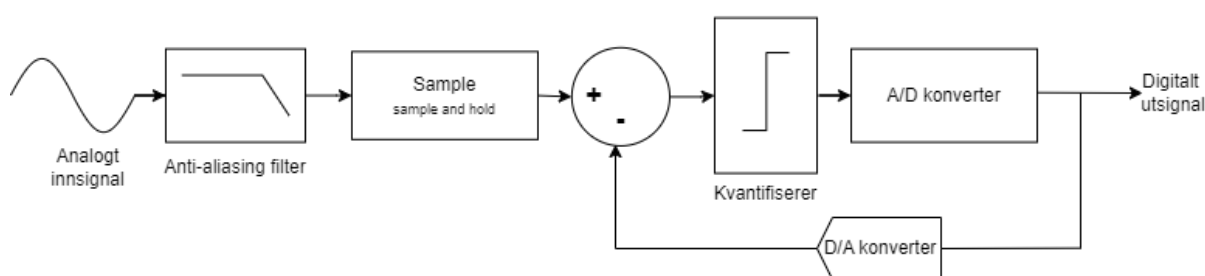
### 2.3.2 Analog-til-digital konvertering

Signalet som sendes fra akselerometrene er analoge verdier, og består av et kontinuerlig signal. For å få prosessert signalet og brukt det videre i analysen må signalet deles opp ved sampling og *kvantisering*, samt konverteres til digitale verdier. Kvantisering går ut på å dele opp kontinuerlige verdier til diskrete verdier som representerer et øyeblikk.

Konverteringen fra analoge til digitale verdier gjøres i flere steg: første steg er å sample verdier fra sensorene. Neste steg består av to prosesser som pågår samtidig. For at analog-til-digital-omformerer skal rekke å behandle hver sampling, må hver verdi holdes stabil frem til neste verdi er avlest. Denne prosessen heter «sample and hold». Verdien må holdes stabil for at enheten skal rekke å kvantifisere hver verdi. En kvantifisert verdi representerer et øyeblikk, i motsetning til kontinuerlige verdier. I siste steg blir de kvantifiserte verdiene avrundet og omdannet til binærkode. Nøyaktigheten til avrundingen avhenger av oppløsningen til analog-til-digital-omformerer (Hanssen, 2015, s.64-66; Van de Vegte, 2001, s.7-9, 51-52).

### 2.3.2.1 Sigma-delta-modulasjon

Når man skal konvertere et analogt signal til et digitalt signal er det flere fremgangsmetoder som kan benyttes. I denne oppgaven bruker analog-til-digital-omformer en Sigma-delta-modulasjon. Metoden baserer seg på oversampling og *feedback* (tilbakekobling). Under hver kvantisering av et sample vil det forekomme feil under avrundingen, kjent som kvantiseringsstøy (Floyd T.L, 2015, ss.711-712). For å minimere denne støyen justeres kvantiseringen kontinuerlig i henhold til forskjellen mellom det analoge inngangssignalet og den digitale representasjonen, se figur 2.9.



**Figur 2.9** - Forenklet illustrasjon av hvordan Sigma-delta-modulasjonen fungerer i en analog-til-digital-omformer.

### 2.3.3 Utregning i Python

I tillegg til at utregningene gjort under 2.2 *Sjokkresponspekter – Intro* er lagt inn i et skript i Python, se vedlegg D – *Pythonskript*, har det blitt lagt til utregning for integrasjon og interpolering.

For å få fremstilt målingene som fart og forflytning som funksjon av tid, i tillegg til akselerasjonen, benyttes det utregning og plotting i Python. Igjen følger vi utregningene til rapporten til FFI, *Introduction to Shock-response Spectra* (Andreassen, 2020, s.16-17).

For å regne ut fart  $v$  og forflytning  $d$ , bruker vi numerisk integrasjon av likningen for dempet tvungen svingning

$$\ddot{u} + 2\zeta \omega_n \dot{u} + \omega_n^2 u = -\ddot{y}$$

Ved å dele opp likningen i to førsteordens differensiallikninger, samt introdusere  $\xi = \dot{u}$  får vi

$$\begin{pmatrix} \dot{\xi} \\ \dot{u} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2\zeta \omega_n & -\omega_n^2 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi \\ u \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\ddot{y} \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Likningen løses med initialbetingelsen

$$\begin{pmatrix} \xi \\ u \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Løsningen gir farten  $\dot{u}$  og forflytningen  $u$  som funksjon av tid.

Før akselerasjonsmålingene integreres, går de gjennom en interpolering, for å passe på at det er nok punkter å regne gjennom i den numeriske integreringen.

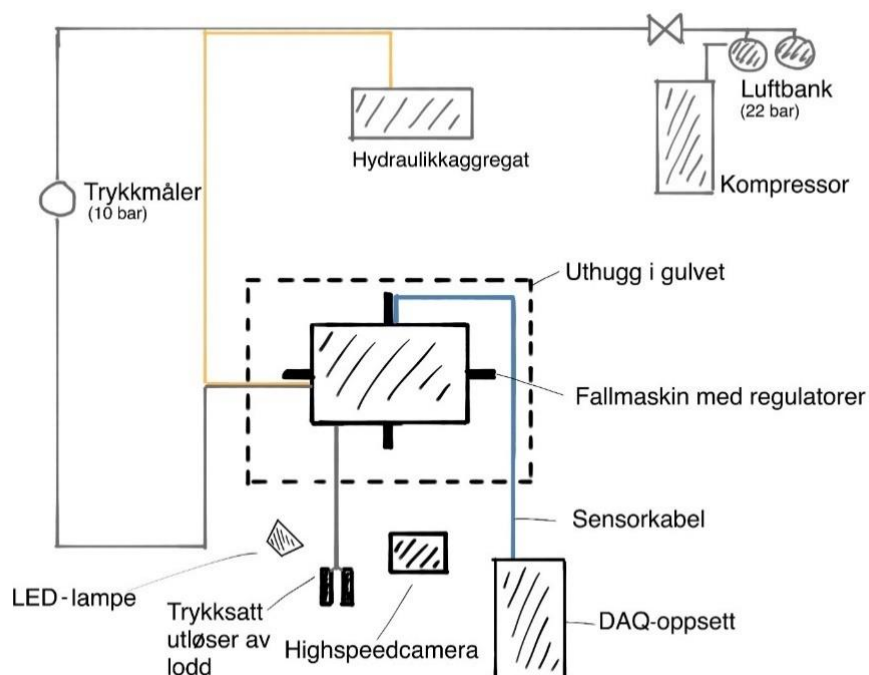
Dette er den grunnleggende teorien som anvendes for å få akselerasjon-tid-grafene over til fart og forflytning opp mot tiden.

### 3 Forskningsdesign og oppsett

Det overordnede oppsettet vil først legges frem, etterfulgt av en ytterligere forklaring på hver enkeltkomponent som er vesentlig for oppgaven.

#### 3.1 Oppsett

For å få oversikt over hvilke komponenter som brukes inne på maskinverkstedet hvor fallmaskinen står, er det blitt tegnet en skisse som viser hvor alt står i forhold til hverandre. Se figur 3.1. På skissen ser man ikke enkeltkomponentene innenfor datainnsamlingssystemet (DAQ), men DAQ-oppsettet er heller tegnet inn som en helhet. Denne skissen er kun lagt til for å bidra til en helhetsforståelse. Det betyr at selv om det er tegnet inn en kompressor og et hydraulikkaggregat, vil ikke disse utdypes ytterligere.



*Figur 3.1 - Oversikt oppsett på maskinverksted.*

Figur 3.1 er et oversiktsbilde i fugleperspektiv inne på maskinverkstedet. Fallmaskinen med regulatorer står i midten, hvor beina ut til siden er det vi har valgt å kalle regulatorer. Disse er med på å regulere stativet til støttepartiet til loddet, men er ikke blitt anvendt i noen særlig grad under våre beregninger. Videre representerer den stiplede linjen et uthugg i gulvet inne på maskinverkstedet. Dette uthugget er et forsterkende fundament som har til hensikt å skåne alle de andre komponentene i verkstedet, grunnet de store kreftene som er i sving. Alle våre komponenter har vært stasjonert på utsiden av dette uthugget for ikke å bli påvirket av sjokket gjennom gulvet.

Videre er de nedteipede sensorkablene tegnet inn med blått for å vise at alle sensorene ble plassert fra baksiden av fallmaskinen for ikke å komme i veien for høyhastighetskameraet. Disse går da videre inn til DAQ-oppsettet. Høyhastighetskameraet peker inn mot hvor på fallmaskinen det er blitt filmet; nesten på midten, men ikke helt fordi en av regulatorene er i veien. På venstresiden av kameraet er både LED-lampen plassert, som lyser opp det relevante området med likestrømmet lys, samt den lufttrykksatte utløseren som slipper loddet.

Øverst til høyre står kompressoren som sørger for at systemet har lufttrykk, i tillegg til luftbankene som holder 22 bar. Den grå linjen fra luftbankene, gjennom ventilen og til trykkmåleren på 10 bar, fører til oversiden på fallmaskinen hvor trykkluften fordeles til de forskjellige komponentene hvor den trengs. Den gule linjen mellom hydraulikkaggregatet og fallmaskinen er hvor hydraulikken går. Dette brukes for å heve og senke loddet.



*Figur 3.2 - Oppsett sjokkdempere.*



Sjokkdemperne og sensorene henger under en aluminiumsplate under loddet, slik som vist på figur 3.2. Bildet er tatt fra samme side av fallmaskinen som høyhastighetskameraet peker. For å sammenlikne med figurene i 2.1 – *Grunnleggende teori*, er den nederste stålplaten på figur 3.2 den samme platen som er markert med  $m_1$ . Platen markert med  $m_2$  er aluminiumsplaten vi ser i figur 3.2, mens loddet man kan se i grønt helt øverst er den samme som er markert med  $m_3$ . Stålplaten som er festet mellom sjokkdemperne og aluminiumsplaten har ikke noen annen hensikt enn å gjøre innfestningen mulig og vil derfor bli neglisjert i videre utregning.

## 3.2 Enkeltkomponenter

Enkeltkomponentene som er ansett som viktig i forsøket vil bli lagt frem i dette kapittelet. Det gjelder fallmaskinen, sjokkdemperne, sensor-innfestningene, datainnsamlingssystemet og høyhastighetskameraet.

### 3.2.1 Sjøkrigsskolens Fallmaskin

Sjøkrigsskolens fallmaskin, figur 3.3, er et apparat som ble designet og bygget på slutten av 60-tallet av DnV (Det Norske Veritas) og SFK (Sjøforsvarets forsyningskommando). Dette sivil-militære samarbeidet resulterte i en fallmaskin som ble forflyttet til Sjøkrigsskolen på 80-tallet. Tross forsøk på å kontakte DNV og relevante kontaktpersoner som kunne vite noe, har vi ikke lyktes med å finne noen konkrete papirer på fallmaskinen og dens opprinnelige konstruksjonsgrunnlag og brukerinstruks. Derfor forholder gruppen seg til den lokale kunnskapen om apparatet via skolens lærere og instruktører, da i hovedsak Gisle Strand.



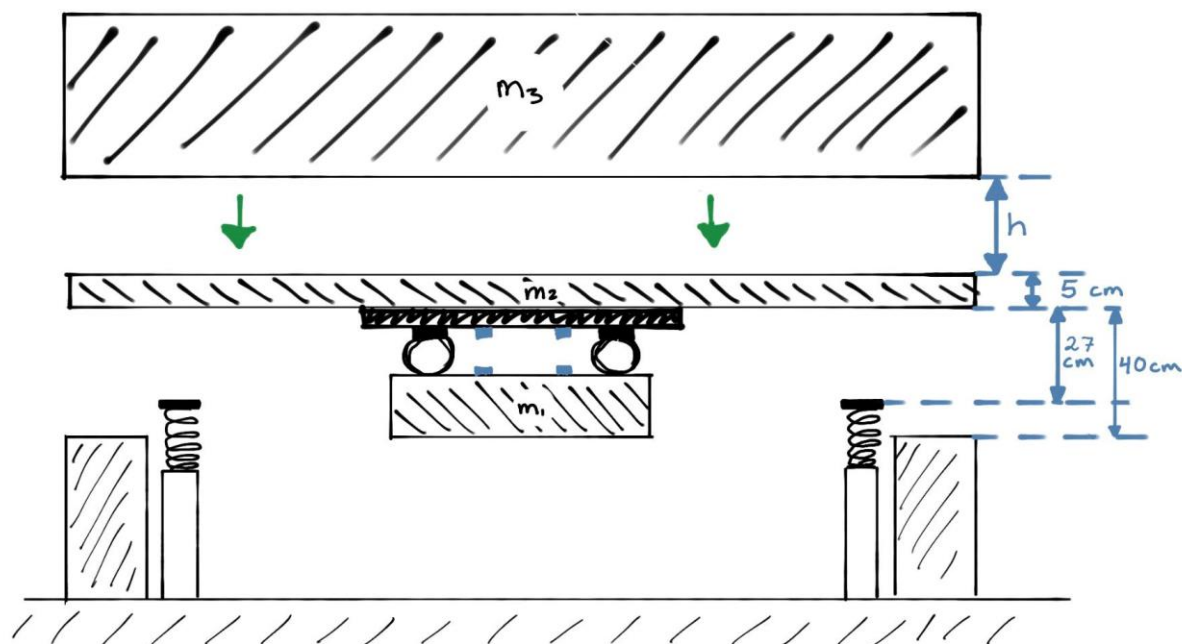
*Figur 3.3 - Fallmaskinen på Sjøkrigsskolen i nedre posisjon.*

Fallmaskinen er designet slik at et lodd heises opp og slippes ned på en aluminiumsplate, hvor diverse utstyr kan festes på undersiden. Platen simulerer en hudplate på et skrog. Den faller ned omtrent 0,4 m, til to bremsedempere, som simulerer dempingen vannet utøver på et tenkt skrog.

Loddet på seks tonn heises opp ved hjelp av et hydraulisk drevet stempel. Loddet er festet til sylindere ved en pneumatisk drevet lås og stempelet er festet til en bjelke i taket til verkstedet. Stempelets posisjon bestemmer slipp høyden til loddet. Aluminiumsplaten loddet skal falle ned på blir løftet opp sammen med loddet. Når man har nådd den faste

høyden aluminiumsplatene skal stå i, har fallmaskinen fire fester, eller klaffer, som skal holde platen oppe. Disse fire klaffene vipres inn manuelt med et stålrør. Når disse er inne, løsner man platen fra loddet. Dette gjøres ved hjelp av trykkluft hvor en mekanisme inne i loddet slipper en krone montert på oversiden av aluminiumsplatene. Platen er da separert fra loddet og hviler på de fire klaffene. Disse tåler kun vekten av aluminiumsplatene og det utstyret som er montert under platen. Loddet heises videre til ønsket slipp høyde. For å gjennomføre et fall med loddet holdes to knapper inne samtidig og ved hjelp av trykkluft åpnes låsemekanismen mellom løftesylinger og loddet. Dermed faller loddet ned og treffer aluminiumsplatene. Klaff-innfestningen gir så etter grunnet loddets vekt. Platen, med lodd, faller dermed videre ned og treffer de to bremsedempere som demper fallet. Platen og loddet blir så stanset av anlegget på de fire støttebeina. Utstyret som er montert under aluminiumsplatene vil dermed gi sin respons på impulslasten gitt av loddet og dempingen gitt av bremsedempere.

Relevante dimensjoner på fallmaskinen er avstanden mellom støttebeina og aluminiumsplatene, avstanden mellom øvre posisjon på bremsedempere og aluminiumsplatene, samt den regulerende høyden mellom loddet og aluminiumsplatene. Her er det snakk om når aluminiumsplatene er festet i sin faste posisjon med de fire klaffene som holder den oppe. Dimensjonene er tegnet inn i figur 3.4.



Figur 3.4 - Sentrale dimensjoner fallmaskin.

I tillegg veier loddet som slippes ned, på figur 3.4 merket som  $m_3$ , omtrent seks tonn. Aluminiumsplatens, på figur 4 merket som  $m_2$ , er anslått til å veie omtrent 200 kg basert på platens dimensjoner og aluminiums tetthet på  $2,7 \text{ g/cm}^3$ . Stålplaten som er montert under sjokkdemperne er veid til 35,6 kg, på figur markert som  $m_1$ .

### 3.2.1.1 Bremsedempere

Det er å anta at de hydrauliske bremsedempere skal simulere vannets treghet rundt et skrog ifm. et undervannssjokk. Det er ikke funnet noen data på disse, men det er, mest sannsynlig, kombinerte fjær- og stempeldempere, som vist på figur 3.5. Merk at demperen vist i figur 3.5, ikke er nøyaktig den demperen som er installert på fallmaskinen, men ut fra det lille vi vet om den, kan man anta at dette er omtrent oppbygning til demperen. Bildet er hentet fra TSI Solutions sin nettside, og demperen er av typen *ACE Controls*, slik det står på demperen som er montert på fallmaskinen.

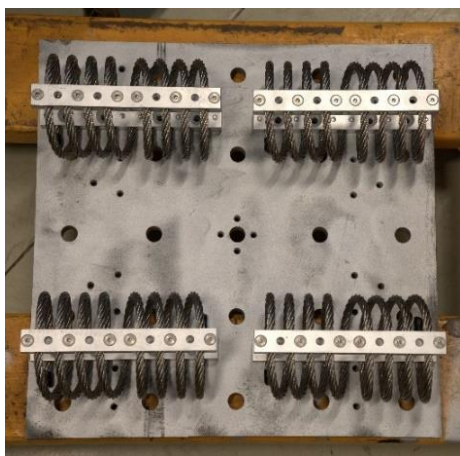


Figur 3.5 - Utklipp fra TSI Solutions sin nettside av en demper som antas å være av samme type (TSI Solutions, 2023)

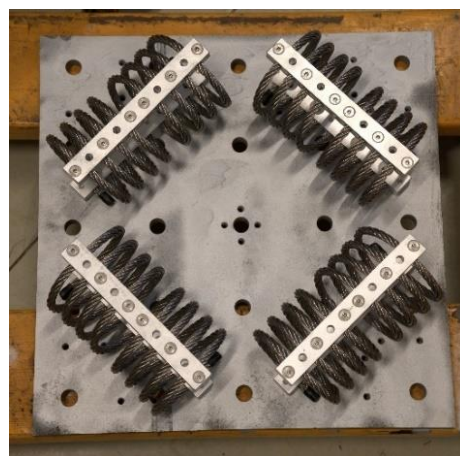
Det som er interessant med bremsedemperne i forbindelse med fallmaskinen er hvor stor kraft de utgjør i dempingen av loddet. I og med at disse ble installert for å simulere tettheten til vann, kan man anta at bremsedemperne påvirker proporsjonalt med at sjøvannets tetthet er ca.  $1026 \text{ kg/m}^3$ . Dette anvendes for øvrig ikke i videre beregninger og blir heller aldri sjekket ut i forbindelse med testing av bremsedemperne.

### 3.2.1.2 Innfestningsplater

En del av fallmaskinen er opphenget under aluminiumsplaten hvor sensorene og sjokkdemperne skal festes. Ut fra behovet til lærerne som skal bruke dette utstyret i undervisningen i etterkant av oppgaven, samt hva som er målet å få testet i oppgaven, ble utformingen på innfestningen fastsatt. Innfestningen er designet av Frode Wikne som er ansatt på Sjøkrigsskolen. Tegningene ble sendt til Ubåtbunkeren Bruno og produsert der. Stålplaten er designet slik at man kan feste selve platen både horisontalt og vertikalt for å kunne gjøre målinger både i aksialretning og i radiell/skjærretning. I tillegg er det lagt opp til flere festemetoder for sjokkdemperne til selve stålplaten, i den hensikt å se etter forskjeller på parallell og vinklet montering. Se figur 3.7 og 3.6. Det er laget et design på hvordan man skal feste innfestningen vertikalt også, men dette er ikke blitt produsert enda, grunnet tidsbegrensinger. Planlagt innfestning omtales ytterligere i kapittel 6.1.1 – *Planlagt oppsett*.



**Figur 3.7** - Sjokkdempere lagt rett (ikke fastmontert).



**Figur 3.6** - Dempere lagt skrått (ikke fastmontert).

### 3.2.1.3 Fallmaskinens tilstand

Fallmaskinens tilstand er relativt god. Fra 2021 ble det byttet flere slanger og pakninger. Mekanismene, særlig mekanismen som skal låse aluminiumsplaten og loddet sammen, er preget av at dette er en gammel maskin som har rustet noe. Med flere forsøk fikk vi låsemekanismen til å fungere, men det er nok noe som burde bli sett på om fallmaskinen skal brukes i undervisning fremover.

Låsemekanismen er avhengig av trykkluft. Dette trykket må holde minst ti bar og den tilhørende kompressoren starter av seg selv og øker trykket etter hvert som trykkluften forbrukes. Flere av ventilene i trykkluft-systemet lekker, som gjør at kompressoren må jobbe mye. Dermed stenges ventilene mellom hvert forsøk for å minke lekkasjene. Dette er ikke kritisk og ble ikke prioritert å fikse under våre gjennomføringer, men anbefales heller å bytte i fremtiden.

Sikkerhetsmekanismen som skal sørge for at loddet ikke kan slippes på aluminiumsplaten når låsen er inne, som også er avhengig av trykkluft, er ikke-fungerende. Hensikten med denne sikringen er dermed at man ikke skal knuse låsemekanismen som skal feste aluminiumsplaten til loddet for å løfte platen. Løsningen for oss ble å sløyfe sikringen og heller være nøye på å sjekke at låsen er oppe før loddet slippes ned. Dette er også blitt en del av vår «operational risk management» (ORM) som man kan undersøke nærmere i vedlegg A - *ORM Fallmaskin*.

### 3.2.2 Sjokkdempere

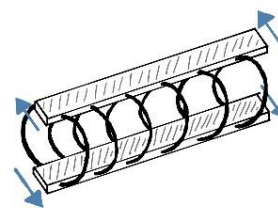
Av dempere finnes det både vibrasjonsdempere, som er mye brukt sivilt, og sjokkdempere. Gjennom krigføring i Irak på tidlig 2000-tallet, kom viktigheten av sjokkdemping tydelig frem. De amerikanske kjøretøyene var rustet med gode sjokkdempere, samt gjennomtenkt utforming på kjøretøyet generelt. Dette sørget for at da en IED (improvised explosive device) detonerte rett under en «hardened MRAP» (mine resistant ambush protected), ble både motor og alle viktige komponenter i kjøretøyet ødelagt, men personellet overlevde uten store skader. I et marinefartøy er det mange komponenter som er kritiske for fartøyet funksjoner. De trenger god beskyttelse mot sjokkbelastninger (G.Strand, personlig kommunikasjon, august 2023). Utfra hvilken type sjokk man er ute etter å sikre seg mot, må man velge riktig type sjokkdempere.

Det finnes mange forskjellige typer sjokkdempere. Eksempelvis har man gummidempere med og uten innvendig fjær, vaier-dempere, hydrauliske dempere, avstemte dempere, osv. (Andreassen, 2022, s.6). De vanligste sjokkdempere i det norske Sjøforsvaret er gummidempere og vaier-dempere. Derfor har Sjøkrigsskolen gått til anskaffelse av vaier-dempere.

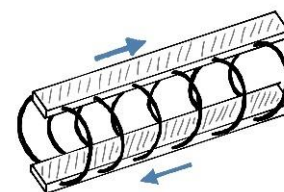
Konseptet med vaier-dempere er at motstanden i hver vaier og friksjonen mellom de tvinnede vaierne skal gi etter for bevegelser i flere retninger avhengig av hvor stiv vaieren er, diameteren på vaieren og antall tvinninger. For stive dempere i forhold til vekten de skal dempe for, vil ikke gi myke nok bevegelser og sjokket kan skade komponenten allikevel. Dempere som ikke er stive nok vil ha større defleksjoner enn ønskelig. Resultatet kan være at en komponent beveger seg inn i andre komponenter eller i skipets struktur. Det er også et poeng at selv om demperne demper for sjokk i flere retninger, er de mer robuste for sjokk i enkelte retninger enn andre. Dette kommer tydeligere frem ved å se på de spesifikke demperne som anvendes i forsøket, som er illustrert i figur 3.8, 9 og 10.

Selv om testgjennomføringene i oppgaven gjennomføres som et en-akset forløp, såkalt singel degree of freedom (SDOF), er disse demperne egnet for en flerakset belastningssituasjon. Også kalt multiakset isolert. Sjokkdempere er i stand til å dempe for bevegelser i flere retninger. I et program, som er gitt ut av leverandøren på demperne (Willbrandt Gummitchnik, 2014), fremlegges det hvordan defleksjon, energi og stivhet for de forskjellige demper-typene påvirkes i radiell retning type I, radiell retning type II og aksial retning. Dette er fremstilt i figur 3.8, 3.9 og 3.10. Demperne er laget for å tåle bevegelse i alle retninger, men disse tre er retningene man tar utgangspunkt i ved utregninger generelt.

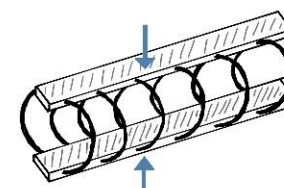
Under testgjennomføringene er det den aksiale retningen som skal testes, hvor det regnes på SDOF i tillegg til at akselerometrene måler i én akse. Det betyr ikke at bevegelsen kun vil skje i aksial retning under testgjennomføringene, men at når teoretiske beregninger



**Figur 3.8** - Dempere påvirkes i retning radiell type II



**Figur 3.9** - Dempere påvirkes i retning radiell type I



**Figur 3.10** - Dempere påvirkes i retning aksial

gjennomføres tas det utgangspunkt i verdiene som er oppgitt for den aksielle retningen. I et reelt forsøk vil det alltid være faktorer som gjør at man får bevegelse i flere retninger.

For å finne ut hva sjokkdemperne faktisk tåler, altså hvor stor høyde loddet kan slippes fra, må man ta utgangspunkt i dra-retningen til demperne. Det er fordi demperne tåler mindre i dra-retning enn i kompresjonsretning, i det aksiale planet. I tillegg er oppsettet på fallmaskinen slik at loddet som skal dempes for, henger under demperne og kraften kommer ovenfra. Da vil den, mest sannsynlig, største bevegelsen skje i dra-retning på demperne.

Bruker man det tildelte programmet fra leverandøren av sjokkdemperne kan man lese av hva som er maks defleksjon og hvilken energi dette tilsvarer for akkurat denne typen dempere. I figur 3.11, ved axial og under deflection, kan man lese av

	Stiffn@0 - Damp.-Koeff. - dyn.-Factor. - deflection			
	[kN/mm]			min - max [mm] - [mm]
rad I	0.028	0.13	0.00	-55.00 55.00
rad II	0.026	0.13	0.00	-55.00 55.00
axial	0.067	0.13	0.00	-55.00 45.00

*Figur 3.11 - Oversikt kompresjonsretninger demper (Willbrandt, 2014)*

«min –55 mm» og «max 45 mm». Det betyr at demperen er beregnet for å tåle en maksimal forflytning på 55 mm i kompresjonsretning og 45 mm i dra-retning. Verdiene i figuren gjelder for én demper. Beregninger rundt dempernes kapasitet vil vi komme tilbake til i kapittel 5.5.1 *Høyde på loddet og energioverføring.*

Blir det for stor belastning på sjokkdemperne, gjerne som belastning over tid, vil det gjøre at demperne slites. Ved demping av sjokk dannes det varme i vaierne, og dette kan bli for varmt ved høy belastning. Dette kan man tydelig se på gamle dempere hvor det ser ut til at enkeltvaiere i tvinningene har blitt brutt og fått perler på seg. Se figur 3.12. Her er det blitt så varmt at metallet har smeltet, blitt brutt av og dermed er det blitt dannet en sveise-perle. Denne demperen klarer

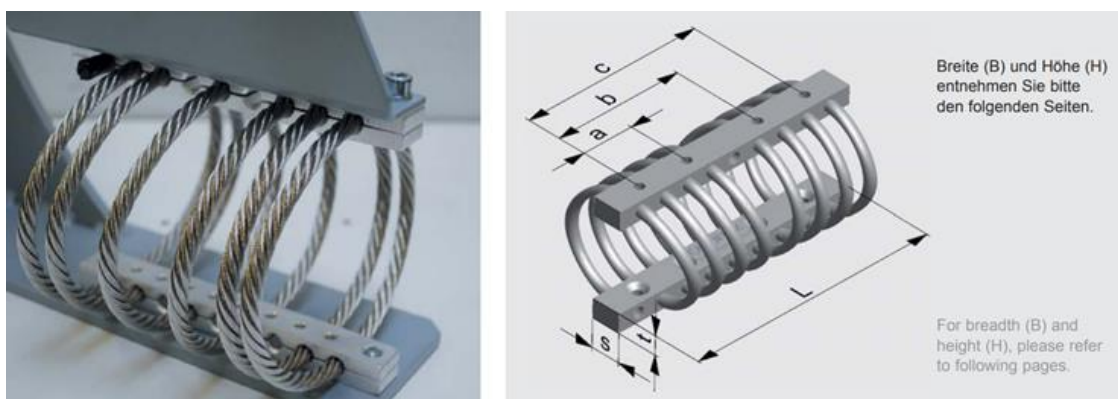


*Figur 3.12 - Gamle og slitte dempere tilhørende Sjøkrigsskolen.*



dermed ikke å dempe for den belastningen den tidligere var i stand til, og i utgangspunktet beregnet til.

Sjokkdemperne som anvendes er av typen Cavoflex *H95-216-90-125-8 FF* fra Willbrandt. Data på demperne kommer rett fra leverandør og det er ikke mye å finne om demperne på internett. I figur 3.13 fremstilles en oversikt over dimensjoner på noen av demperne leverandøren har. Linjen markert med gul viser dimensjonene for demperne som brukes i oppgaven.



Abmessungen / dimensions

Typ type	Senkung counter bore F	Barren / bars Gewinde counter bore M	Bohrung through hole D	Abmessungen / dimensions						Windungen loops
				L [mm]	a [mm]	b [mm]	c [mm]	s [mm]	≈ t [mm]	
H 15	DIN74-F4	M4	4,3	80	-	-	68,4	10,0	5	2 - 10
H 24	DIN74-F5	M5	5,3	112	-	-	100,2	12,5	6	2 - 10
H 30	DIN74-F6	M6	6,4	127	-	-	114,3	14,0	8	2 - 10
H 35	DIN74-F6	M6	6,4	127	-	-	114,3	14,0	8	2 - 10
H 48	DIN74-F6	M6	6,4	127	-	-	114,3	15,0	11	2 - 10
H 63	DIN74-F6	M6	6,4	146	-	-	131,0	16,0	13	2 - 8
H 95	DIN74-F8	M8	8,4	216	44,5	111,3	155,8	25,0	16	2 - 8
H 125	DIN74-F8	M8	8,4	216	44,5	111,3	155,8	25,0	20	2 - 8

Figur 3.13 - Demper-dimensjoner fra leverandør (Willbrandt Gummitechnik (u.å.): s.14).

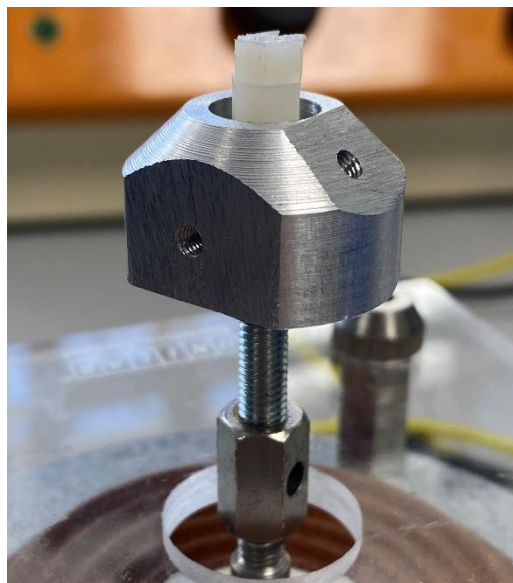
Disse dimensjonene er viktigst under planlegging av oppsettet til innfestningen på fallmaskinen. Skal sjokkdemperne byttes i fremtiden må enten dimensjonene på demperen være like, eller så man må lage en ny innfestning. Dette for å passe i gjengehullene som er laget. I figur 3.14 kan man se hvordan demperne som ble brukt, faktisk ser ut.



*Figur 3.14 - Demperen som anvendes i forsøkene.*

### 3.2.3 Sensor-innfestning

Det ble brukt forskjellige metoder for å feste sensorene til vibrasjonsmaskinen i oppstartfasen. Både en plastskrue med mulighet til å feste C53-sensoren, som er sensoren som måler pådraget, samt en større metallskrue som hadde tre festemuligheter. Utfordringen med innfestningene er dimensjonene på skruene til sensorene. Den svært smale dimensjonen på festet til sensorene gjør at man ikke kan bruke standardskruer for å feste dem. Dette gjelder særlig for sensoren av typen B11, som måler responsen. Grunnet dette, og ønsket om å gjennomføre målinger i flere retninger i oppstartfasen, ble modellen i figur 3.15 designet (laget av Frode Wikne, Sjøkrigsskolen).



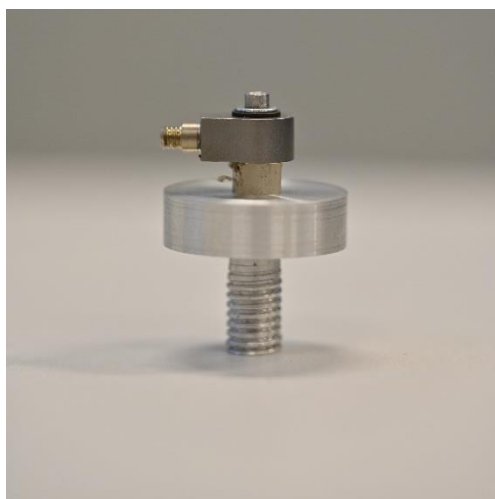
*Figur 3.15 - Innfestningsskrue til sensorene ved bruk av vibrasjonsmaskinen i oppstartfasen.*

Innfestningen som er illustrert i figur 3.15 har tre feste-muligheter. Én i bevegelsesretningen til vibreringsmaskinen, én 45 grader på bevegelsesretningen, og én 90 grader på bevegelsesretningen. Hensikten med å teste i tre forskjellige retninger er å se hvordan sensorene, som kun skal måle i én akse, reagerer på dette. Teoretisk sett skal sensorene ikke få utslag når de er festet på 90 grader, og få 70 % utslag ved 45 grader.

Dette er relevant i tilvenningsfasen for å bli kjent med sensorene og hva de responderer på.

For B11, som har mindre gjengestørrelse på festet, kreves det en ekstra overgang for å kunne bruke de samme hullene i skruen. Dette ble løst gjennom å lage en plastikkstrue med gjenger som passet til skruen med tre festemuligheter.

Den samme plastskruen ble brukt som overgang til sensorinnfestningene som ble festet på fallmaskinen. Disse festene er designet til å passe utvalgte steder på stålplaten. Dermed har man en viss mulighet til å variere på hvor man vil feste sensorene. På figur 3.16 og 3.17 ser man de innfestningsskruene som ble designet for å feste på stålplaten. Disse brukes på fallmaskinen, og er også produsert av Frode Wikne.



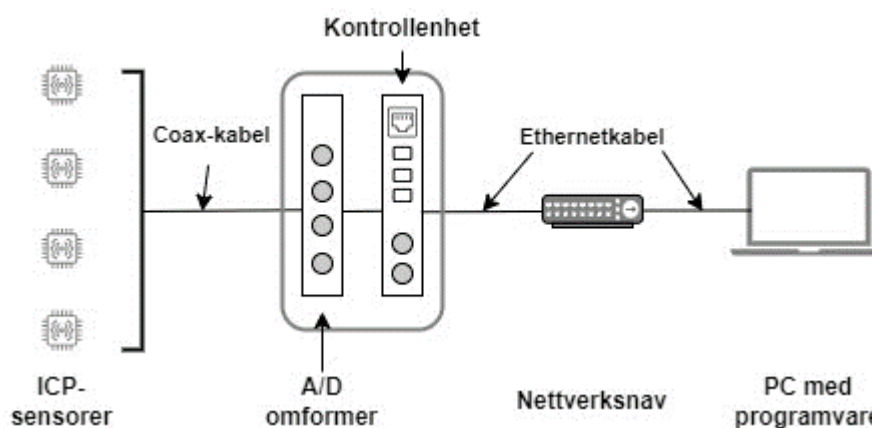
**Figur 3.16** - Sensorfeste uten kabel, til fallmaskinen.



**Figur 3.17** - Sensorfeste med plast-skrue uten kabel, til fallmaskinen

### 3.2.4 Datainnsamlingssystem

I oppgaven blir det brukt et *datainnsamlingssystem* (*Data acquisition system, DAQ*) for å måle, lese av og prosessere endring i akselerasjon. Systemet består i grove trekk av fem komponenter. Til å begynne med har vi fire akselerometre som i figur 3.18 er omtalt som ICP-sensorer. Sensorene er koblet til en analog-til-digital-omformer (A/D omformer) via *coax-kabler*, som er motstandsdyktige mot eventuell støy. I samme boks som omformerer, er det en kontrollerende maskinenhet som omtales som kontrollenhet. Boksen rundt de to symboliserer at disse kommuniserer. Til slutt går signalet til et *Nettverksnav*, som har til formål å få ulike enheter til å kommunisere ved å videresende signaler, og deretter til en PC med diverse programvarer som benyttes til logging, behandling og analyse av målingene.



Figur 3.18 - Forenklet illustrasjon av et datainnsamlingssystem.

#### 3.2.4.1 Akselerometer med forsterker

Utfordringen Rød og Svarstad (Rød og Svarstad, 2021) adresserte i deres bachelor var blant annet at de opplevde mye støy fra akselerometrene. Dette er blitt utbedret ved bruk av ICP-sensorer. ICP står for «Integrated Circuit Piezoelectric» og betyr at akselerometeret har en innebygd forsterker.

Når akselerometeret utsettes for en akselerasjon eller kraft vil den pizelektriske krystallen frigjøre en ladning proporsjonal med akselerasjonen den utsettes for. Ladningen gir en strøm med høy impedans som lett kan påvirkes av støy i kabler og dermed forstyrre utgangssignalet. ICP-sensorer unngår dette ved å ha en innebygd

forsterker som konverterer ladningen om til et signal med lav impedans. Det gjør at man kan utnytte seg av lengre kabler, samt utsette kablene for tøffe omgivelser uten tap av signal (PCB Piezotronics, 2023).

Av ICP-sensorene benyttes to ulike modeller: 320C53 og 353B11, se figur 3.19 og 3.20.



**Figur 3.19** - 320C53 (Hentet fra PCB Piezotronics: <https://www.pcb.com/products?m=320c53> ) **Figur 3.20** - 353B11 (Hentet fra PCB Piezotronics: <https://www.pcb.com/products?m=353b11> )

Det som skiller de to modellene er følsomheten deres og hvor mange **g** de kan måle.

**Tabell 1** – Oversikt utvalgt data for akselerometrene. Herunder følsomhet, måleområdet og maksimal påkjenning. Data hentet fra (PCB Piezotronics, 2023, s.15)

Model	Følsomhet (Sensitivity)	Måleområde (Measurement Range)	Maksimal påkjenning (Overload limit (shock))
320C53	$\pm 20\% 0.102 \text{ mV}/(\text{m}/\text{s}^2)$	$\pm 5000 \text{ g pk}$	$\pm 10.000 \text{ g pk}$
353B11	$\pm 10\% 0.51 \text{ mV}/(\text{m}/\text{s}^2)$	$\pm 1000 \text{ g pk}$	$\pm 10.000 \text{ g pk}$

Det benyttes to ulike modeller fordi de skal måle ulike former for sjokk. C53-sensorene plasseres før sjokkdemperne og vil dermed måle pådraget til sjokket. B11-sensorene plasseres på stålplaten som henger under sjokkdemperne og vil dermed måle responsen, se figur 3.2. Sensorene måler kun i en akse, som vil påvirke signalet dersom de monteres skjevt.

### 3.2.4.2 Analog-til-digital-omformer

*Gantner XLA111* er en analog-til-digital-omformer som måler fysiske verdier fra sensorene, i dette tilfellet volt fra akselerometrene, og konverterer til digitale verdier. Målområdet er definert i volt, og er satt fra  $-10\text{ V}$  til  $+10\text{ V}$ .

Konversjonen til *Gantner XLA111* har en oppløsning på 24 bit– under digitaliseringen av de avleste verdiene vil hver diskrete verdi omgjøres til en binærkode på 24 bit (*Gantner Instruments, 2023, s.1*).

Kvantiseringsfeil til konversjonen kan regnes ut med denne formelen:

$$\text{Feil} = \frac{(y_{\max} - y_{\min})}{2(2^n - 1)}$$

(*Hanssen, 2015, s.68*).

Hvor  $n$  er antall bit, og  $y_{\max}$  og  $y_{\min}$  representerer målområdet til akselerometrene. Ved avrunding under konvertering fra analoge til digitale verdier, vil største feilen vi kan forvente være:

$$\frac{(10\text{V} - (-10\text{V}))}{2(2^{24} - 1)} = 0,596\ \mu\text{V}$$

I akselerasjon tilsvarende disse forskjellige verdiene for de ulike modellene, grunnet ulik følsomhet.

$$\text{Akselerasjon} = \frac{\text{målt mV}}{\text{sensorens følsomhet}}$$

For C53-sensorene vil feilen tilsvare omtrent  $5,84\text{ mm/s}^2$ , mens for B11-sensorene blir feilen omtrent  $1,17\text{ mm/s}^2$ . *Gantner XLA111* har dermed en god oppløsning som gir høy målenøyaktighet.

### 3.2.4.3 Kontrollerende maskinenhet

*Q.station X*, en kontrollenhet, får tilsendt det digitale signalet, som deretter prosesseres og lagres som datapakker. Datapakkene blir sendt til et nettverksnav via ethernetkabel, som deretter distribuerer pakkene videre til en PC, også via Ethernet, hvor datapakkene blir lagret.

#### 3.2.4.4 GI.bench

GI.bench er programvaremiljøet som benyttes i oppgaven for konfigurering av datainnsamling. Det er til dette programmet på PC-en datapakkene fra kontrollenheten sendes. I denne oppgaven bruker vi dette programmet for å starte og avslutte logging av målingene. Programmet er konfigurert av veileder, i samarbeid med Gantner Instruments, for logging i fire kanaler for å foreta måling fra akselerometrene (Gantner Instruments, 2023).

#### 3.2.4.5 LabVIEW

LabVIEW er et program som brukes for etterbehandling og grafisk fremstilling av data. Oppsettet ble konfigurert av veileder. Kort sagt blir filen opprettet av loggingen i GI.bench hentet frem, og fremstilt som en graf. Under fremstillingen av grafen er det mulig å «zoome» inn på områder av større interesse, for å så lagre dette i en ny «resultatfil». I samme program blir følsomheten til sensorene lagt inn for å få en riktig konvertering fra volt til akselerasjon. Eksakt kalibreringsdata ble tatt fra kalibreringssertifikatet som ble levert sammen med sensorene (PCB Piezotronics, 2023). Til slutt blir målingene manuelt nullpunktskalibrert, for å sikre at samtlige sensorer starter målingene så nærme nullinjen som mulig. Kalibreringen har blitt gjort med en  $\pm 3 \text{ m/s}^2$  nøyaktighet.

#### 3.2.4.6 Python

I oppgaven har programvaren Python blitt brukt til grafisk fremstilling av data, samt utregning av fart og forflytning til de ulike testgjennomføringene. Til slutt har programmet blitt brukt for å fremstille sjokkresponsspektre for de ulike responsmålingene. Skriptet som har blitt brukt er tilgjengelig i vedlegg D – *Pythonskript*, og har blitt utviklet med hjelp av Christophe Maurice Massacand, og tatt utgangspunkt i Matlabkoden fra FFI sin rapport *Introduction to Shock-response Spectra* (Andreassen, 2020, s.50-52).

### 3.2.5 Høyhastighetskamera

For å tilrettelegge for større forståelse rundt forsøkene som gjennomføres, samt tilføre mer data til analysen, ble et høyhastighetskamera tatt i bruk. Kameraet skulle bidra med å få økt forståelse for hvordan sjokket fra fallmaskinen utspiller seg. Dette ved at man kan gå gjennom opptakene og sammenlikne tidsforløpet fra videoen med måleverdiene fra akselerometrene.

For å minimere forstyrrelser fra fallmaskinen med tanke på vibrasjoner i gulvet som forplanter seg, må trefoten kamera står på, ikke plasseres innenfor det forsterkede fundamentet hvor fallmaskinen er plassert. Dette er illustrert i figur 8 under 3.1 – oppsett.

Kamera er av typen Photron Fastcam SA1.1, og kobles til en PC med ethernetkabel. Siden det er et eldre kamera, har det ikke innebygd vifte. Dermed er en vifte blitt montert på i etterkant. Denne må være på under opptak, da kameraet fort blir varm.

Kameraet opereres ved bruk av programmet Photron Fastcam Viewer (PFV). Etter at kamera er koblet opp mot egen PC vises et liveview av det kamera ser, og man kan enkelt justere ønsket blenderåpning og zoom på tilhørende objektiv. I programmet justeres oppløsningen (antall piksler) samt bps (bilder per sekund) til opptaket. Høyere bps, i tillegg til høy oppløsning, gir en mer nøyaktig fremvisning, men krever god lagringsplass. Vi begrenses dermed av kameraets interne minne på 700MB/s, som tilsvarer 5400 bps (bilder per sekund) og 1024x1024 piksler (Svarstad og Rød, 2021, s.12).

Under opptaket er fokuset på en merkelapp som er plassert på komponenter av interesse når det kommer til sjokkforløpet. I tillegg er det ønskelig med en god oppløsning, samt høy bildefrekvens for nøyaktighet, slik at opptaket blir best mulig. Ønskelige innstillinger krever en god lyskilde, da en høy bildefrekvens gjør at kameraet ikke «rekker» å hente inn mye lys. For at kamera skal kunne «se» merkelappene, og at man senere skal kunne følge de i tilhørende program, benyttes en kraftig LED-lampe for å belyse fallmaskinen. Kamera plasseres et par meter vekk fra belyst område. I tillegg legges det inn en 45 graders vinkel for å unngå gjenskin i merkelappene.

Etter et opptak er gjennomført, åpnes filen i Photron Fastcam Analyser (PFA). Her plasseres et track på ønskede merkelapper for å plote akselerasjon, hastighet og forflytning i egne grafer. Dette gir større sammenlikningsgrunnlag av akselerometrene opp mot høyhastighetskameraet.



## 4 Forsøksresultater

Her legges det frem forsøkets antakelser, hensyn og resultater. Antakelser er blitt gjort på forhånd og legges frem først. Hensyn som ble tatt baserer seg både på funn som er gjort i forkant på datalaben, og i oppstart-fasen på fallmaskinen. Under resultater legges det frem hvilke funn som er gjort, basert på det som var ønskelig å diskutere i analysen.

### 4.1 Antakelser

Her vil alle antakelser som er gjort i forkant av forsøkene og utregninger, bli listet opp punktvis. Det antas at:

- loddet er i fritt fall fra den utløses til bremsedemperne tar imot både aluminiumsplatene og loddet. Merk at dette er en forenkling, hvor luftmotstand og friksjon blir neglisjert.
- alle sjokkdemperne får lik belastning.
- bremsedemperne bremser likt hver gang. Dette er ikke testet og er heller ikke usannsynlig at ikke er helt rett da disse demperne er veldig gamle.
- all bevegelse skjer i fallretning, altså i z-aksen, og at det ikke er noen bevegelse til sidene, altså i x- og y-aksen. Dette vet vi at ikke stemmer da man på kamera ser noe bevegelse til sidene. Dette kan observeres i vedlegg G – *Video fra høyhastighetskamera*. For å danne et bilde av hvor mye dette faktisk har å si har vi plassert to sensorer på hver sin ytterkant av stålplaten som påvirkes av sjokkdemperne.
- konstruksjonen står helt i ro. Det betyr at der hvor en stålplate er skrudd fast til aluminiumsplatene, og der sjokkdemperne og innfestningen til sensorene er skrudd fast til stålplaten, antas det å ha ingen bevegelse gjennom fallet.

## 4.2 Hensyn

Her legges det fram funn som er gjort underveis hvor man har klart å kartlegge hva som må tas hensyn til under selve testgjennomføringene. Det vil legges frem feilkilder samt konkrete faktorer som har påvirket hvordan testingen har blitt gjennomført. Til å begynne med fremlegges hensyn som er rettet mot grafene i resultatet, punktvis.

### 4.2.1 Hensyn ved lesing av grafer

- Akselerometrene er festet slik at positiv retning er nedover. Dermed vil utslag i positiv y-retning i plottet tilsvare akselerasjon i fallretning.
- Under gjennomgangen av samtlige forsøk har det blitt synlig hvordan C53-sensoren bruker relativt lang tid på å «hente seg inn igjen», se figur 4.8, etter sammenstøtet med støttebeinene. Dermed forekommer det «følgefeil» i integreringen av akselerasjonen, og igjen farten, som kan gi upålitelige verdier i grafene.
- Samtlige plot er "kuttet" i LabVIEW slik at første akselerasjonsendring kommer ved  $t = 5$  ms.
- Tickene på tids-aksen har 5 ms mellomrom.
- Ved plotting av grafer i Python, vil siste plott ligge over forrige plot. Dermed vil det i noen grafer være vanskelig å se et plott, dersom et likt plot er plottet i etterkant. I hjørnet på hver graf, vil det være mulig å se hvilket plot som ble plottet sist (nederste i listen).
- Hver figur har sin egen overskrift. Her presenteres forsøksnummer for gjeldene slipp høyde, samt hvilken samplingsfrekvens som er brukt. I hver graf informeres det om hvilken sensor som representerer hvilken kurve. Sensor 2 er pådraget målt av C53-sensoren, mens sensor 3 og 4 er responsen målt av B11-sensorer.

### 4.2.2 Feilkilder

- Vaieren til sjokkdemperen kan komme borti innfestningsskruene til stålplaten under kompresjon av demperen. Dette kan påvirke målingene, samt skade sjokkdemperne slik at videre testgjennomføringer blir påvirket.
- Mulig elasticitet i plastikkskruer som B11-sensorene er festet til. Kan føre til støy.

- Loddet siger sakte nedover når man har løftet alt og er klar til å gjennomføre slipp av lodd. Dette er fordi hydraulikk-anlegget ikke klarer å holde loddet helt i ro. Dermed må man være nøye med å sjekke høyden på loddet rett før man gjennomfører testen.
- Loddet henger skjevt i forhold til aluminiumsplaten. Dette resulterer i at det er en ca. 5 mm differanse mellom to av hjørnene når man måler høyden fra aluminiumsplaten til loddet. På grunn av denne differansen, måles alle høyder fra hjørnet som er synlig på høyhastighetskameraet.
- Samplingsfrekvens er en vesentlig feilkilde. Dette vil bli forklart og diskutert under kapittel 5.3 – *Sensor og DAQ – styrker og begrensninger*.
- Festet på sensor C53 løsner noe enkelte ganger etter en gjennomføring. Det gjelder ikke til B11-sensorene.

### 4.2.3 Festemønster til sjokkdemperne

Sjokkdemperne som ble brukt var mer ovale enn først antatt, les bredere i sideretning. Dermed oppsto et problem da disse skulle festes til stålplatene. Hullene som skulle anvendes for å feste stålplaten i aluminiumsplaten var nærmere demperne enn først antatt. Dermed kunne vainerne på demperne komme borti skruehodene til denne innfestningen. Dette var kun et problem om man festet alle demperne parallelt og samtidig benyttet seg av gjengehullene i de ytterste kantene. Derfor ble det gjort en vurdering på at disse ytterste skruene ble fjernet. Da hadde man færre skruer til å holde konstruksjonen sammen, men det ble antatt at ni skruer var nok til å holde innfestningen på plass med de slippåydene vi hadde tenkt å benytte seg av.

Videre ble det gjort en vurdering på at det kun skulle foregå testgjennomføringer med sjokkdemperne festet parallelt, og ikke skråstilt som først planlagt. Grunnen til dette er at det krever en hel dag med montering og demontering for å få byttet dette og det ble dermed nedprioritert.

#### 4.2.4 Sensorer

I oppstartfasen av fallmaskinen ble det oppdaget at en av sensorene sine målinger ikke kunne stemme. Gjennom å feilsøke klarte man å utelukke kabelen mellom sensoren og inn-ut-modulen, samt A/D-modulen i seg selv. Det ble klart at det var den ene C53-sensoren det var noe galt med. Dette er en av sensorene som skulle måle pådraget. Her var det egentlig ønskelig å se om det var noen relevant forskjell på pådraget ut fra hvor på stålplaten man målte, gjennom å ha en sensor i hver ende på platen. Løsningen ble i stedet å sette den resterende sensoren midt i platen og behandle dette som et gjennomsnitt. Om det er en relevant forskjell på målingene utfra hvor på stålplaten man måler, kan være noe som testes i framtiden. Per nå anvendes kun en sensor for å måle pådraget, og to sensorer for å måle responsen. Sensorene som skal måle responsen er fremdeles plassert i hver sin ende av stålplaten for å kunne se om det er forskjell i målingene utfra plassering av sensorene.

### 4.3 Resultater

Her legges det frem de konkrete resultatene som er kommet frem under testgjennomføringene. Testene har tatt for seg tre forskjellige høyder; 50 mm, 30 mm og 10 mm, hvor det er målt både pådrag og respons. I tillegg har det blitt gjort tester fra 100 mm, hvor kun responsen har blitt målt. Dette fordi sensorene til pådraget ikke var i stand til å måle høyere enn dette og for å skape et bilde av hvor godt B11-sensorene egner seg til å måle pådraget for fallmaskinen. Samtlige høyder har en nøyaktighet på  $\pm 3$  mm. Grafene vi velger å ta for oss i resultatene inneholder poeng vi ønsker å diskutere i analysen. Dermed er det kun enkelte testgjennomføringer som presenteres i resultatene. Det er mulig å se samtlige resultater i vedlegg B - *Resultater*.

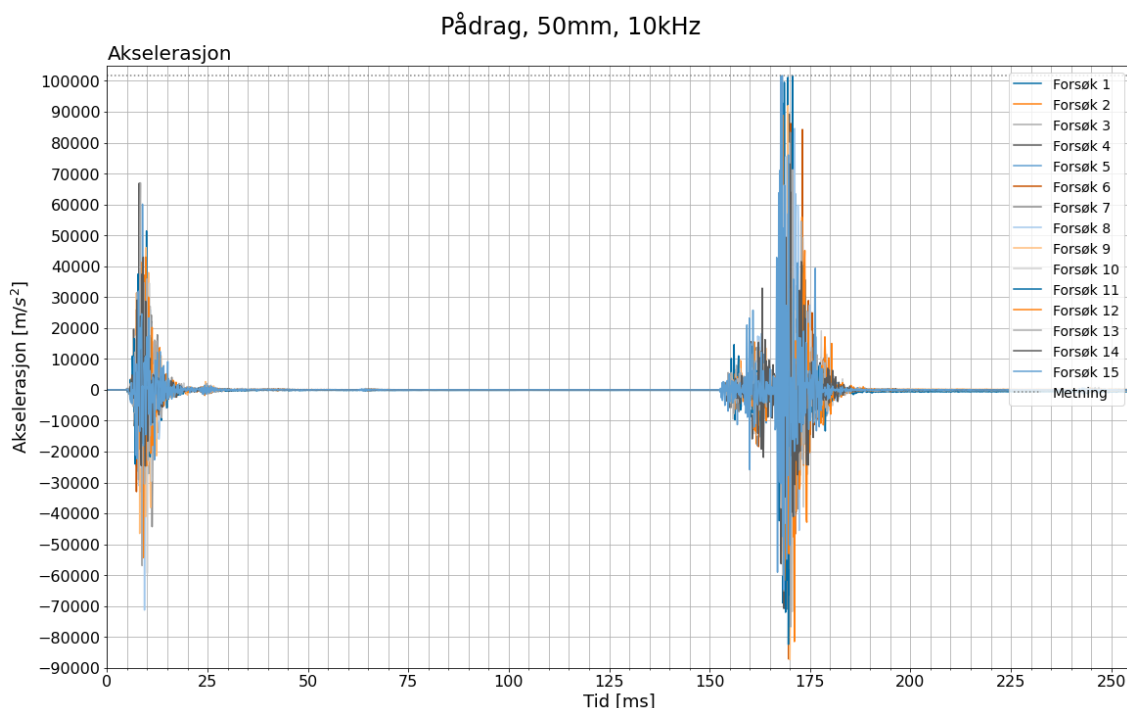
### 4.3.1 Fallmaskin – testgjennomføring 50 mm

Pådraget, samt responsen, for testgjennomføring med en sliphøyde på 50 mm vil i dette kapitlet presenteres og kommenteres.

#### 4.3.1.1 Pådrag

En sammenlikning av samtlige forsøk for gjeldende sliphøyde vil først bli presentert i dette underkapitlet, for å gi et overblikk over målingene. Deretter vil forsøk 12 fremlegges og relevante punkter vil trekkes frem.

##### 4.3.1.1.1 Samtlige forsøk



**Figur 4.1** - Samtlige målinger av pådrag med sliphøyde 50mm plottet. Høyeste akselerasjonsmåling er på  $102 \text{ km/s}^2$ , og laveste er på  $-88 \text{ km/s}^2$ .

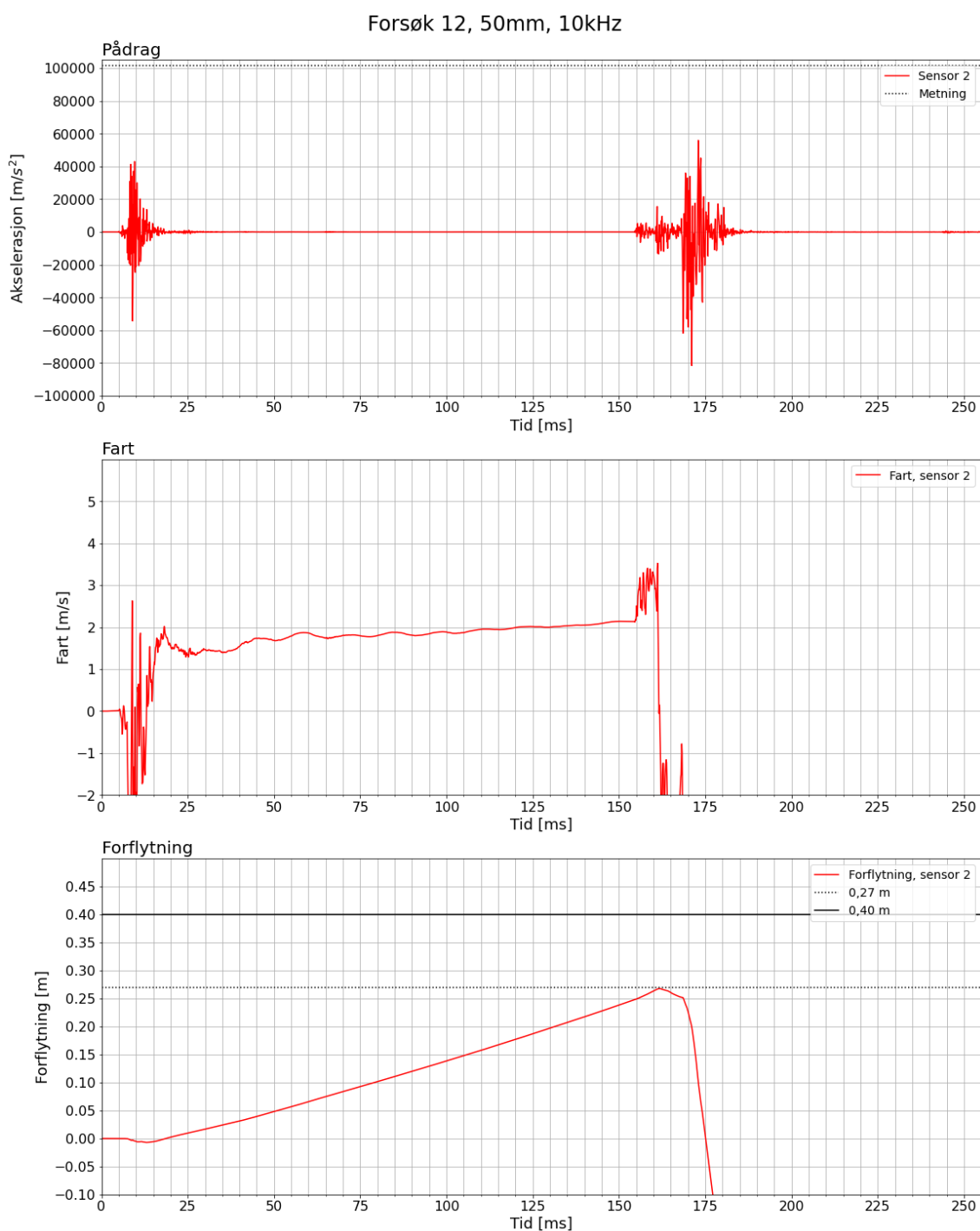
For samtlige forsøk med sliphøyde satt til 50 mm vedvarer første akselerasjonsøkning frem til  $t = 20 \text{ ms}$ . I denne pulsen frigjøres loddet fra fallmaskinen, og loddet treffer aluminiumsplatens. Når loddet, med aluminiumsplatens, er i fritt fall er akselerasjonen konstant, og ligger litt under  $\mathbf{g}$ , som forventet grunnet friksjon og luftmotstand. Loddet havner i nedre posisjon ved tidsintervallet  $t = 155 \text{ ms}$  og  $t = 180 \text{ ms}$ . Hva av de tre

pulsene i tidsintervallet som er bremsedemperne eller støttebeina som stopper fallet, diskuteres i 5.1.2 *Skille mellom demper og støttebein*.

Peakene fra pulsen hvor loddet treffer aluminiumsplaten varierer fra  $+17 \text{ km/s}^2$  til  $+68 \text{ km/s}^2$  og fra  $-22 \text{ km/s}^2$  til  $-72 \text{ km/s}^2$ . Pulsene hvor de treffer bremsedempere og støttebeina, har peakene som varierer fra  $+52 \text{ km/s}^2$  til  $+102 \text{ km/s}^2$  og fra  $-42 \text{ km/s}^2$  til  $-88 \text{ km/s}^2$ . Merk at peakene på  $102 \text{ km/s}^2$  kommer av at det ikke er mulig å logge høyere.

Det som er verdt å trekke med seg fra sammenlikningen i figur 4.1 er dermed at fra forsøk til forsøk er det store karakteristiske likheter, om vi velger å se bort fra verdiene til topp- og bunnpunkter, og fokusere mer på hvor det foregår endring i akselerasjon.

## 4.3.1.1.2 Forsøk 12



**Figur 4.2** - Forsøk 12 med slipphøyde 50 mm. Sammenlikning av pådragets akselerasjon, fart og forflytning innenfor samme tidsintervall. Høyeste akselerasjonsmåling er på  $56 \text{ km}/s^2$ , og laveste er på  $-82 \text{ km}/s^2$ .

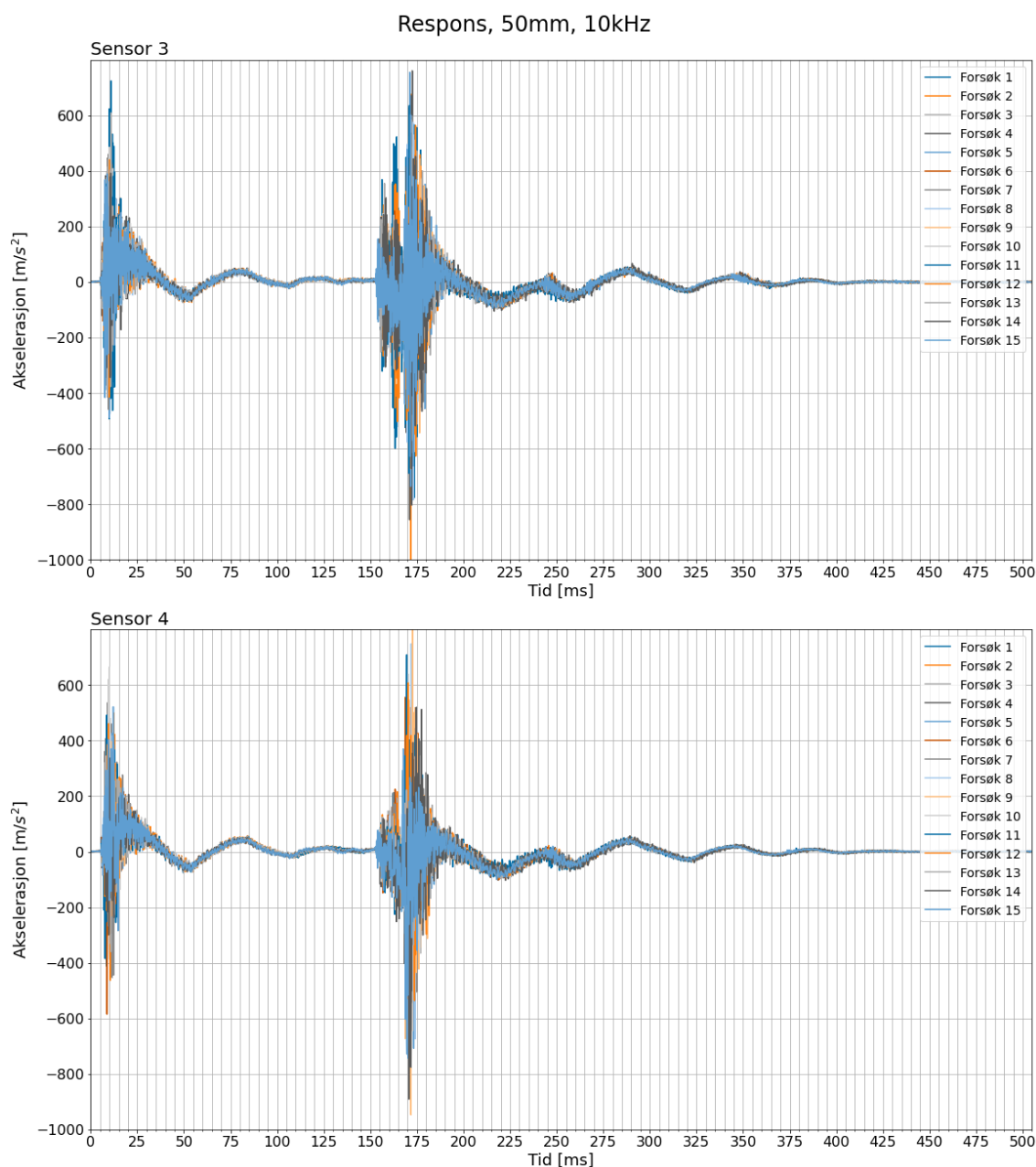
I akselerasjonsgrafene ved  $t = 9$  ms er det en negativ peak på  $a = -54 \text{ km/s}^2$ . Peaken skaper en «forstyrrelse» i fartsgrafene under integrasjonen, hvor det ved samme tidspunkt er en kraftig dupp i farten etterfulgt av store vekslinger, som vi vet ikke stemmer med virkeligheten. Forstyrrelsen i farten påvirker også forflytningsgrafene, som det er mulig å se i  $t = 10$  ms til  $t = 15$  ms, hvor forflytningen først blir negativ før den har en tilnærmet lineær stigning.



### 4.3.1.2 Respons

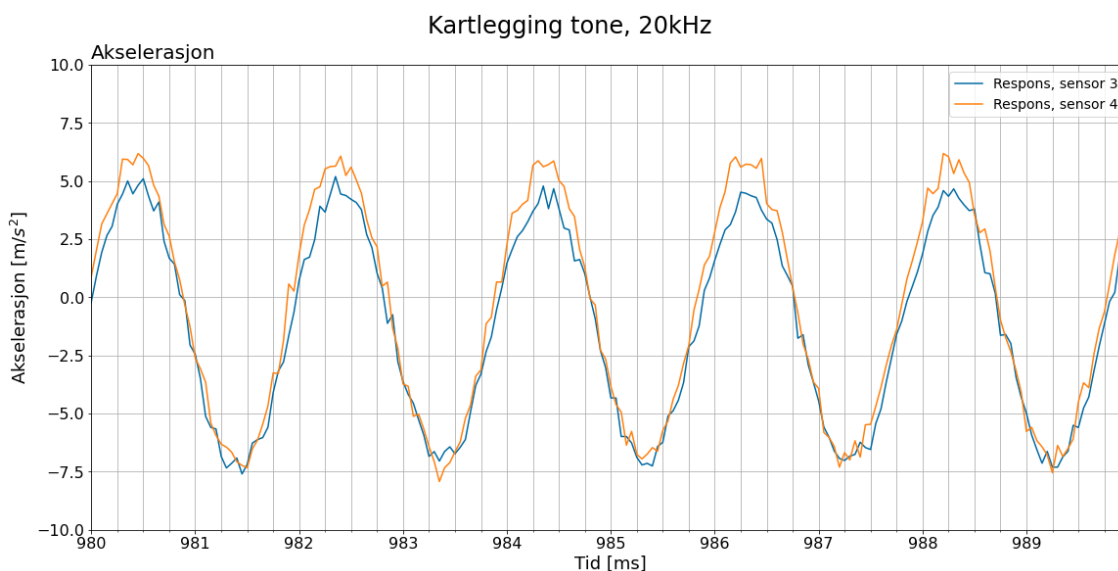
Responsen for forsøk med en sliphøyde på 50 mm vil presenteres gjennom fremleggingen av samtlige forsøk samlet i en graf, i tillegg til at forsøk 12 kommenteres.

#### 4.3.1.2.1 Samtlige forsøk



**Figur 4.3** - Samtlige målinger av respons med sliphøyde 50 mm plottet. Øverste graf er målingene fra sensor 3, nederste graf er målingene fra sensor 4.

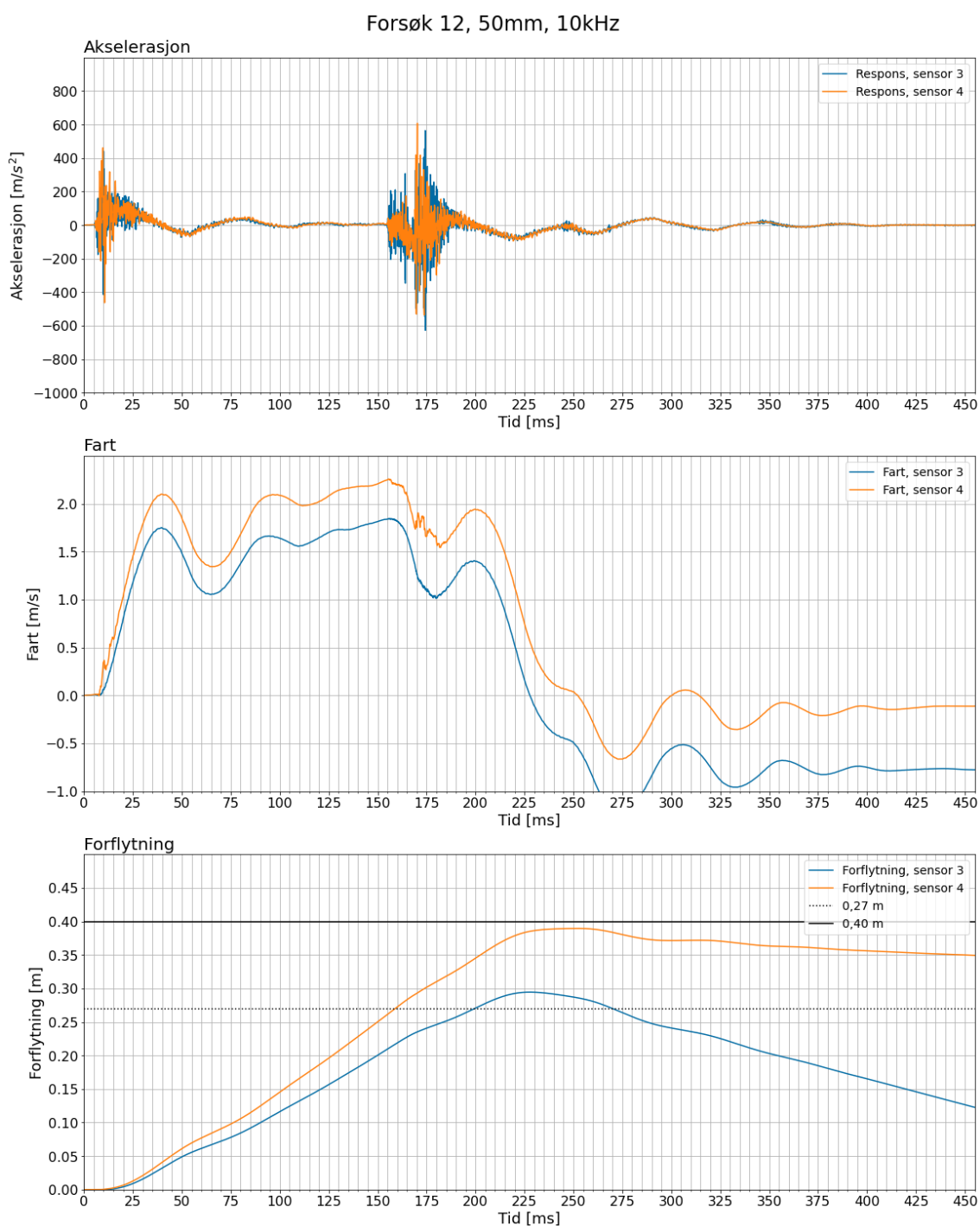
Både for sensor 3 og 4 er de største peakene ved  $t = 10$  ms. Deretter dempes peakene frem mot  $t = 30$  ms, og vi ser en lavfrekvent dempet svingning vare til rett før  $t = 155$  ms. Samme demping er mulig å se fra  $t = 175$  ms frem mot  $t = 190$  ms. I tillegg er det mulig å se høyfrekvente svingninger (støy) jevnt gjennom grafen fra begge sensorer. I figur 4.4 er disse svingningene fremprovosert.



**Figur 4.4** - Kartlegging av høyfrekvente svingninger i stålplaten til fjærsystemet. Målt med en samplingsfrekvens på 20 kHz.

I figur 4.4 er det plottet vibrasjonene som har oppstått i stålplaten til fjærsystemet etter platen ble slått med en skiftenøkkel. En periode er på omtrent 2 ms, og mulig egenfrekvens til stålplaten kan være 500 Hz, hvilket forklarer de høyfrekvente svingningene nevnt tidligere.

## 4.3.1.2.2 Forsøk 12



**Figur 4.5** - Forsøk 12 med sliphøyde 50 mm. Sammenlikning av responsens akselerasjon, fart og forflytning innenfor samme tidsintervall.

I akselerasjonsgrafene kan vi se tydelige forskjeller mellom sensor 3 og 4, der sensor 3 måler større amplituder ved brå endringer i akselerasjonen, med unntak fra  $t = 155$  ms frem til  $t = 165$  ms.

I fartsgrafene er det mulig å se at integrasjonen av de to akselerasjonsplottene har medført i en ulik divergens fra grunnlinjen, som blir enda tydeligere i forflytningsgrafene. Utformingen av de to plottene i fartsgrafene er tilnærmet lik, mens verdiene utgjør forskjellen, hvor sensor 4 har jevnt over størst verdi. Ved  $t = 10$  ms ser vi en bratt økning i fartsgrafene, frem til den når ett toppunkt ved  $t = 40$  ms, og deretter avtar som en følge av sjokkdempernes kompresjon (motsatt retning av fallretning). Fra  $t = 200$  ms faller grafene ned frem til de krysser tidsaksen i  $t = 223$  ms og  $t = 253$  ms.

Kompresjonen og utstrekningen til sjokkdemperne er mulig å følge gjennom fartsgrafene, hvor det blir synlig hvordan de får en motreaksjon til plutselige endringer i akselerasjon. Ved samme endringer i akselerasjon blir det antydning til støy i fartsgrafene, som ellers har en glatt kurve.

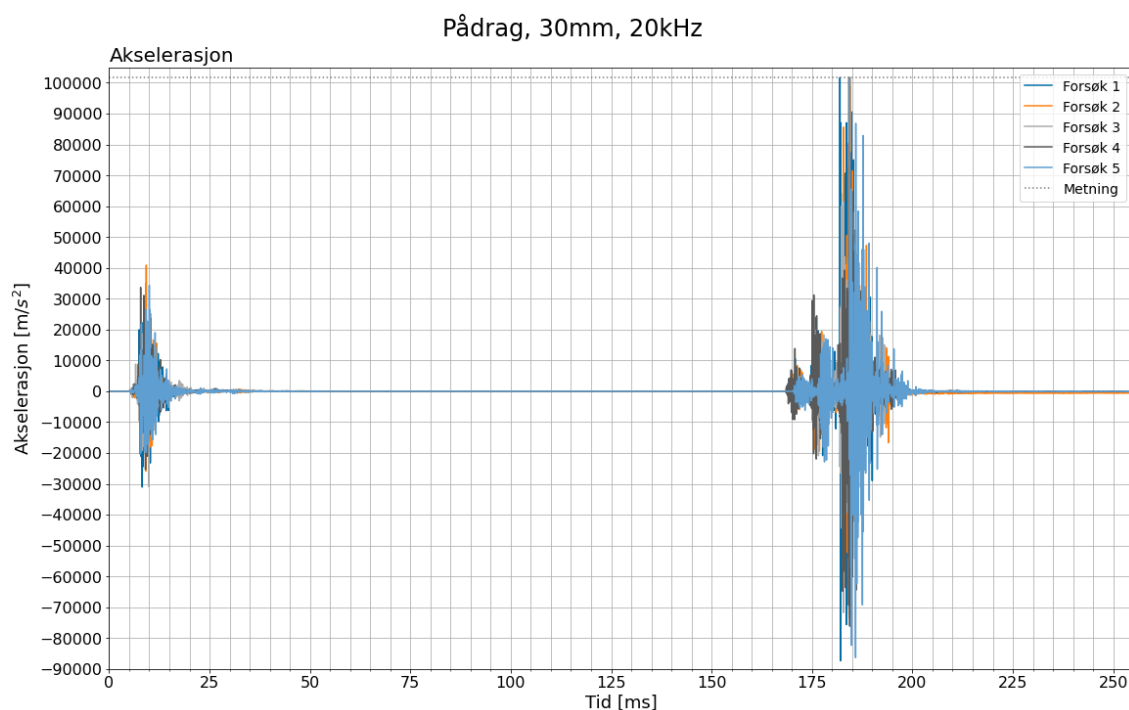
### **4.3.2 Fallmaskin – testgjennomføring 30 mm**

Pådraget, samt responsen, for testgjennomføring med en slipphøyde på 30 mm vil i dette kapitlet presenteres og kommenteres.

#### **4.3.2.1 Pådrag**

Også for denne slipphøyden vil pådraget for samtlige forsøk presenteres i samme graf. Videre vil forsøk 2 og 4 legges frem og kommenteres.

## 4.3.2.1.1 Samtlige forsøk



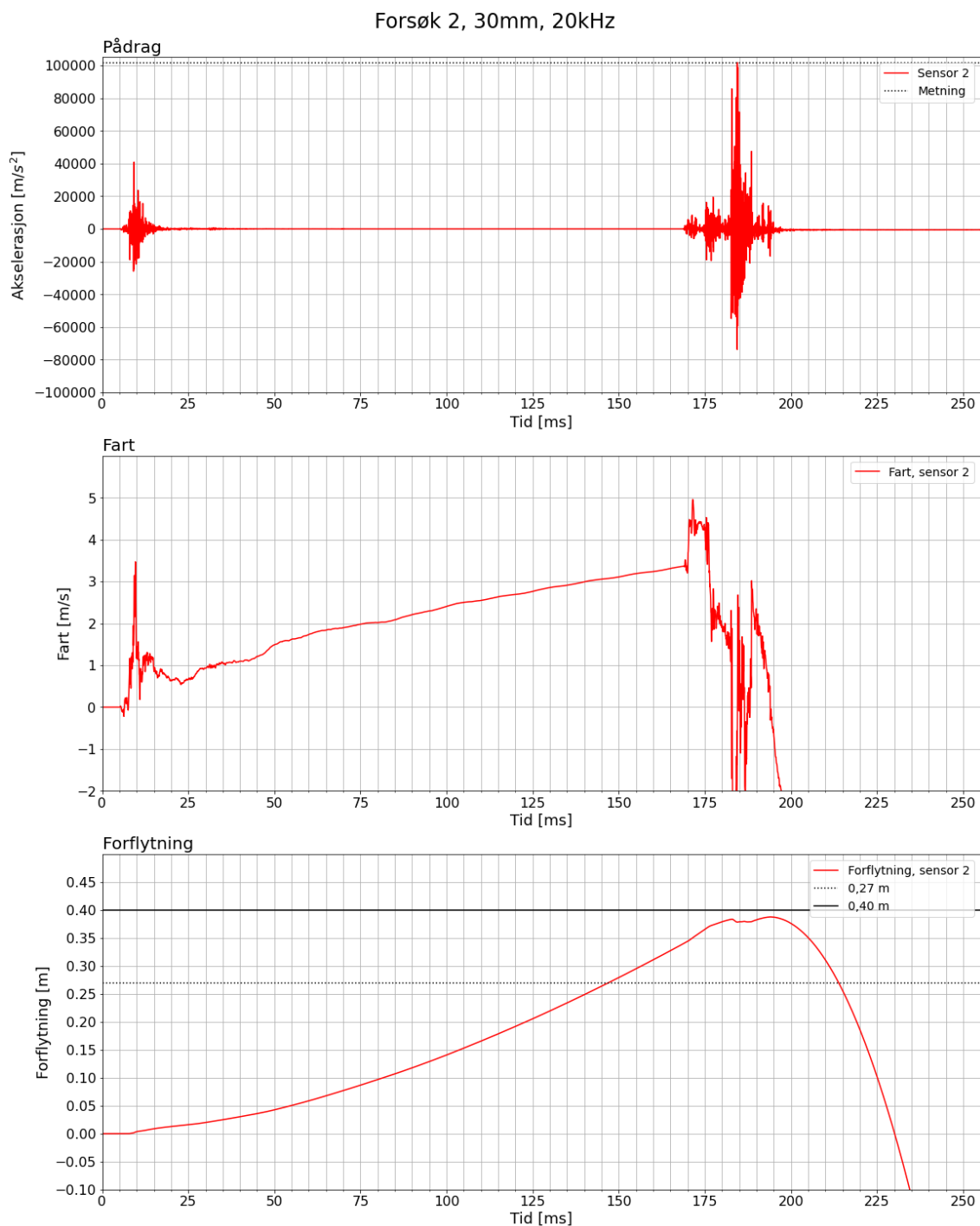
**Figur 4.6** - Samtlige målinger av pådrag med sliphøyde 30 mm plottet. Høyeste akselerasjonsmåling er på 102 km/s<sup>2</sup>, og laveste er på -88 km/s<sup>2</sup>.

På lik måte som med sliphøyde på 50 mm, så oppstår første akselerasjonsendring ved  $t = 5$  ms og vedvarer frem til  $t = 20$  ms. Frem til neste akselerasjonsøkning ved omtrent  $t = 170$  ms, er det et tidsintervall på  $\Delta t = 150$  ms hvor systemet er i tilnærmet fritt fall. Økningen som følger den konstante akselerasjonen har pulser som vedvarer frem til  $t = 195$  ms, hvor målingene ser ut til å ha blitt dempet.

Peakene fra de første akselerasjonsmålingene varierer fra +22 km/s<sup>2</sup> til +42 km/s<sup>2</sup> og fra -21 km/s<sup>2</sup> til -32 km/s<sup>2</sup>. Pulsen hvor de treffer bremsedemperne og støttebeina, har negative peaker som varierer fra -72 km/s<sup>2</sup> til -88 km/s<sup>2</sup>. Målt maksimal akselerasjon for disse forsøkene er på 102 km/s<sup>2</sup>, med unntak av forsøk 3, som målte 62 km/s<sup>2</sup>.

Her er det også store likheter i forsøkene, om vi velger å se bort fra verdiene til topp- og bunnpunkter, og fokusere mer på hvor det foregår endring i akselerasjon. Unntak her er forsøk 5 som virker å henge noe etter sammenliknet med de andre målingene.

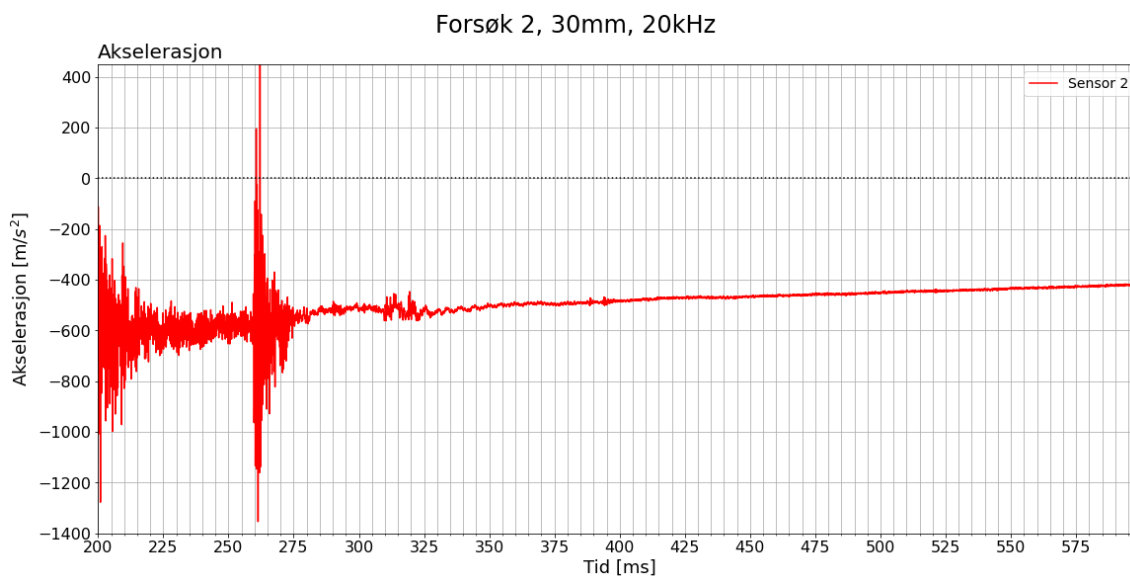
## 4.3.2.1.2 Forsøk 2



**Figur 4.7** - Forsøk 2 med sliphøyde 30 mm. Sammenlikning av pådragets akselerasjon, fart og forflytning innenfor samme tidsintervall. Høyeste akselerasjonsmåling er på 102 km/s<sup>2</sup>, og laveste er på -76 km/s<sup>2</sup>.

Fartsgrafen i figur 4.7 er preget av flere plutselige vekslinger, som ikke stemmer med realiteten. Samtlige bykst i farten skjer som en konsekvens av plutselige endringer i akselerasjonsgrafen. De ikke-reelle endringene i farten kan skyldes det vi ser i figur 4.8.

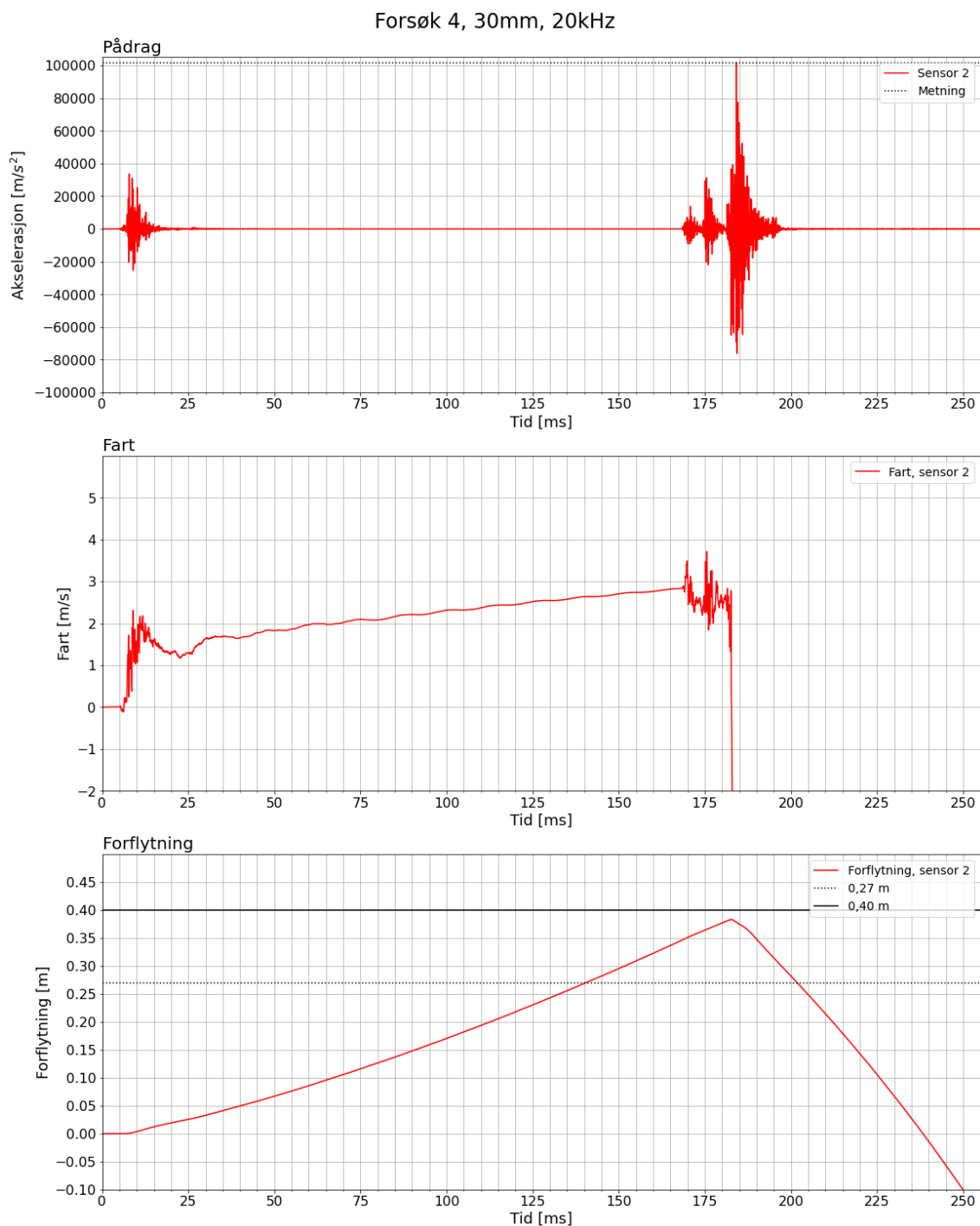
Fra forflytningsgrafen tar vi med oss at avstanden passerer 0,27 m i  $t = 147$  ms, og total avstand når akkurat ikke forventet strekning på 0,4 m.



**Figur 4.8** - Utklipp fra forsøk 2 fra sliphøyde 30 mm, hvor det blir synlig hvordan pådraget ikke klarer å hente seg inn igjen.

Figur 4.8 viser til et utklipp fra Forsøk 2 hvor det blir synlig at sensor 2, som måler pådraget, ikke klarer å «hente seg inn igjen» til null etter den fjerde pulsen i sjokkforløpet.

## 4.3.2.1.3 Forsøk 4



**Figur 4.9** - Forsøk 4 med slipp høyde 30 mm. Sammenlikning av pådragets akselerasjon, fart og forflytning innenfor samme tidsintervall. Høyeste akselerasjonsmåling er på  $102 \text{ km/s}^2$ , og laveste er på  $-76 \text{ km/s}^2$ .



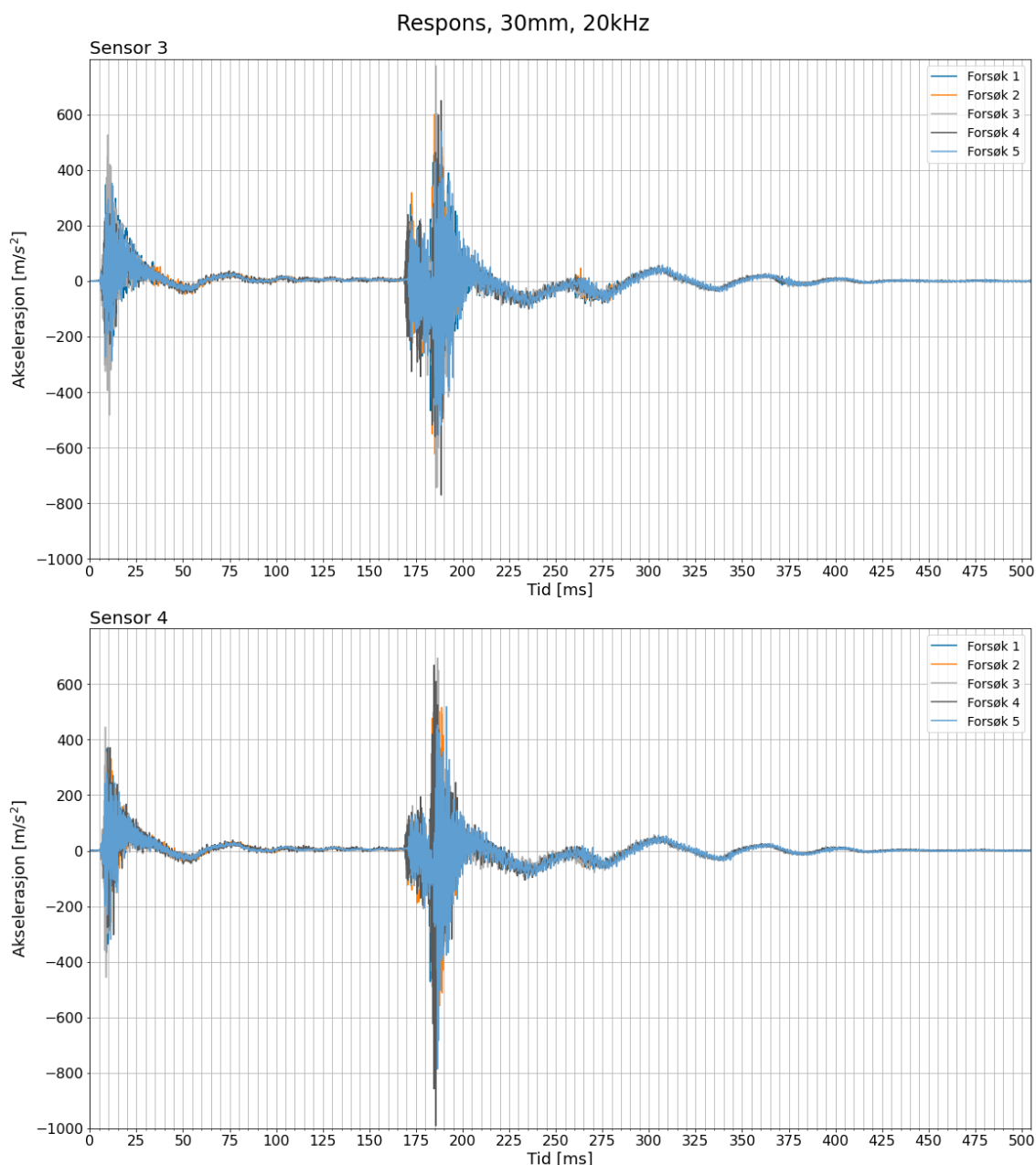
I akselerasjonsgrafene blir det synlig hvordan målingene danner fire pulser totalt. Hvilket gjør at vi kan anta at systemet er i fritt fall fra  $t = 20$  ms til rett før  $t = 170$  ms, som gir et tidsintervall på  $\Delta t = 150$  ms.

Forflytningsgrafene viser til en eksponentiell økning fra  $t = 5$  ms til  $t = 183$  ms, hvor grafen krysser 0,27 m ved  $t = 140$  ms, og deretter når total avstand på 0,38 m, som er nærme forventet avstand på 0,4 m. Deretter faller grafene tilnærmet lineært ned, men vi kan se bort i fra dette, da det ikke stemmer med realiteten.

### 4.3.2.2 Respons

Etter at samtlige forsøk presenteres i samme graf for responsen ved 30 mm slipphøyde fremlegges, vil forsøk 2 og forsøk 4 presenteres og kommenteres.

#### 4.3.2.2.1 Samtlige forsøk

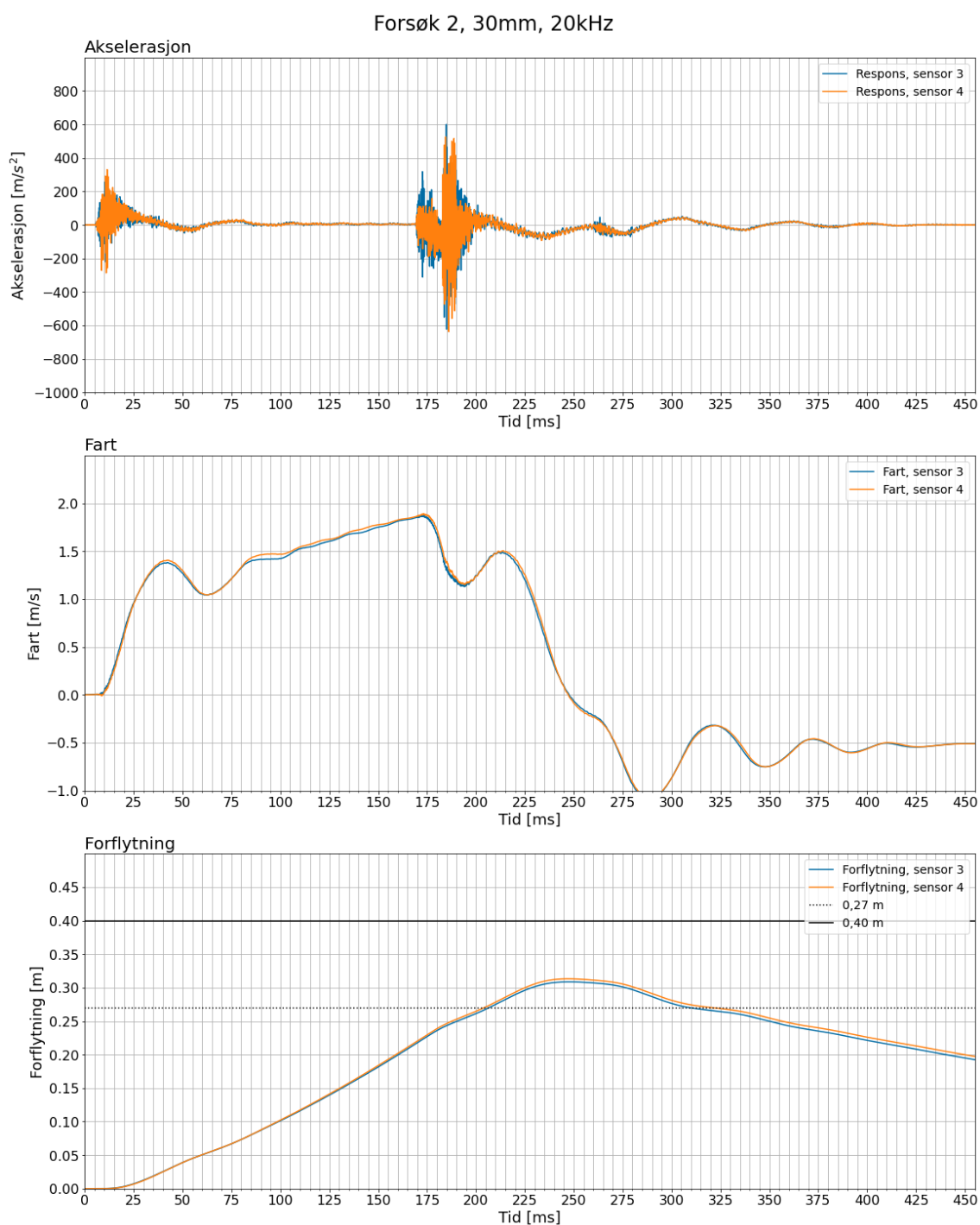


**Figur 4.10** - Samtlige målinger av respons fra slipphøyde 30mm plottet. Øverste graf inneholder målingene fra sensor 3, nederste graf er inneholder målingene fra sensor 4.

Akselerasjonsendringene fra  $t = 5$  ms vedvarer frem til  $t = 40$  ms før de får en lavfrekvent dempet svingning med høyfrekvent støy. De største peakene er ved  $t = 10$  ms. Sensor 3 måler de største akselerasjonene som  $a = 525 \text{ m/s}^2$ , og  $a = -450 \text{ m/s}^2$ . Sensor 4 måler  $a = \pm 450 \text{ m/s}^2$ . Nevnte toppunkter kommer fra forsøk 3.

Neste brå akselerasjonsendring skjer mellom  $t = 165$  ms og  $t = 170$  ms. Etterfulgt av de størst målte akselerasjonene i  $t = 190$  ms på omtrent  $800 \text{ m/s}^2$  (sensor 3) og  $-1000 \text{ m/s}^2$  (sensor 4). Deretter dempes målingene frem til  $t = 210$  ms, og en lavfrekvent svingning fortsetter utover.

## 4.3.2.2.2 Forsøk 2

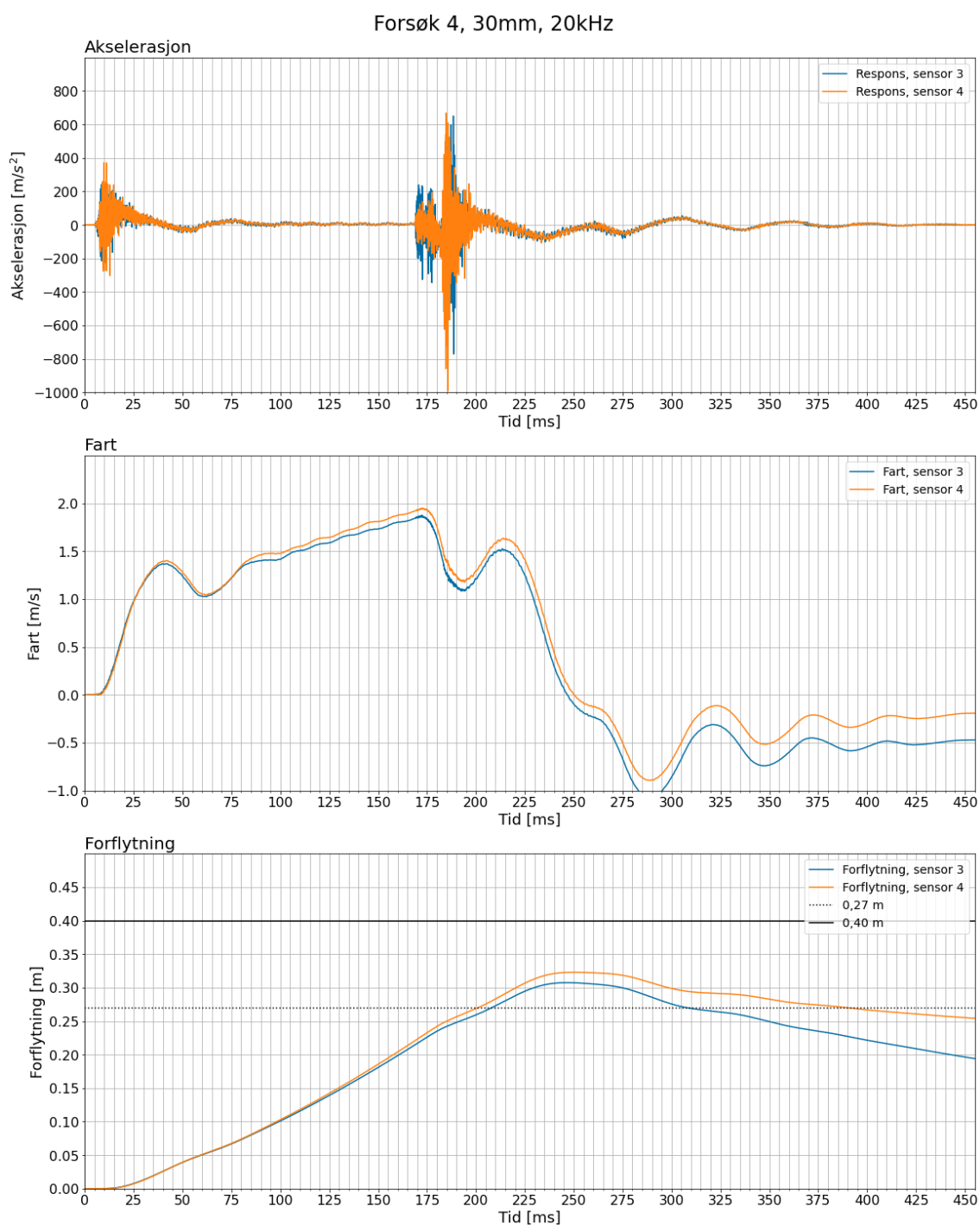


**Figur 4.11** - Forsøk 2 med slipphøyde 30 mm. Sammenlikning av responsens akselerasjon, fart og forflytning innenfor samme tidsintervall.

I motsetning til figur 4.5 er integreringen, og dermed farts- og forflytningsgrafene, tilnærmet helt lik. I tillegg er det tydeligere i fartsgrafen når systemet er i fritt fall, ved at det er en tilnærmet lineær stigning fra  $t = 100$  ms frem til  $t = 175$  ms. Ellers ser vi også likheter, som sjokkdempernes kompresjon og utstrekning gjennom sjokkets forløp. Legg merke til antydningen til støy i fartsgrafen fra  $t = 183$  ms til  $t = 215$  ms.

Det vi tar med oss fra forflytningsgrafen er stigningen aldri når forventet avstand på 0,4 m.

## 4.3.2.2.3 Forsøk 4



**Figur 4.12** - Forsøk 4 med slipphøyde 30 mm. Sammenlikning av responsens akselerasjon, fart og forflytning innenfor samme tidsintervall.

I figur 4.11 har sensor 4 i gjennomsnittet større verdier på målingene enn sensor 3. Forskjellen blir videre synlig i farts- og forflytningsgrafene, årsaken blir diskutert i *5.3.1 – Måleområde for sensorene*.

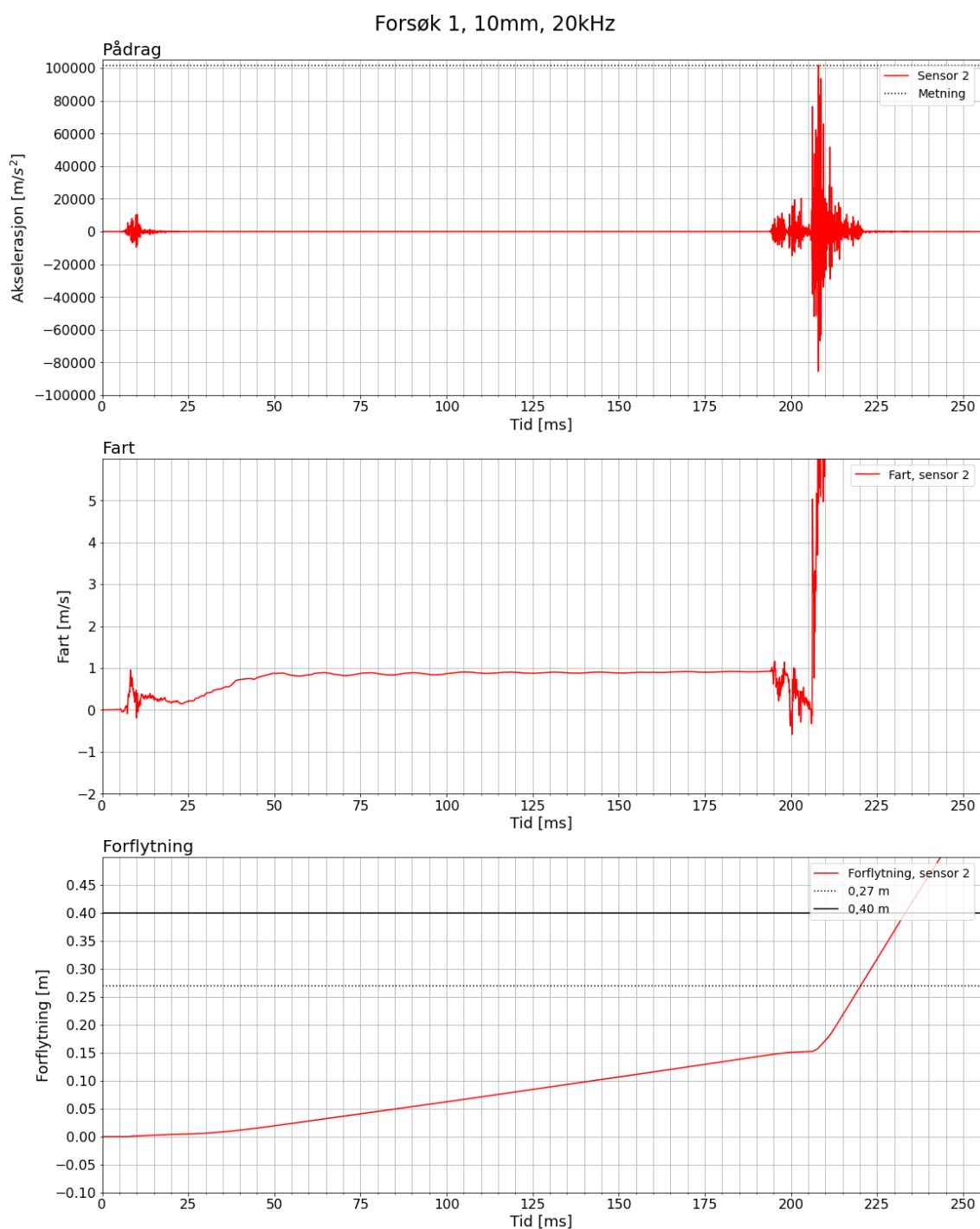
Det vi tar med oss fra akselerasjonsgrafene er hvordan de største akselerasjonene fra  $t = 170$  ms påvirker fartsgrafene. I forsinkelsen av disse brå endringene, mellom  $t = 180$  ms og  $t = 220$  ms, er det mulig å se antydning til støy, som vi også så i figur 4.10. Videre synker farten frem til den krysser tidsaksen i  $t = 245$  ms og  $t = 250$  ms. Herifra forventer vi at farten skal svinge om null, og vi ser dermed bort ifra divergensen i grafene da det ikke stemmer med virkeligheten.

Avstanden i forflytningsgrafene er på 0,31 m og 0,33 m, og når dermed ikke forventet avstand på 0,4 m.

### **4.3.3 Fallmaskin – testgjennomføring 10 mm**

Pådrag og respons for en testgjennomføring med slipphøyde på 10 mm vil her presenteres. Det presiseres at det ikke er gjort mange testgjennomføringer for denne slipphøyden med alle sensorene montert, grunnet bekymring for å skade sensorene.

## 4.3.3.1 Pådrag

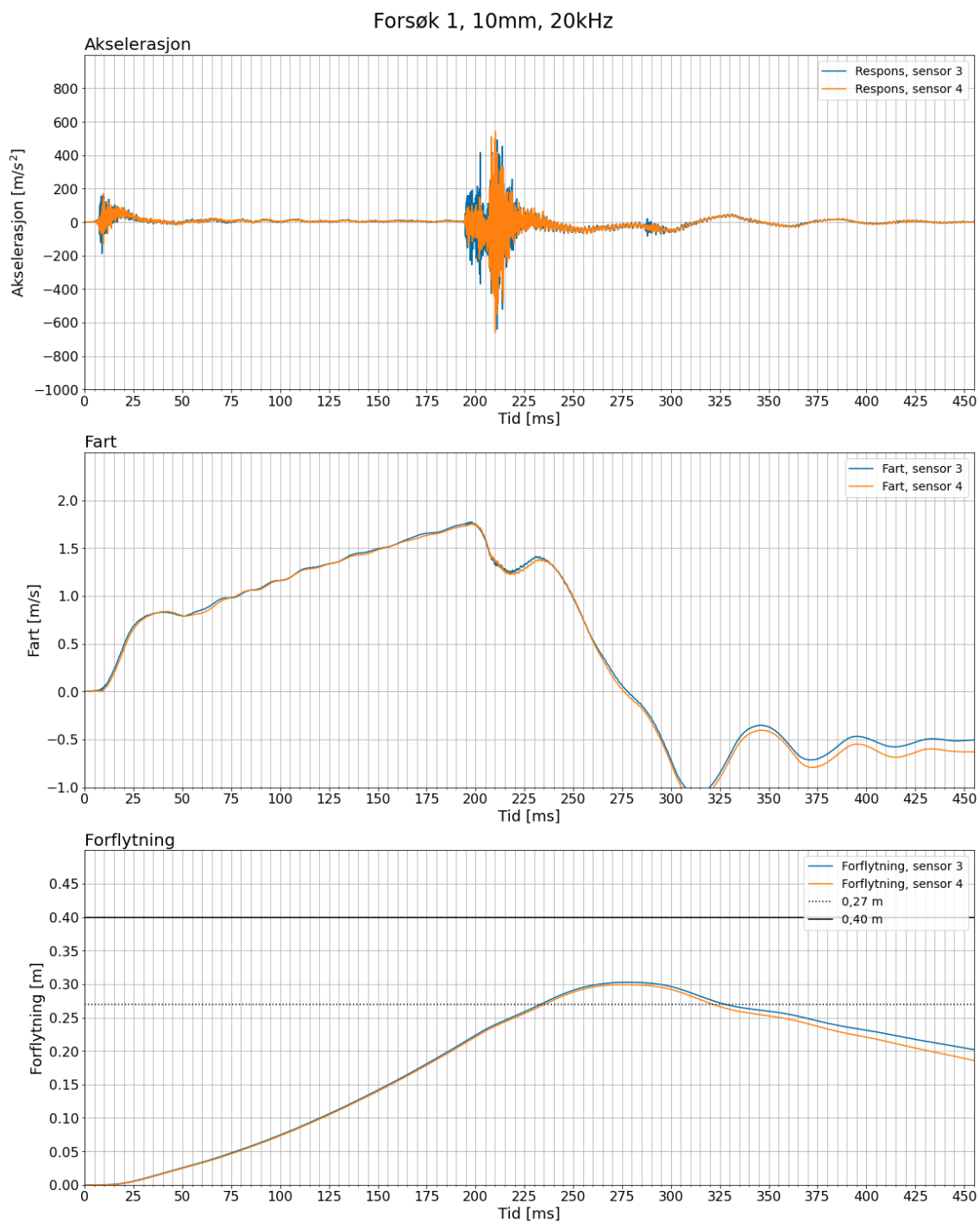


**Figur 4.13** - Forsøk 1 med slippøyde 10 mm. Sammenlikning av pådragets akselerasjon, fart og forflytning innenfor samme tidsintervall. Høyeste akselerasjonsmåling er på  $102 \text{ km}/s^2$  (metning), og laveste er på  $-86 \text{ km}/s^2$ .



Fra forsøket med 10 mm slipp høyde på loddet, er den mest fremtredende forskjellen fra de tidligere forsøkene akselerasjonen i den første pulsen. Her er måleverdien til peakene mer enn halvert, hvilket fører til mindre støy i fartsendringen ved samme tidspunkt. I tillegg er farten i fritt fall tilnærmet konstant, frem til grafen avtar, med innslag av støy, i  $t = 195$  ms. Fra første puls frem til farten avtar har forflytningen en lineær stigning, hvor avstanden blir 0,15 m. Ved  $t = 205$  ms er farten 0 m/s, og vi ser bort fra økningen som skjer i etterkant, da dette ikke er reelt, samme gjelder for forflytningen som får en lineær stigning.

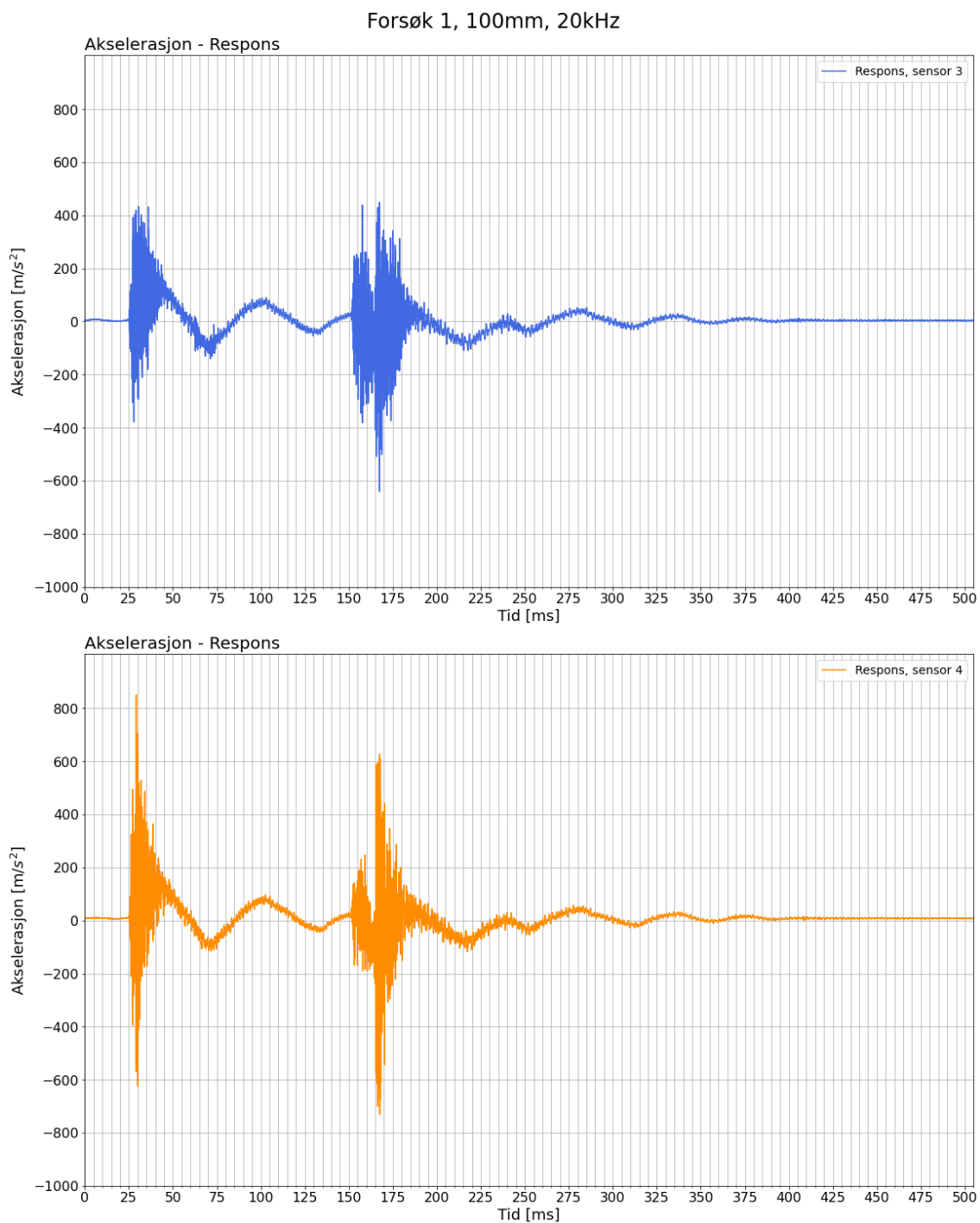
## 4.3.3.2 Respons



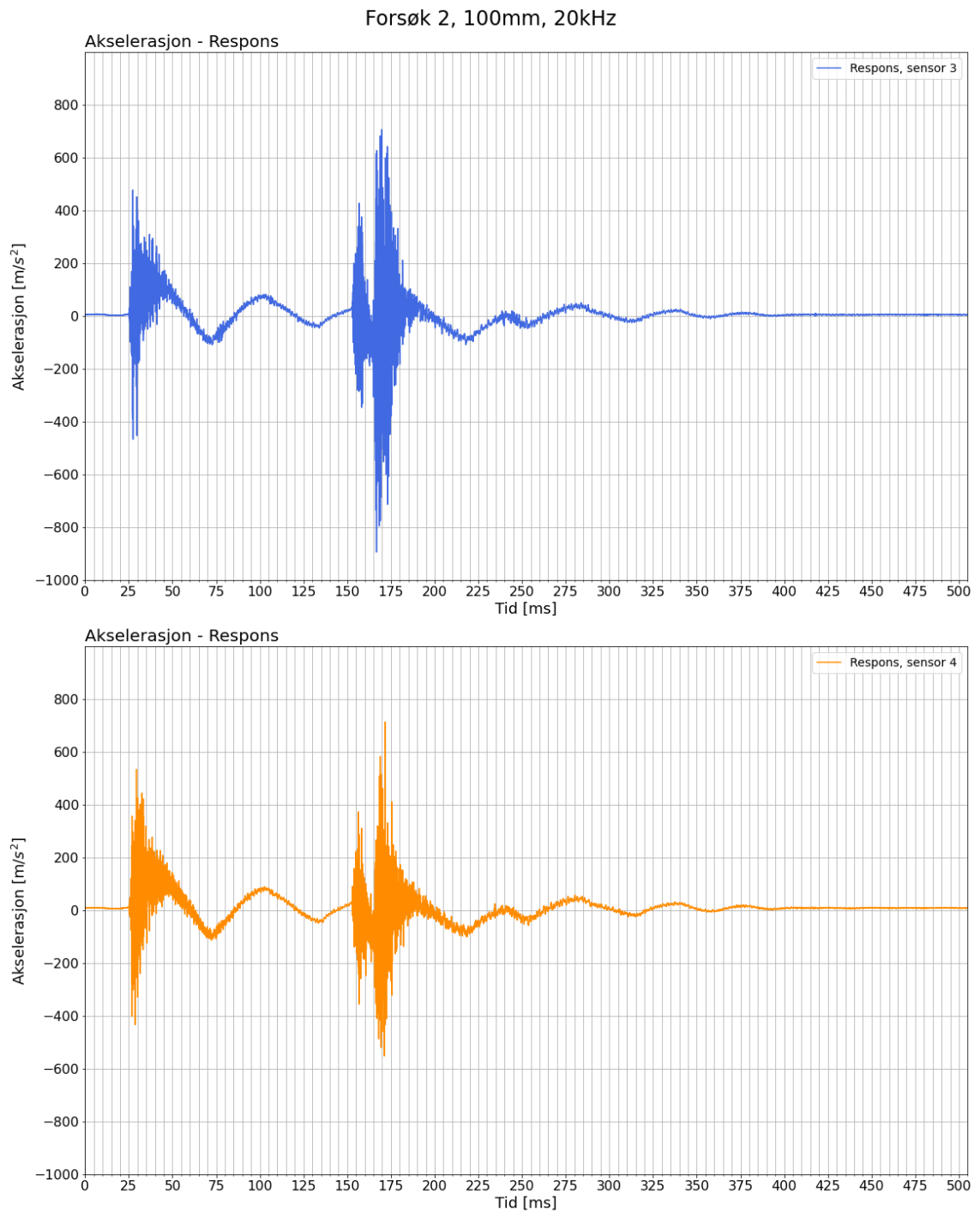
**Figur 4.14** - Forsøk 1 med sliphøyde 10 mm. Sammenlikning av responsens akselerasjon, fart og forflytning innenfor samme tidsintervall.

I figur 4.14 ser vi hvordan en lavere slipp høyde skaper mindre motreaksjoner i sjokkdemperne, i tillegg til at det gir mindre støy i fartsgrafen etter systemet har nådd nedre posisjon. Også i denne fartsgrafen ser vi bort ifra farten etter den har krysset tidsaksen, da vi ser at grafen har divergert fra tidsaksen. Ved samme tidspunkt ser vi vekk ifra forflytningen. Avstanden bikker 0,30 m, hvilket er under forventet strekning.

### 4.3.4 Målt respons 100 mm



Figur 4.15 - Respons ved 100 mm sliphøyde. Sensor 3 er øverst og sensor 4 er nederst.



**Figur 4.16** - Respons ved 100 mm slipphøyde. Sensor 3 er øverst og sensor 4 er nederst.

I figur 4.15 og 4.16 kan man se responsen for begge forsøkene som ble gjort med en høyde på 100 mm. Slik figurene viser er sensor 3 og 4 skilt fra hverandre for bedre å kunne se hva som skjer. Her kan man se en repeterende tendens med veldig like karakteristikk. Dog kan man se en stor forskjell i maksimal akselerasjon på første og andre sjokk, ved forsøk 1 og 2 for de to sensorene. I verken forsøk 1 eller 2 er maksimal akselerasjon lik for de to sensorene. Det som også er interessant er at hvilken av sensorene som har størst utslag, bytter på i de to forsøkene. Her har sensor 4 vesentlig større utslag enn sensor 3 i første forsøk, og det er motsatt i andre.

Hva dette kan komme av eller betyr, vil bli diskutert i 5.3.1 *Måleområde for sensorene*.

### 4.3.5 Sjokkresponspekter

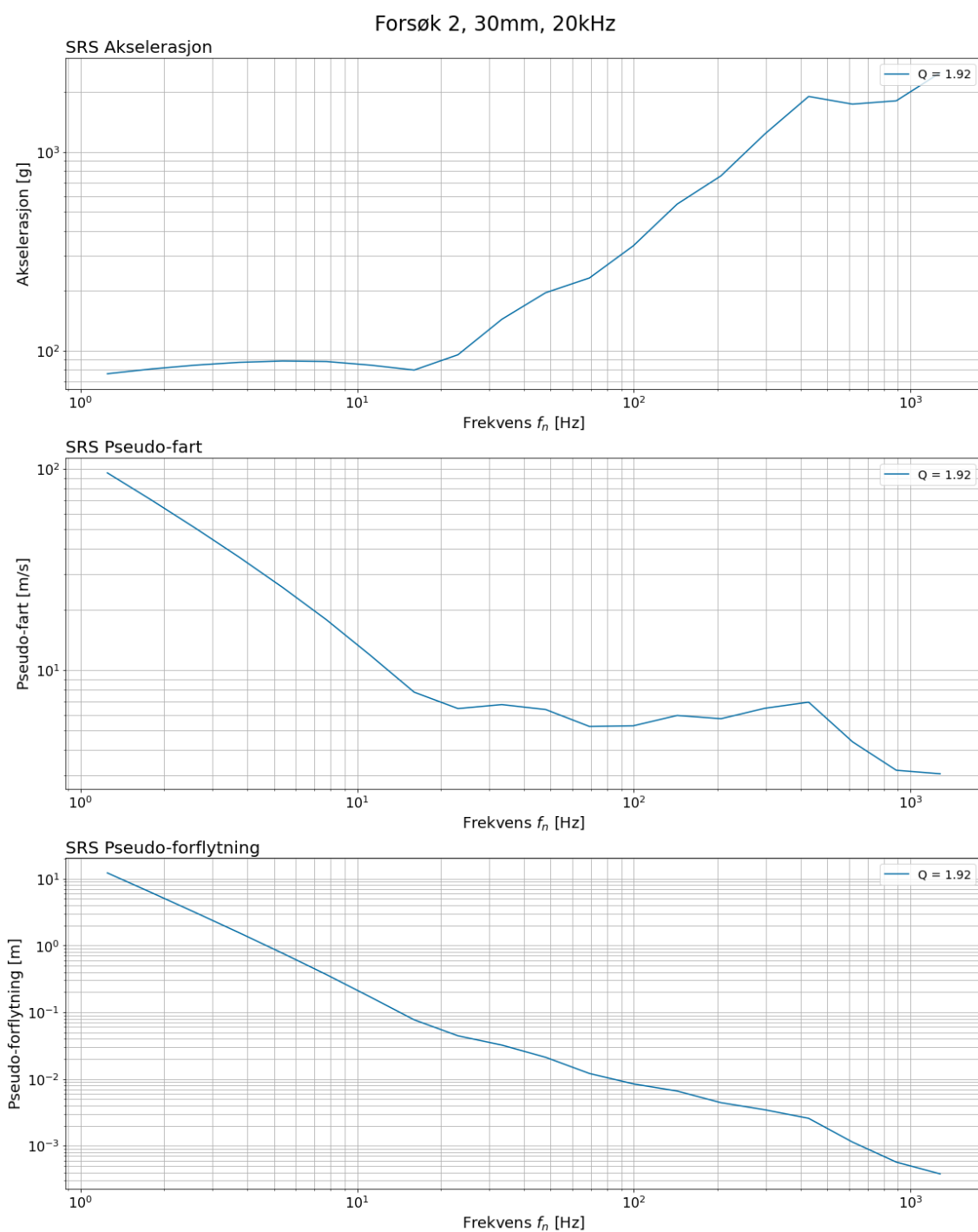
I dette underkapittelet vil sjokkresponspektrene fremlegges og kommenteres. Først vil utregninger til eget system gjennomgås, før forsøk 4 og forsøk 2 presenteres som SRS og kommenteres.

For figur 4.17 og 4.19, vil x-aksen representere et spekter av egenfrekvenser som nevnt i 2.2 *Sjokkresponspekter – Intro*. Y-aksen viser til maxmax for en gitt egenfrekvens.

#### 4.3.5.1 Utregninger til eget system

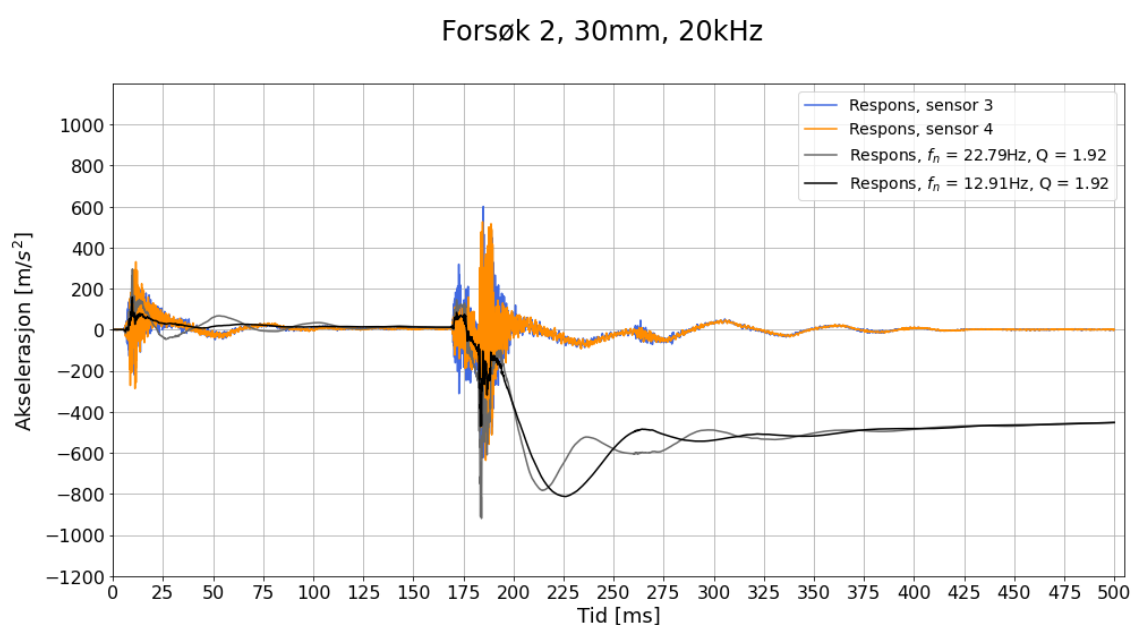
For å produsere et SRS som stemmer med forsøkene, må det gjøres utregninger på fjærsystemet brukt i forsøkene, disse utregningene er det mulig å finne i Vedlegg F – *Utregninger av fjærssystem*. Ved å regne ut den naturlige frekvensen til vårt fjærssystem, er det mulig å finne den tilhørende teoretisk predikerte responsen. I tillegg har det blitt regnet ut en «ekstra» egenfrekvens ut ifra svingningene nevnt i respons-grafene.

## 4.3.5.2 SRS - Forsøk 2



**Figur 4.17** - Sjokkresponsspekter for pådraget i forsøk 2 med 30 mm slipp høyde.  $Q = 1,92$  er dempefaktoren til fjærsystemet i forsøkene.

Ut ifra akselerasjonsgrafene predikeres det at fjærssystemer med en egenfrekvens opp til 16 Hz har en maksimal akselerasjonsrespons mellom  $a = 80 \text{ g}$  og  $a = 90 \text{ g}$ , som de to utregnede egenfrekvensene faller under. Ved å se på egenfrekvensen regnet ut ifra karakteristikken til fjærssystemet, samt frekvensen hentet fra responsmålingene, er det mulig å finne frem til tilhørende pseudo-fart i grafen. Hvis  $f_n = 13 \text{ Hz}$  er farten drøyt 10 m/s, og dersom  $f_n = 23 \text{ Hz}$  er farten rett under 7 m/s. Merk at disse egenfrekvensene er rundet opp. Maksimal forflytningen til de to frekvensene predikeres å være  $d(13 \text{ Hz}) = 0,15 \text{ m}$  og  $d(23 \text{ Hz}) = 0,05 \text{ m}$ .



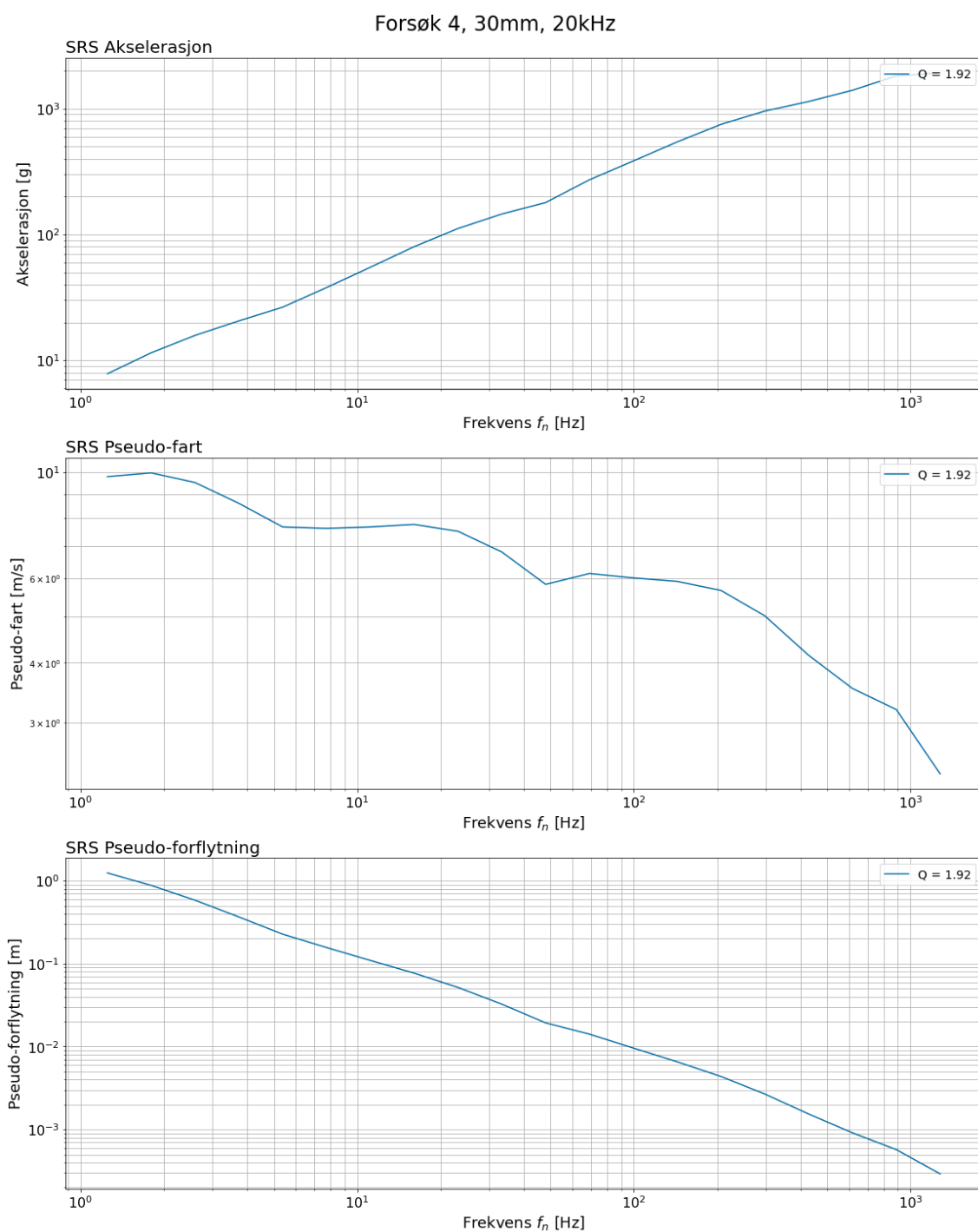
**Figur 4.18** - Teoretisk fremstilt respons i tidsdomenet over faktisk målt respons til samme pådrag.

For egenfrekvensen på 12,91 Hz, ligger akselerasjonen konstant under reell respons frem til  $t = 180 \text{ ms}$ , hvor akselerasjonen divergerer langt fra tidsaksen. Legg merke til at maximax for denne frekvensen, ikke stemmer overens med maximax i figur 4.16 for samme frekvens.

Når  $f_n = 22,79 \text{ Hz}$  blir akselerasjonen tilnærmet lik i første puls, men maximax er særdeles større enn reell maksrespons. Ogso her divergerer grafen fra tidsaksen.

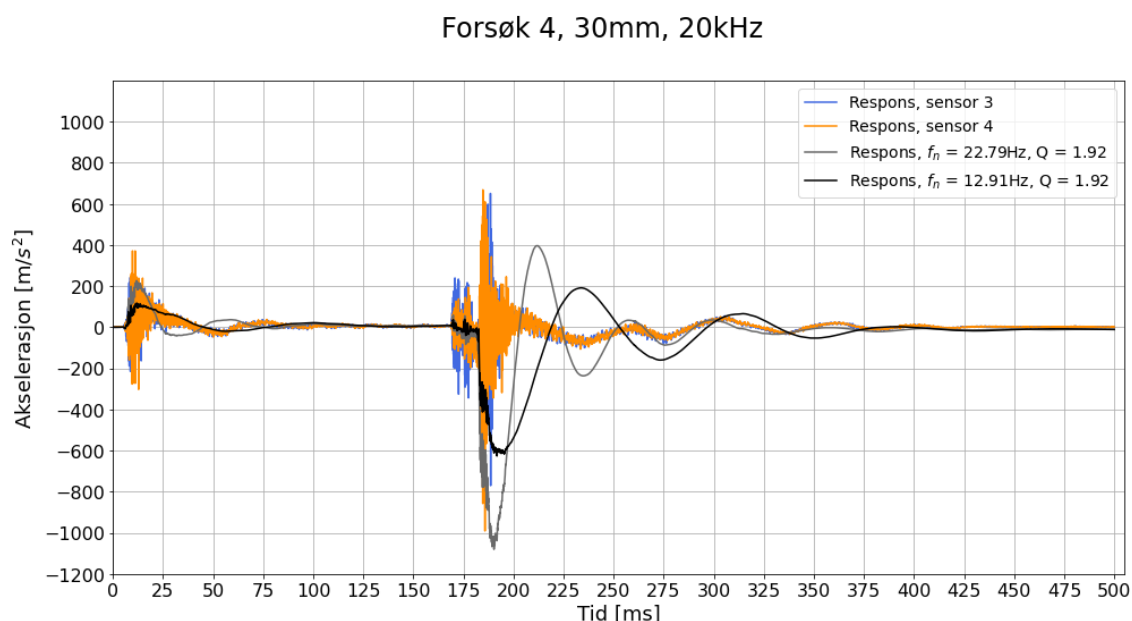


## 4.3.5.3 SRS – Forsøk 4



**Figur 4.19** - Sjokkresponsspekter for pådraget i forsøk 4 med 30 mm slipp høyde.  $Q = 1,92$  er dempefaktoren til fjærsystemet.

Sjokkresponspekteret regnes ut ifra figur 4.9 og har en mer forventet akselerasjonsgraf enn i figur 4.18, da vi her kan se en mer lineær stigning som følger økningen i egnefrekvenser. Pseudo-fartsgrafen har to knefrekvenser i  $f_n = 5,2$  Hz og  $f_n = 13,8$  Hz. Ellers bemerker vi oss at pseudo-farten til de utregnede egnefrekvensene ligger på omtrent 7,5 m/s. Pseudo-forflytningen gir  $d(13 \text{ Hz}) = 0,1$  m og  $d(23 \text{ Hz}) = 0,06$  m.



**Figur 4.20** - Teoretisk fremstilt respons i tidsdomenet over faktisk målt respons til samme pådrag.

Med en egnefrekvens på 22,97 Hz blir akselerasjonen utregnet med SRS relativ lik den reelle responsen i maximax. I tillegg følger grafen kurvene til sensor 3 og 4 med unntak av tidsrommene fra  $t = 25$  ms til  $t = 75$  ms, og fra  $t = 180$  ms til  $t = 250$  ms.

Egnefrekvensen på 12,91 Hz har en respons som ligger under den reelle responsen, med unntak av svingningene etter  $t = 180$  ms.

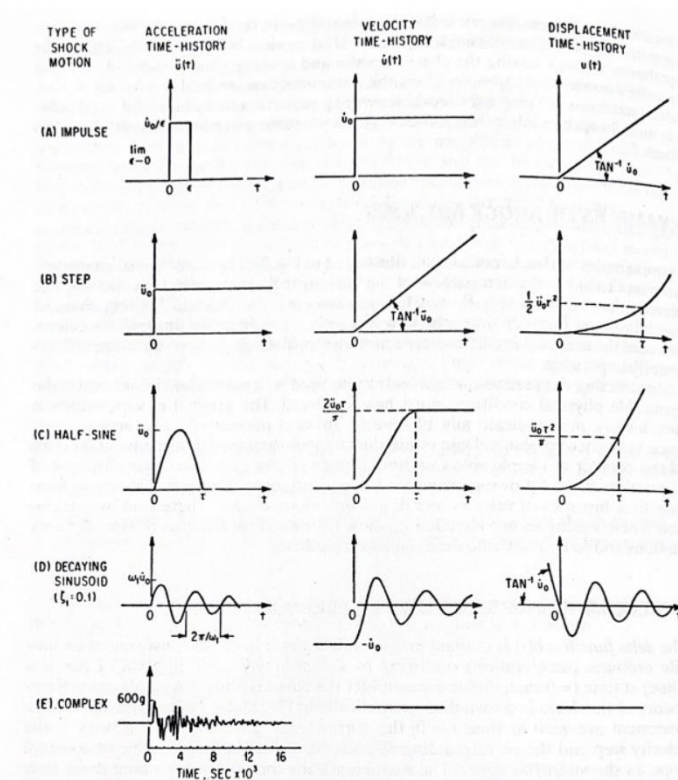
## 5 Diskusjon og analyse

Analysen vil ta for seg grafisk karakteristik, sjokkresponspekter, oppsettets styrker og svakheter, sensorenes styrker og begrensninger, og til slutt teoretisk fremstilling sett opp mot realiteten. Dette for å danne en forståelse av hva målingene faktisk betyr, for å kunne si noe om hvordan akselerometrene og datainnsamlingssystemet fungerer sammen med fallmaskinen. Disse punktene vil hjelpe med å kunne gi et svar på problemstillingen vår.

### 5.1 Grafisk karakteristik

Etter loggingen av akselerasjonsmålingene er startet, frigjøres loddet og slippes ned på aluminiumsplatene. Deretter faller alt i fritt fall frem til bremsedemperne tar imot, og til slutt stopper de fire beina bevegelsen. I denne delen av analysen gjennomgås det hva vi ser i grafene, og hvordan vi kan sette dette opp mot det som faktisk skjer med fallmaskinen. Først sees det på hva som er frigjøring av lodd, og hva som er at loddet treffer aluminiumsplatene. Deretter gjennomgås det hvilken del av sjokket som tilsvarer at platen treffer bremsedemperne, samt hva som er at platen treffer beina på fallmaskinen. Til slutt drøftes det hva den høyfrekvente støyen fra målingene kan være.

Innledningsvis vil den generelle karakteristikken til grafene grovt kommenteres. Ser vi til Harris og Piersols «Harris' shock and vibration handbook», blir et komplekst sjokk definert i sammenheng med en sjokk-puls-maskin tilknyttet undervannseksplisjoner. Se figur 5.1. Gjennom å forklare gangen på en type fallmaskin som skal simulere et undervannsjokk, nevnes det at «The general nature of the shock is complex [...]» (Harris & Piersol, 2002, s.26.10-26.12). At sjokk i slike tilfeller er komplekse, ble formulert i avsnittet som omhandlet et lodd med en vekt på litt over tre tonn. Omtales dette forsøket som kompleks, er det ikke usannsynlig å anta at våre målinger også er det. Ut fra illustrasjonen i figur 5.1 kan man dermed forstå hvorfor akselerasjonsgrafene har den karakteristikken de har.



Figur 5.1 - Sjokkbevegelse (Harris & Piersol, 2002, s.23.4).

Komplekst sjokk er illustrert i grafen nederst til venstre.

Videre vil det være naturlig å anta at et sjokk er enda mer brå enn det resultatene viser. Dette kan komme av at loddet henger skjevt og dermed lander skjevt på aluminiumsplatens. Vi vet at loddets høyde fra aluminiumsplatens varierer med omtrent 5 mm, Dette gjør at sjokket varer lengre, i stedet for at hele loddets masse produserer et sjokk i ett øyeblikk som forplantes gjennom platen.

Hva dette eventuelt har å si for resultatene med videre integrering og omgjøring til SRS, er uvisst.

### 5.1.1 Skille mellom frigjøring av lodd og sammenstøt

For å skille hva i grafene som tilsvarer frigjøring av loddet, og hva som tilsvarer sammenstøtet mellom loddet og aluminiumsplatens, trekker vi frem det som har blitt kommentert under 4.3 – Resultater. Grunnet kort tidsintervall fra loddet slippes til det treffer aluminiumsplatens i forsøket med 10 mm, se figur 4.13, velger vi å se vekk fra denne slippshøyden under videre analyse.

Innenfor tidsintervallet fra start til  $t = 20$  ms oppstår det en puls som vedvarer omtrent 15 ms for slipp høydene 30 mm og 50 mm, slik man kan se i figur 4.1 og 4.6. I løpet av dette intervallet frigjøres loddet, samt treffer aluminiumsplatene. Ved første øyekast vil det være naturlig å tro at den høyeste akselerasjonsmålingen i pulsen er når loddet treffer aluminiumsplatene, og dermed anta at første endring i akselerasjon forekommer av at loddet slippes.

For å bygge opp under denne teorien, kan vi i figur 4.9 se en brå fartsendring på samme tidspunkt som den største akselerasjonspeaken i pulsen oppstår. Like før er farten og forflytningen tilnærmet null, hvilket kan tilsi at platen ikke har begynt å falle enda. Det samme er mulig å se i figur 4.7.

Samtidig er det usikkert hvor pålitelige grafene er, da det er flere feil i verdiene vi leser av. For eksempel stemmer ikke de forventede fartsverdiene idet loddet treffer aluminiumsplatene med det som leses av grafen. Ved å bruke likningen for fart i fritt fall under 2.2.1 – *Fart og akselerasjon*, er det mulig å regne ut forventet fart idet loddet treffer aluminiumsplatene for de ulike slipp høydene. Første fartsøkning er forventet å være på omtrent:  $v_{50\text{mm}} = 1$  m/s og  $v_{30\text{mm}} = 0,8$  m/s, hvilket tydeliggjør usikkerhetene i verdiene fra de integrerte grafene. I tillegg forventes de reelle fartene å være lavere enn dette, fordi ikke-ideelle forhold som friksjon osv. stjeler energi ut av systemet. Disse fartene regnes ut for ideelle forhold. I virkeligheten er nok akselerasjonen litt lavere enn  $g$  under fallet, som gir lavere fart. Selv om verdiene ikke er pålitelige, må ikke det tilsi at det samme gjelder for hvor det forekommer endringer i grafene.

I tillegg til å se på pådraget er det mulig å se på hvordan responsen utformer seg for å skille på de to hendelsene. I figur 4.3 synker grafen raskt etter de største akselerasjonsmålingene fra den første pulsen. Dette antar vi å være en motreaksjon fra sjokkdemperne til fjærsystemet. At grafen starter å synke såpass hurtig etter akselerasjonspeakene, kan komme av at det nettopp er ved dette tidspunktet at loddet treffer aluminiumsplatene. Motreaksjonen som påpekes er også mulig å se på fartsgrafene i figur 4.12 hvor det er brattest stigning fra  $t = 10$  ms til  $t = 20$  ms etterfulgt av en demping i stigningen. Grunnen til at dette antas å være en motreaksjon kommer fra opptakene med høyhastighetskameraet, der det, i samtlige forsøk, er mulig å se hvordan sjokkdemperne komprimerer seg som en respons til at loddet treffer aluminiumsplatene. Kompresjonen er mulig å se i vedlegg G - *Video fra høyhastighetskamera*.

Ut ifra drøftingen over er det mulig å anta at de største akselerasjonspeakene i den første pulsen, viser til at loddet treffer aluminiumsplaten.

### 5.1.2 Skille mellom bremsedemper og støttebein

Etter loddet har truffet aluminiumsplaten, er systemet i tilnærmet fritt fall frem til det dempes av bremsedemperne. Om de to neste pulsene som oppstår i akselerasjonsplottet er bremsedemperne eller støttebeinene som stopper fallet, skal diskuteres videre.

Tar vi utgangspunkt i figur 4.13, ser vi markerte endringer fartsgrafen ved  $t = 195$  ms, hvilket indikerer at systemet ikke er i fritt fall lengre. Ved samme tidspunkt ser vi starten på den første av de tre neste pulsene i akselerasjonen. Forstyrrelsen i farten kan indikere at aluminiumsplaten blir bremsset. Samtidig kan vi se på forflytningen i figur 4.7 og 4.9 at ved tidspunktet hvor pulsen starter, har forflytningsgrafen allerede passert 0,27 m som er lengden ned til bremsedemperne, og kan bety at ved  $t = 195$  ms treffer systemet støttebeina. Igjen må det nevnes at integreringen ikke er feilfri, hvilket er spesielt tydelig i verdiene som leses av de integrerte grafene, men vi antar at endring i grafene er mer pålitelige. For eksempel ser vi i figur 4.13 at farten har en kraftig stigning ved de største akselerasjonsmålingene, hvilket vi vet ikke stemmer, da systemet i dette tidsrommet enten blir tatt imot av bremsedemperne eller treffer støttebeina. Det vi allikevel kan dra ut fra figuren, er den brå endringen i fart som kan tyde på en plutselig endring i systemet, som at aluminiumsplaten har nådd nedre posisjon.

En slik plutselig endring i farten er også mulig å se i figur 4.9, hvor den her synker og krysser tidsaksen. En annen vinkling kan være å tolke farten som en nedbremsing. For å bygge opp under denne vinklingen kan man se på figur 4.6, at akselerasjonsmålingene blir dempet etter de største utslagene, som kan antyde til at loddet treffer bremsedemperne i den tredje pulsen etter fritt fall.

Til slutt er det mulig å se nærmere på opptak gjort med høyhastighetskameraet. Om vi ser på figur 4.9 opp mot tilsvarende forsøk med høyhastighetskamera, er det mulig å sammenlikne tiden grafen indikerer platen er i fritt fall med det vi ser på opptaket. Fra 4.3.2.1.3 *Forsøk 4* vet vi at fritt fall varer  $\Delta t = 150$  ms. Ved å se på opptaket bilde for bilde, er det mulig å se tidspunktet platen blir truffet av loddet, samt når platen treffer bremsedemperne. Differansen mellom de to tidspunktene tilsvarer 153 ms.

I korte trekk kan vi dermed påstå at av de tre siste pulsene i akselerasjonsmålingene er det i den siste, og største, at aluminiumsplatene og loddet treffer støttebeinene. Om de to pulsene før dette kommer av en oppdelt bremsing grunnet gamle bremsedempere, eller om platen faller skjevt, er usikkert.

### 5.1.3 Støy i akselerasjonsmålinger

Akselerasjonsmålingene fremstår jevnt over «hakkete». Hva denne støyen kan komme av vil videre bli diskutert.

Under gjennomføring av de ulike forsøkene, forekom det en merkbar vibrasjon i rommet, og spesielt i området i nær tilknytning til fallmaskinen, som følge av at loddet ble sluppet og traff støttebeina. At disse vibrasjonene har blitt synlig i akselerasjonsgrafene for pådraget, og muligens responsen, kan ikke utelukkes. I tillegg er det mulig at aluminiumsplatene begynner å svinge med en egenfrekvens idet loddet treffer, som igjen kan føre til støy i målingene. Samtidig er det usikkert hvor godt aluminiumsplatene klarer å holde på en vibrasjon med et seks tonns lodd liggende over seg.

I 4.3.2.2.1 *Samtlige forsøk* ble det nevnt hvordan den målte responsen har en høyfrekvent svingning i signalet. Denne svingningen antar vi å komme av vibrasjoner i stålplaten som henger under sjokkdemperne. Slike vibrasjoner i metaller kommer gjerne av en tone som oppstår idet metallet blir utsatt for et slag. Det ble gjennomført et enkelt forsøk hvor stålplaten ble forsøkt å fremprovosere en tone for. Dette ble gjennomført ved å ta målinger av at en skiftenøkkel ble slått i den hengende stålplaten. Umiddelbart oppsto en tone som kunne høres. Målingene, som man finner i figur 4.4, viste at det vi antar er egenfrekvensen til stålplaten kunne måles her. Pådraget vil dog ikke påvirkes i noen særlig grad av slike vibrasjoner fra stålplaten under sjokkdemperne.

En annen mulig forklaring, for pådragets del, er et løst feste på akselerometret. Dette vil bli videre diskutert i kapittel 5.4.3 *Feste til sensorene som feilkilde*. Sannsynligheten for at det er dette som er feilen er relativt liten da festet ikke løsnet hver gang, samtidig som at akselerasjonsmålingene er veldig like med tanke på støy i målingene.

Samtidig kan det ikke utelukkes at det har forekommet alias i signalet, grunnet undersampling, selv om analog-til-digital-omformerens har et antialiasing-filter plassert rett etter inngangen til signalet. Vi kan ikke med sikkerhet si at filteret har gjort jobben sin.

Fra diskusjonen over kan vi anta at støyen som kommer til syne i akselerasjonsmålingene har diverse faktorer som årsak, men hva som har størst påvirkning for inngangssignalet er vanskelig å fastslå uten videre målinger.

## 5.2 Sjokkresponspekter – analyse

I denne delen av analysen skal oppgaven ta for seg den teoretisk fremstilte responsen opp mot den målte responsen fra akselerometrene. Som nevnt tidligere i oppgaven benyttes SRS for å forutse en tilnærmet maksverdi til responsen for et gitt fjærssystem. Fokuset i analysen blir å se på hvor godt SRS har klart å predikere en respons, hvor vi først tar for oss akselerasjonen, og deretter pseudo-fart og pseudo-forflytning.

### 5.2.1 Akselerasjon

Når et sjokkresponspekter dannes i Python går programmet først gjennom en utregning med flere ulike egenfrekvenser hvor det predikeres en respons, som man kan se i figur 4.20. Deretter tas maximax ut av disse predikasjonene for å danne et SRS. For å se hvor kapabel denne metoden er til å predikere en respons ser vi først på figur 4.18. Grunnen til at det er plottet to ikke-reelle responser, er fordi utregningen gjort for egenfrekvensen til fjærssystemet er forenklet, og vi ønsket dermed å ta med en egenfrekvens som er hentet ut fra responsmålingene. I dette forsøket klarer ingen av de to egenfrekvensene å følge svingningene til den faktiske responsen, og det er flere sprik mellom verdiene. Den kanskje viktigste forskjellen er at for begge frekvensene er maximax feil opp mot den største målte akselerasjonen i responsen. Ved omtrent  $t = 190$  ms faller begge predikerte responser vekk fra tidsaksen, noe som ikke kommer fra en feil med utregningen. Årsaken til det store spriket i verdiene kommer av at pådraget som SRS tar utgangspunkt i, ikke har rukket å stabilisere seg rundt tidsaksen, slik man kan se i figur 4.8. Dermed vil denne feilkilden bli en følgefeil i utregningen til den predikerte responsen.

Selv grafen i figur 4.18 ikke følger den reelle responsen til fjærssystemet, er det mulig å se i figur 4.20 at egenfrekvensen på 22,79 Hz har en maximax som er tilnærmet lik den reelle maksimale akselerasjonsmålingen. I tillegg følger responsen den reelle grafens



kurver i stor grad, med enkelte unntak. Dermed kan det virke som at SRS fungerer dersom pådraget som blir lagt inn ikke inneholder feilkilder.

En feil som kom frem ved lesing av figur 4.17, idet vi leste av egenfrekvensen  $f_n = 12,91$  Hz til fjærsystemet, var at maksimal predikert akselerasjon ut ifra spekteret ikke stemte over ens med den som ble plottet i figur 4.11. Årsaken til dette kan komme av at prosessen i Python ikke inneholder akkurat denne frekvensen, og det blir dermed feil i spekteret. Dette er fordi utregningene som predikerer en respons går gjennom et spekter av frekvenser, Ved å lese av den korresponderende maksimale akselerasjonen til  $f_n = 22,79$  Hz i spekteret, legger vi merke til at denne stemmer overens med det som blir prediket i figur 4.18.

Selv om figur 4.18 inneholder feilkilder, samt at maximax til  $f_n = 22,79$  Hz ligger over den faktisk målte responsen, må ikke det bety at metoden bør forkastes dersom et pådrag inneholder mulige feil. Hensikten til SRS å kunne predikere hvordan et spekter av egenfrekvenser vil respondere på et pådrag. Dermed kan dette brukes til å predikere hvordan en komponent ombord vil respondere på et bestemt sjokk, og om komponenten, ut ifra den informasjonen, vil tåle det den utsettes for. Ut ifra denne hensikten kan man stille spørsmål ved viktigheten av at den predikerte responsen klarer å følge kurven til den faktiske responsen, versus å kunne predikere maks akselerasjon. Imidlertid er det nødvendig å påpeke at en sjokktest ofte medfører vibrasjoner i konstruksjonen rundt. Dette kan også påvirke konstruksjonen rundt akselerometrene, og gjør det vanskelig å bruke den målte akselerasjonen fra et sjokk til å teoretisk fremstille en respons. Dette kommer av utfordringen ved å ta hensyn til alle faktorene som spiller inn i et slikt forsøk (Harris & Piersol, 2002, s. 23.1). For eksempel har vi ikke tatt hensyn til stålplatens egenfrekvens, som påvirker målt respons. I tillegg vet vi at akselerometeret som har målt pådraget ikke har målt den største maksakselerasjonen, da måleutstyret gikk i metning. Av den grunn er ikke resultatene nevneverdige pålitelig.

## 5.2.2 Pseudo-fart og pseudo-forflytning

Når det kommer til pseudo-fart og pseudo-forflytning, tar utregningen for å komme frem til verdiene utgangspunkt i maximax, som blir forklart i 2.3 *Sjokkresponspekter*. Dermed vil feil i SRS for akselerasjon ha følgefeil ned til disse to responspektrene. Med tanke på pådraget brukt i figur 4.17, forventer vi ikke at pseudo-fart og pseudo-forflytning klarer

å gi en riktig predikering av maks fart og forflytning. Hvilket blir bekreftet når vi leser av tilhørende verdier til fjærsystemet. Allikevel er pseudo-farten og pseudo-forflytningen nærmere den faktiske maksfarten og maksforflytningen enn de verdiene vi leser av figur 4.19. Hvorfor det blir så store sprik mellom predikerte og reelle verdier er vanskelig å fastslå, da det er en betydelig grad av usikkerhet knyttet til problemet.

### **5.3 Sensor og DAQ – styrker og begrensninger**

For å se på datainnsamlingssystemets, samt sensorenes, styrker og begrensninger vil denne delen av analysen ta for seg måleområdet til sensorene, erfaringer fra bruk av samplingsfrekvens i forsøkene, samt erfaringer gjort med datainnsamlingssystemet og ulike programvarer.

#### **5.3.1 Måleområde for sensorene**

I dette delkapittelet vil vi gå gjennom måleområdet for sensorene, samt erfaringer gjort fra forsøkene med de ulike akselerometrene.

I oppstartsfasen av sjokkmålinger med fallmaskinen ble det oppdaget at den ene C53-sensoren var defekt. Dermed var det kun én sensor igjen som kunne måle pådraget.

Til å begynne med ble det gjort målinger ved en høyde på 50 mm og en sampling på 10 kHz. I disse målingene var det store likheter i «karakteristikken» i akselerasjonsgrafene, men maksimum og minimum akselerasjon var varierende, se figur 4.1. Et fåtall av disse forsøkene viste at C53-sensoren målte over den maksimale akselerasjonen sensorene er i stand til å håndtere. I tillegg lå de fleste akselerasjonspeakene i forsøkene over måleområdet sensoren er egnet til. Merk her at den maksimale akselerasjonen sensorene er i stand til å håndtere, er dobbelt så stor som måleområdet til sensorene, ref. 3.2.4.1 *Akselerometer med forsterker*. Grunnet tvil ved størrelsen på de målte akselerasjonene, ble det valgt å fortsette testingen, men ved en lavere høyde. Variasjonen i målingene gjorde at det ble mistenkt at samplingsfrekvensen var for lav for det målte signalet, og den ble dermed økt til 20 kHz. I de neste forsøkene ble det oppdaget at målingene i større grad målte over den maksimale akselerasjonen sensoren kan håndtere. Da dette ble oppdaget ble det bestemt å avslutte målingene.

Tendensen som ble observert med en sampling på 20 kHz, var at repeterbarheten i maksimum og minimum akselerasjon var mye større, se figur 4.6. Sensoren ble maksimert nesten hver eneste måling. Det kan dermed antas at sensorene faktisk nådde sin begrensning ved 50 mm.

Når det gjelder B11-sensorene, opplevde disse ikke i nærheten av like store akselerasjoner. Dette er fordi sjokkdemperne dempet godt. Ved å demontere C53-sensorene var det mulig å øke slipp høyden til loddet uten å risikere å ødelegge C53-sensorene.

Under resultat 4.15 og 4.16 ble grafene for responsen ved 100 mm høyde, presentert. Hensikten med å øke loddet for kun å teste B11-sensorene, var å bidra til kartlegging av måle-området til sensorene. Slik man kan se på grafene, når akselerasjonene under 10 % av måle-området som sensorene er designet til å måle. Dette er med utgangspunkt i at instruksjonen til sensorene har oppgitt at B11-sensorene kan måle opp til 1000 g, slik som beskrevet i *3.2.4.1 Akselerometer med forsterker*. Dette tilsier at B11-sensorene tåler en vesentlig økning av loddets slipp høyde. Grunnen til at en økning av slipp høyden ikke gjennomføres, er at de ikke har blitt fastslått hvor mye sjokkdemperne tåler. I tillegg er det ikke av interesse å utfordre hva sjokkdemperne tåler, da disse skal brukes i undervisning fremover og ikke skal være utslitt, eller ødelagt, etter kun én testperiode.

Det er ikke blitt fremlagt en tydelig sammenheng mellom maksimal akselerasjon på responsen og hvilken høyde loddet slippes fra. Variasjonsspennet varierer omtrent over samme område for både 30 mm og 100 mm. Om det er ønskelig å for eksempel kartlegge en evt. lineær sammenheng mellom loddets slipp høyde og målt respons, er man avhengig av vesentlig flere målinger fra flere høyder.

Videre ble det under *4.3.4 Målt respons* kommentert at de to sensorene byttet på hvilken som målte høyeste akselerasjoner for de to gjennomføringene. Dette kan være tilfeldig, da det kun ble gjennomført to målinger. Resultatet indikerer dog at reaksjonen til stålplaten som sjokkdemperne demper for, er noe ulik fra gang til gang. Dette kan støttes opp under ved å se på figur 4.4 og figur 4.10 hvor samtlige målte responser er lagt inn. Her ser man at det er variasjon i maksimal akselerasjon uavhengig av om at det er sensor 3 eller 4 som har registrert. At det forekommer forskjeller i målingene kan ha flere årsaker. Blant annet kan det komme av ulik nullpunktkorrigerings, hvor den ene sensoren måler høyere verdier enn den andre. En annen mulig forklaring kan være kalibreringen

av følsomheten til den enkelte sensoren. Selv om kalibreringen er gjort av leverandøren innebærer slike kalibreringer en viss usikkerhet ved ulike frekvenser.

Derimot om man tar utgangspunkt i at sensorene måler rett, bør derfor denne differansen komme av mekaniske årsaker fra selve sjokkgjennomføringen.

En faktor som kan ha hatt innvirkning på disse differansene, er at innfestningen ikke er plassert på midten av aluminiumsplatene. Dette er fordi gjengehullene på platen ikke tillater å feste innfestningen på midten. Plasseringen kan være med på å forsterke en eventuell skjevfordeling av krefter som kommer fra loddets fall. At det ikke alltid er den ene av sensorene som måler høyere enn den andre, tilsier at det er noe med fallmaskinen som er vanskelig å gjøre helt repeterbart. Små forskjeller, som for eksempel noe variasjon i hvordan armen slipper loddet, kan få forsterkede reaksjoner for akselerometrene. I tillegg vet vi at avstanden mellom loddet og aluminiumsplatene varierer med opptil 1 cm ut fra hvor på loddet man måler. Slike faktorer kan være med på å påvirke at utslagene på de to sensorene varierer fra forsøk til forsøk. Det er også mulig, slik som det er blitt kommentert tidligere, at en for lav samplingsfrekvens er med på å fremstille denne forskjellen større enn den egentlig er.

Det kan dermed ikke fastslås hvorfor disse variasjonene i maksimal akselerasjon oppstår med de målingene som er blitt gjennomført. Det som kan slås fast er at målingene som er fremlagt i figur 4.15 og 4.16 tilsier at B11-sensorene tåler å bli utsatt for høyere akselerasjoner enn de har blitt utsatt for under disse forsøkene.

Selv om C-53 akselerometeret ikke var egnet til å måle de høye akselerasjonene den ble utsatt for, var det ikke sensoren alene som begrenset måleområdet. Ved nærmere undersøkelse fant vi ut at det var inn-ut-modulen brukt i datainnsamlingen sin begrensning på  $\pm 10.000$  mV, som var årsaken til at pådragsmålingene gikk i metning ved omtrent  $102.000 \text{ km/s}^2$ . Begrensningen er knyttet opp mot følsomheten til akselerometrene, som likningen i 3.2.4.1 *Akselerometre med forsterker* viser. Dermed vil målingene gå i metning ved ulike verdier avhengig av sensoren. Samtlige innganger kan måle opp til 10.100 mV, med unntak av inngang 1 som kan måle til 10.098 mV. Maksimal akselerasjon mulig å måle sammen med de ulike akselerometrene blir da: sensor 4:  $19.611,7 \text{ m/s}^2$ , sensor 3:  $19.056,6 \text{ m/s}^2$  og sensor 2:  $101.712 \text{ m/s}^2$ .

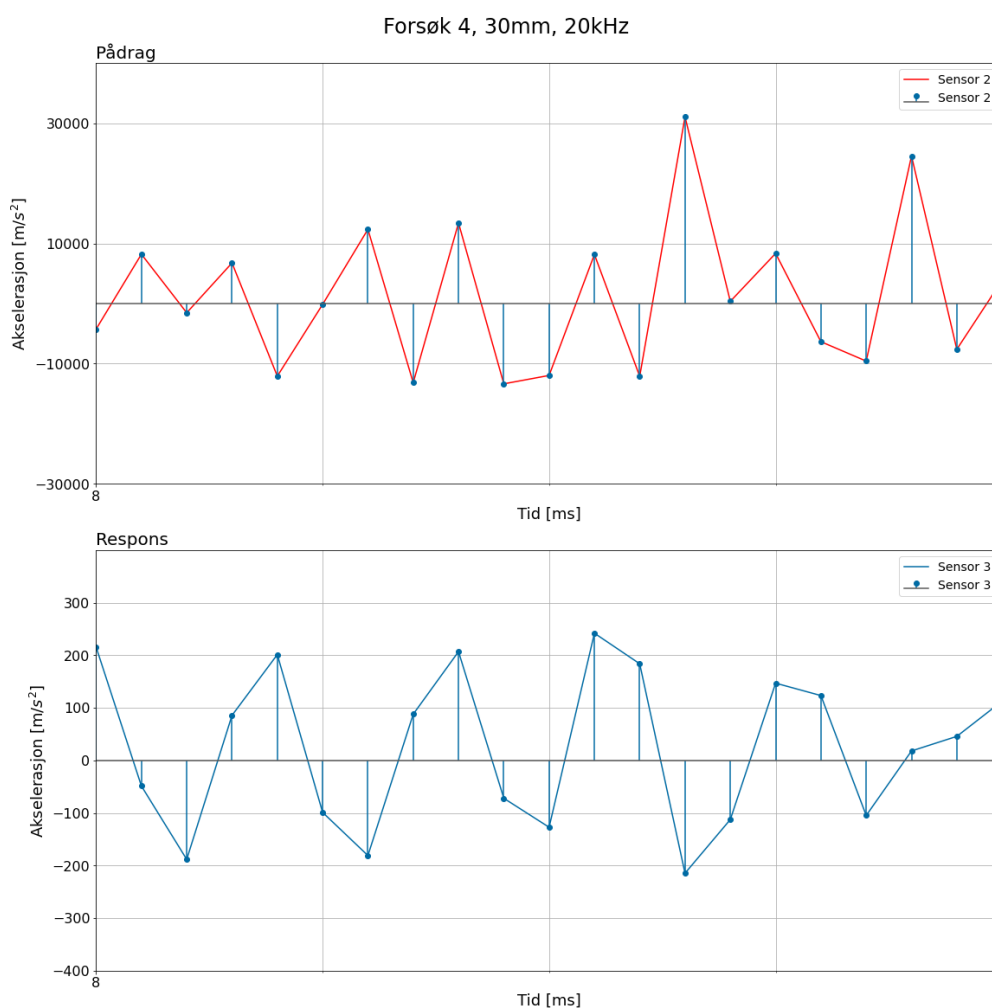
Dermed er det mulig å anta at B11-sensorene, sammen med måleområdet til XL A111, er tilstrekkelig. Dette gjelder både for slipp høyden de har blitt utsatt for under våre forsøk, men også med en økning i slipp høyden uten å fastslå hvor stor økning.

### 5.3.2 Samplingsfrekvens

Som nevnt la vi merke til at samplingsfrekvensen under testingen fra 50 mm var for lav, grunnet differansen i topp- og bunnpunkter mellom hvert forsøk. Vi antok at differansen kom av for lav samplingsfrekvens i forhold til frekvensen til sjokket, og at pådraget dermed ble undersamlet. Av den grunn kan amplituden på målingene ha vært avhengig av hvor vi treffer på 1/10.000 deler sekundet med samplingen, og dermed treffe «bølgen» til signalet ulikt for hvert forsøk.

Selv med en økning til 20 kHz som samplingsfrekvens, ble målingene spisse, se figur 5.2, og det er mulig å anta at dette også ble for lavt. Samtidig virker ikke samplingsfrekvensen på 20 kHz helt feil, da vi i integreringen av responsen får glatte kurver med lite til ingen støy. Selv med en samplingsfrekvens på 10 kHz, se figur 4.5, blir fartsgrafen relativt jevn, med noen få unntak der akselerasjonen er størst. Dette kommer trolig av at samplingsfrekvensen i disse områdene ikke klarer å få med seg alle endringene som skjer i akselerasjonen, hvilket kommer til syne når målingene skal integreres. Samme tendens er det mulig å se i figur 4.11 og 4.12. Allikevel virker samplingsfrekvensen på 20 kHz tilstrekkelig til å få med seg endringene som skjer ved den første pulsen, og vi får en kontinuerlig kurve ved første fartsøkning. Derimot ved de største akselerasjonsendringene blir fartskurven ujevn, hvilket kan bety at samplingsfrekvensen ikke er stor nok.

I integreringen av pådraget blir denne problematikken enda tydeligere, da det er snakk om større endringer over samme tidsintervall, se figur 4.7. At vi undersampler inngangssignalet fører til at integreringen i Python ikke får den informasjonen den trenger for å kalkulere og dermed plote en fart- og forflytningssgraf som gir reelle verdier. Vi sitter dermed igjen med uekte verdier grunnet unøyaktige målinger.



**Figur 5.2** - Begge grafene er et utklipp fra figur 4.9, og tar for seg hva som skjer i den første pulsen til sjokket. Øverste grafen viser pådraget målt, legg merke til hvor få punkter det er for hver svingning. Nederste viser responsen målt, legg merke til at det er flere målinger per svingning.

For å finne egnet samplingsfrekvens, er det ønskelig å finne Nyquist-frekvensen. Vanligvis gjøres dette med en enkel fouriertransformasjon, men som nevnt i 2.3.2 *Fouriertransformasjon* fungerer ikke fourier optimalt sammen med sjokkmålinger. I tillegg er det nødvendig å ha en større samplingsfrekvens enn Nyquist-frekvensen for å deretter finne Nyquist-raten. Dermed så vi for oss å øke samplingsfrekvensen til 100 kHz, og heller redusere den dersom vi så det mulig. Siden forsøkene ble avbrutt, ble det ikke funnet en god nok samplingsfrekvens.

Selv om vi økte samplingfrekvensen, var ikke økningen tilstrekkelig, og resultatene ble fortsatt preget av mangel på informasjon under integreringen. Ved å gjennomføre forsøkene med en høyere samplingsfrekvens vil det i større grad være mulig å få realistiske verdier i fart- og forflytningsgrafene, som vil hjelpe med å skape en større forståelse for hvordan sjokket fra Sjøkrigsskolens fallmaskin er bygd opp.

### 5.3.3 Datainnsamlingssystem med signalbehandlings- og analyseprogram

En økning i samplingsfrekvensen er fullt mulig da omformerer, samt kontrollenheten, brukt til å måle akselerasjonene kan måle opp til 100 kHz på fire kanaler. Det er dermed hverken akselerometrene eller datainnsamlingssystemet som begrenser denne muligheten. En utfordring som kan oppstå ved bruk av høyere samplingsfrekvens er at det blir logget større filer, som vil kreve mer av programmene som skal behandle disse filene. Allerede med en samplingsfrekvens på 20 kHz ble dette lagt merke til under plottingen av grafer i Python, spesielt under iterasjonene for å få frem et SRS. Derimot i GI.bench, programmet brukt til å logge målingene, og LabVIEW, programmet brukt til å avgrense filene til ønsket område, var det ikke indikasjoner på dette problemet.

Årsaken til at GI.bench ikke slet med å behandle loggingen av målingene med en samplingsfrekvens på 20 kHz, kommer trolig av at programmet ikke har blitt brukt til mer enn nettopp logging. GI.bench har flere funksjoner som man kan benytte seg av. Blant annet er det mulig å konfigurere et Dashboard som monitorerer målingene fra akselerometrene i sanntid, i tillegg til at man kan logge målingene. Ved å utvide kjennskapen til GI.bench kan man muligens finne løsninger som gjør at man ikke trenger å bruke LabVIEW som et mellomledd i signalbehandlingen. For å få utnyttet GI.bench på denne måten er man avhengig av en PC som har stor nok kapasitet til å lese av verdiene til sensorene i sanntid, samt fremstille verdiene grafisk. Til gjengjeld kan det gi en økt forståelse av fallmaskinens karakteristikk (Gantner Instruments, 2023)

LabVIEW ble brukt til å gjennomgå hvordan målingene så ut grafisk, samt manuelt nullpunktskalibrere målingene. Fordelene med programmet var at den grafiske fremstillingen gikk raskt, og det var enkelt å zoome inn for å bli kjent med utformingen til signalet. Allikevel ble det tungvint å ha et mellomledd, når mye av det som ble gjort i LabVIEW trolig kan konverteres til både GI.bench og Python. I tillegg førte den manuelle kalibreringen til noe usikkerhet i grafene, hvilket kunne blitt automatisert i Python med riktig programmering.

Som nevnt ble det tyngre for programmet i Python å kjøre gjennom skriptet ettersom filene ble større. I og med at tidligere erfaringer med programmering var mer overførbart til Python, enn LabVIEW opplevdes Python som mer fleksibelt. I tillegg finnes det mye hjelp å få fra nettet, med blant annet ulike bibliotek som er mulig å anvende i skriptene sine. For å unngå at Python, eller andre programvarer, skal kreve for mye av en PC, er

det mulig å bytte ut Windows med et annet operativsystem som ikke bruker like mye minne på RAM (Random Access Memory), som for eksempel Linux.

Datainnsamlingsutstyret, samt de ulike programvarene brukt for innhenting og behandling av data har vært tilstrekkelig, med unntak av måleområdet til sensorene og til dels måleområdet til omformerer. Dog er det ønskelig med et raskere opplegg, som eksempel ved å utnytte seg av Linux istedenfor Windows, hvilket kan føre til større fleksibilitet i bruk av programvarer. Det vil for eksempel kunne gi større muligheter innenfor bruken av GI.bench, samt gjøre det mulig å utvide programmet i Python uten å gå utover tiden det tar å kjøre gjennom skriptet.

## 5.4 Oppsettet for øvrig – styrker og svakheter

Under oppsettet for øvrig vil enkelte spesielt relevante komponenter bli kommentert. Utvalgte temaer som ønskes å kommenteres er bremsedempernes grad av nedbremsing, høyhastighetskamera og dens relevans til oppgaven, samt feste til sensorene.

### 5.4.1 Bremsedempere sin grad av nedbremsing

Ved første øyekast virker det ikke som at de bremsedemperne gjør mye fra eller til fordi fallet skjer så fort. Slike hastigheter som oppnås under testgjennomføringene, over så kort tid, er imidlertid umulig å si noe om uten anvendelse av diverse verktøy.

I 2.1.2 *Nedbremsing* ble det lagt frem sammenhengen mellom masse, hastighet i øvre og nedre posisjon, tiden og kraften bremsedemperne påvirker platen med.

$$\Delta p = F\Delta t$$

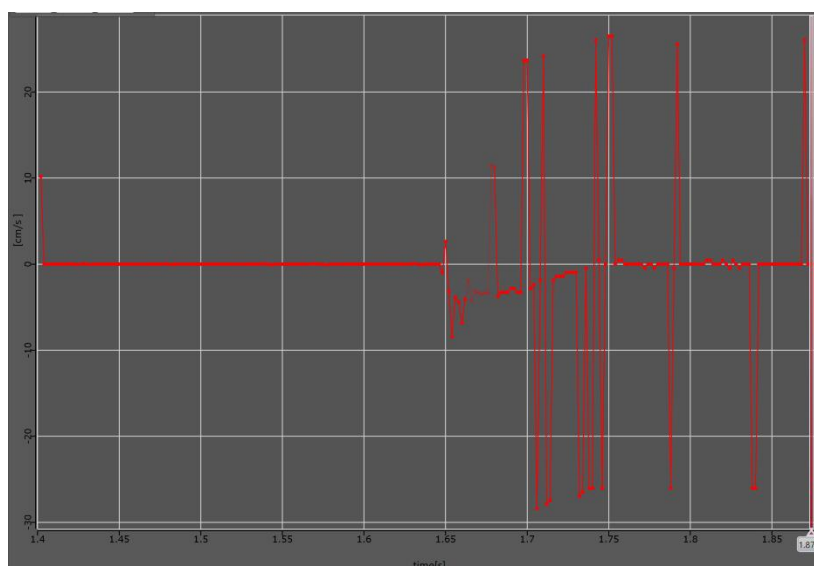
$$m(v_f - v_i) = F\Delta t$$

Fartsgrafene som er fremstilt utfra sensorene under forsøkene, gir ikke noen tydelig indikasjon på hva farten kan være rett før sammenstøt med støttebeina. Derfor ble det gjort et forsøk på å måle farten ved hjelp av høyhastighetskameraet. Ved å markere visse størrelser i bildet for å få en referanse i kamera, samt tracke avstanden mellom øvre punkt og nedre punkt på bremsedemperne, klarer programmet å danne en fartsgraf. Fartsgrafen



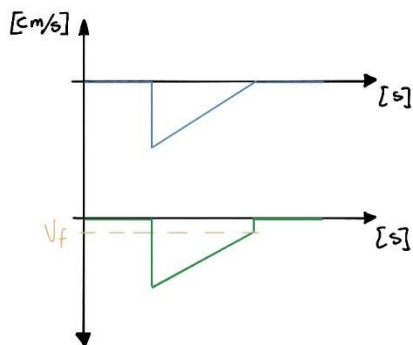
viser sammenhengen med bildet vi ser samtidig og farten. Det er allerede etablert at nøyaktige målinger ikke egner seg særlig godt ved bruk av høyhastighetskameraet, så dette blir en tilnærming.

I figur 5.3, hvor x-aksen er tiden og y-aksen er cm/s, ser man en ganske tydelig tendens til en veldig hastighetsøkning, etterfulgt av en tilnærmet lineær hastighetsreduksjon ned til null. Støyen man kan se i samme figur, hvor farten har plutselige hopp opp eller ned, kommer mest sannsynlig av den manuelle samlingen og dens begrensninger. Her er det verdt å merke seg at det er en dupp mot slutten av denne lineariteten. Dette indikerer at det er en viss hastighet på platen aluminiumsplatene før den stoppes helt av støttebeina, altså at farten ikke er helt lineær ned mot null.



**Figur 5.3** - Fartsgraf produsert av analyseprogrammet til høyhastighetskameraet ut fra manuelt markerte samplinger i bildet.

I figur 5.4 kan man se en skissert tilnærming av hvordan man kan tolke denne grafen. Nederst i figuren er det tegnet inn  $v_f$  som antyder at platen har en fart før den treffer beina. Over er det skissert en fremstilling som neglisjerer denne «duppen». Denne tilnærmingen er dermed naturlig å anta at stemmer, da målingene i fartsgrafene ikke er av særs høy nøyaktighet i utgangspunktet.



Figur 5.4 - Forenkling fartsgraf fra høyhastighetskamera

Om bremsedempene kan antas å ha en lineær nedbremsing, er tilnærmet umulig å si ut fra målingene gitt av akselerometrene slik de er nå. Med de forenklingene høyhastighetskameraet har, kan man derimot anta at en slik tolkning kan stemme. Ved anskaffelse av sensorer som kan måle et pådrag fallmaskinen produserer, samt generelle utbedringer ved systemet, vil man kunne si noe mer om hvilke en effekt bremsedempene har.

## 5.4.2 Høyhastighetskameraets relevans

Høyhastighetskameraet var ment som et supplement til målingene, for å kunne gi en bedre helhetsforståelse av hva målingene betyr. I figur 5.5 er et utklipp fra en av målingene som er tatt. De fleste ser helt like ut. Bildet ser ut som at det er kuttet på venstresiden, men dette kommer bare av at en av de regulerende støttene kom i veien for å få et bilde som var rett på sjokkdemperen. Både belysning, fokus og bildefrekvens vil kommenteres.

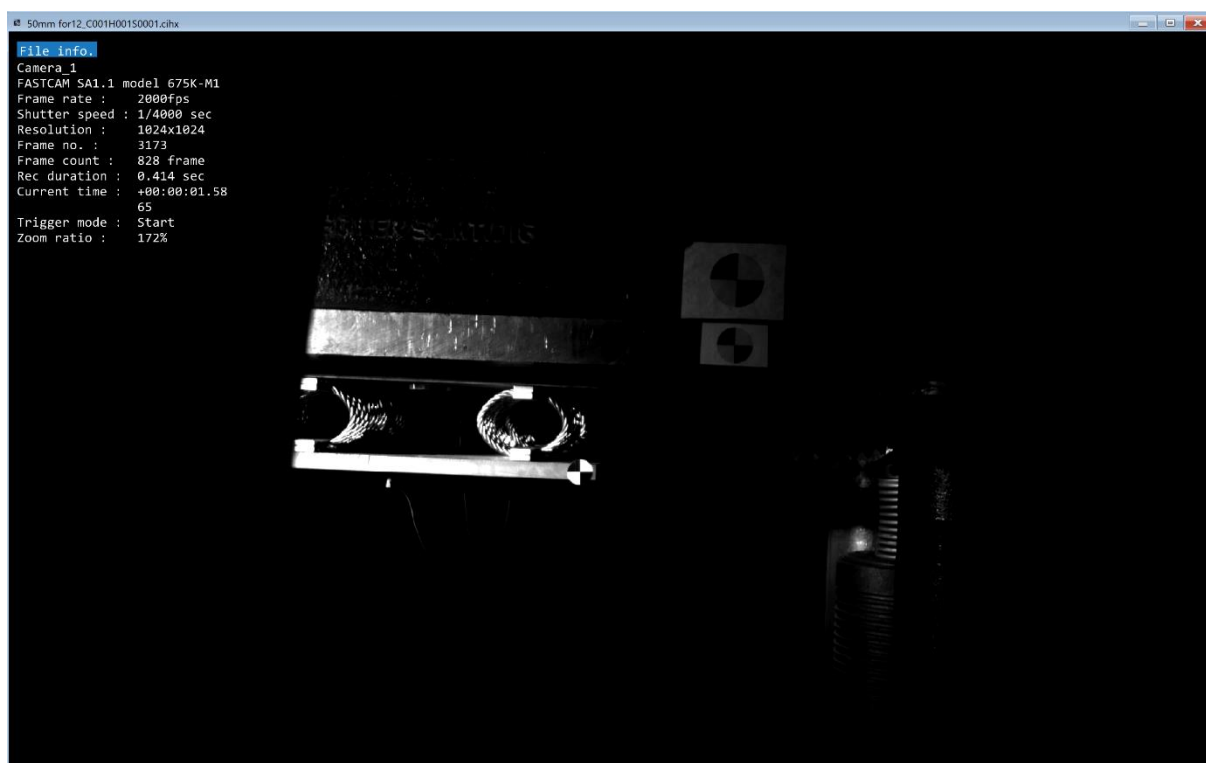
Kameraet har blitt brukt til noe beregning og mest for å se sammenhenger mellom målingene fra akselerometrene. Analyseprogrammet tilhørende kameraet, ble brukt for å måle avstander i sjokkdemperen ut fra bevegelsene, samt beregne et estimat på farten til nedbremsingen. I opptaksprogrammet ble hendelsesforløpet til fallet målt og sammenliknet med målingene fra sensorene. Underveis ble opptakene også brukt som en sikkerhet; hvis noe utenom det vanlige skjedde med en måling, kunne vi se på opptaket for å finne en forklaring på hva som skjedde. Eksempelvis fikk kameraet med seg da festet til sensoren knakk. Selv om målingene i analyseprogrammet er et estimat, fungerte kameraet godt til de oppgavene den ble brukt til i beskrivelsen over.

Innledningsvis var det enkelte problemer med høyhastighetskameraet som ikke var definerende for dens relevans, men heller ble faktorer som måtte tas hensyn til. Kameraet har åpenbart en for høy bildefrekvens for at man kan anvende taklyset da taklys opererer med enten 50 Hz eller 60 Hz, slik som diskutert i 3.5.3 *Høyhastighetskamera*. Dette ble som nevnt tidligere løst ved hjelp av en lyskaster med likestrøm, som dermed ikke blinker. Under målingene ble det allikevel avdekket et behov for ytterligere belysning. Dette fordi bildet ble veldig mørkt da man økte bildefrekvensen, som man også kan se i figur 5.5. Fordi denne oppgaven ikke krevde stor grad av regning og analysing i programmet tilknyttet høyhastighetskameraet, var ikke dette et altfor stort problem. Når formålet med kameraet er å fungere som en støttefunksjon til sensorene og kun vise til hva som skjer når, er dette dekkende. En mulig retning å gå i, også for vår oppgave, er å gjøre målinger og beregninger med kameraet i større grad og sammenlikne disse med hva sensorene måler. Dette er det ikke blitt fokusert på, men enkelte unntak, grunnet begrenset tid. Om man skulle hatt et større behov for å gjøre målinger og beregninger, anbefales det derfor å gå til anskaffelse av ytterligere belysning.

I tillegg til at lys var en begrensning på hvor høy bildefrekvens som kunne anvendes, hadde også internminnet til programmet sine begrensninger. For høy bildefrekvens gav for store filer som programmet ikke klarte å håndtere. Igjen, denne oppgaven krevde ikke for høy bildefrekvens, men mer nøyaktige målinger og beregninger vil kreve dette. Dermed er dette et hensyn som må tas, om kameraet skal ha større plass i videre testgjennomføringer.

Videre måtte det tas et valg på hva som skulle være fokuset under gjennomføringene. Kameraet egner seg ikke til å filme forsøk som inneholder dybde, da kameraet ikke klarer å fokusere på mer enn én ting om gangen. Det som ikke var i fokus, ble veldig utydelig. I vårt tilfelle måtte man velge mellom å fokusere på merkelappen på sjokkdemperne eller på aluminiumsplaten. Det var mulig å se det andre merket også, men mye vanskeligere å klare å tracke i ettertid. Dette kan man tydelig se i figur 5.5.

Konklusjonen er at kameraet fungerte bra som supplement til sensorene og datainnsamlingsutstyret i vårt tilfelle. Med de begrensningene på kamera som er listet over, bør dette tas til betraktning om man i fremtiden ønsker å øke høyhastighetskameraets relevans i en liknende oppgave.



*Figur 5.5 - Utklipp fra programmet Photron FASTCAM Viewer tilhørende høyhastighetskameraet*

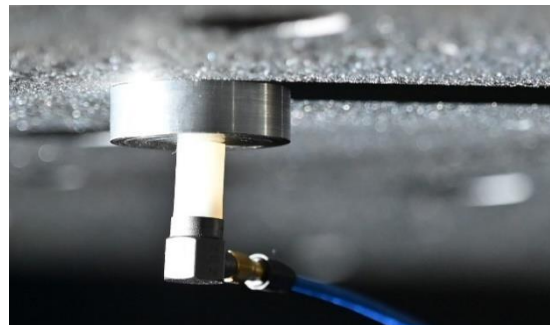
### 5.4.3 Feste til sensorene som feilkilde

Festene til sensorene er som sagt av særs små dimensjoner og måtte produseres lokalt. Det er ikke blitt satt av tid til å teste hva som må tas hensyn til med slike konstruksjoner. Derfor vil enkelte feilkilder med disse festene fremlegges.

Sensor C53 løsnet noe i festet mellom sensoren og kabelen etter enkelte gjennomføringer. Det gjorde aldri festet mellom B11-sensorene og respektiv kabel. Dette kan skyldes at festet til den ene C53-sensoren ikke var like godt. Den andre sensoren ble ødelagt før det ble gjennomført en sammenlikning av dette. Samtidig kan det også bare være at akselerasjonen C53-sensoren måtte tåle var mye større enn det B11-sensorene måtte tåle, og at den dermed løsnet enkelte ganger. Teorien kan understøttes av en hendelse hvor den ene festeskruen til C53-sensoren knakk under en gjennomføring. Dette er selvdreide (av Frode Wikne) fester av stål, så det ble bare produsert et nytt, men det illustrerer hvor store krefter det er snakk om. Ingen flere festeskruer ble ødelagt under videre målinger.

En annen faktor er at når innfestningen er manuelt gjenget, er det ingen garanti for at det blir helt rett. Dermed kan sensorene stå litt skjevt, som har noe å si for målingen. Dette er relevant fordi sensorene kun måler i z-retning, altså i fallretning.

Som nevnt tidligere vil ikke sensorene klare å detektere sidebevegelse, altså retning i x- og y-retning. Det er vanskelig å se med det blotte øyet om sensorene er festet skjevt, men man kan se en antydning til et skjevt feste på sensor B11 grunnet dens ekstra forlengning på festet. Se figur 5.6.



*Figur 5.6 - Mulig skjevhet i festet til sensor B11*

Om dette kommer av gjengingen eller av at plastikk-skruen er noe skjev, er vanskelig å si for sikkert. I tillegg er det godt mulig at den bare ser noe vinklet ut på bildet, men at den egentlig ikke er det. Det var som sagt omtrent ikke synlig med det blotte øye.

Hvilken innvirkning disse faktorene hadde på målingene, er det vanskelig å uttale seg om. Om det hadde noen innvirkning er det blitt neglisjert i resultatene, men er oppført som en mulig feilkilde.

## **5.5 Teoretisk fremstilling sett opp mot realiteten**

I delkapittelet om teoretisk fremstilling sett opp mot realiteten vil det bli regnet på høyde på loddet og forskjellige tilnærminger til energiabsorpsjon, drøftes rundt de høye verdiene på målt akselerasjon, samt legges frem en kort sammenlikning av sjokket opp mot en eksplosjon.

Dette kapittelet er relevant for å se på hvor godt akselerometrene og datainnsamlingssystemet fungerer sammen med fallmaskinen, fordi det reflekteres rundt målingenes troverdighet. I forsøket anses det som viktig å se på sammenhengen mellom teori og realiteten for å øke forståelsen for hva som skjer under forsøket. Dette gjennom å gjøre teoretisk beregninger og se på fysikken bak hva som skjer under forsøket, selv om teorien

### 5.5.1 Høyde på loddet og energioverføring

Det vil i dette delkapitlet bli undersøkt om det er mulig å finne en estimert verdi på hvilken høyde man kan slippe loddet fra, uten å ødelegge sjokkdemperne. Det gjøres en forenkling av systemet hvor man tenker på loddets fall som en tilførsel av kraft, hvor loddet har potensiell energi:

$$E_p = mgh, [\text{Nm}]$$

Hvor  $m$  er massen,  $g$  er tyngdeakselerasjonen og  $h$  er avstanden mellom aluminiumsplatene og loddet. I programmet utgitt av leverandøren av sjokkdemperne er det oppgitt at ved maksimal kompresjon kreves det en energi på 85,58 Nm for hver enkelt demper. Gjør man forenklingen om at all energi fra loddets fall overføres til demperne, i tillegg til å ta hensyn til at det er fire dempere, kan man sette det opp slik:

$$4 \cdot 85,58 [\text{Nm}] = mgh$$

$$h = \frac{4 \cdot 85,58 [\text{Nm}]}{6000 [\text{kg}] \cdot 9,81 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]}$$

$$h = 0,0058 [\text{m}] = 5,8 [\text{mm}]$$

Utrekningen tar altså utgangspunkt i at all energi fra loddet blir overført til sjokkdemperne, samt at aluminiumsplatene står i ro idet loddet lander og ikke faller videre ned. Dermed er selve sjokket det regnes på her idet loddet faller på aluminiumsplatene hvor man ser bort fra alt som skjer etterpå. For å finne en høyde som faktisk er realistisk å bruke er det ønskelig å gjøre et estimat på hvor stor prosentandel av energien fra loddet som overføres. Mellom loddet og sjokkdemperne er det en aluminiumsplate på omtrent 200 kg og en stålplate på omtrent 35 kg, i tillegg til at loddet veier seks tonn. Her vil det gå energi tapt i form av lyd, vibrasjon og varme. Det er snakk om elastisk og plastisk energiabsorpsjon fordi metallene ikke er sprø, og det er viktig å huske at både aluminiumsplatene, stålplaten og loddet tar opp energi i sammenstøtet. I tillegg følger loddet fire rør i fallet som skal sørge for at loddet lander på rett sted, samt fire klaffer som holder aluminiumsplatene oppe. Her vil det gå energi tapt i form av motstand, friksjon og lyd.

Å regne på hvor stor prosentandel som vil gå tapt i en slik prosess er ekstremt kompleks. Ved kun å se på metallenes egenskaper i aluminiumsplatene, stålplaten og loddet utgjør dette ca. 1160 Joule i energiabsorpsjon. Det vil si at metallene alene absorberer 40 % av energien som oppstår i kollisjonen når loddet faller fra en høyde på 50 mm. Dette er blitt

utregnet gjennom å se på plastisk og elastisk energi ut fra spenning-tøyning-diagram for aluminium og stål. Det antas t at det er snakk om sann spenning til ut-herdet aluminium, samt sann spenning til normalisert stål. Det antas også at stålplaten og loddet er av samme materiale. Det er loddet som absorberer desidert mest i utregningene som er gjort, og det er ikke tatt høyde for i hvor stor grad de tre komponentene absorberer all energien som er regnet ut.

Utfra vedlegg E – *Skjær-spenning-grafer* har den elastiske og plastiske energien til stål og aluminium blitt lest av. Ved å se på den elastiske og plastiske energien i skjær-spenning-diagram kan man gjøre et anslag på hvor mye energi som absorberes grunnet materialenes egenskaper. Arealet under grafen, frem til flytegrensen i diagrammet, vil være den elastiske energien, mens arealet under resterende av grafen, frem til brist, vil være den elastiske energien. Både den elastiske og den plastiske energien oppgis i  $\text{J/m}^3$ .

For aluminium gir dette:

$$\text{Elastisk energi } E_{e,\text{alu}} = 2,4 \text{ J/m}^3$$

$$\text{Plastisk energi } E_{p,\text{alu}} = 56,6 \text{ J/m}^3$$

For stål gir dette:

$$\text{Elastisk energi } E_{e,\text{stål}} = 2 \text{ J/m}^3$$

$$\text{Plastisk energi } E_{p,\text{stål}} = 191 \text{ J/m}^3$$

Det presiseres at dette kun er et estimat, selv om det er blitt anvendt desimaler, da arealet under grafene kun er basert på øyemål.

Ved å ta hensyn til aluminiumsplatens, stålplatens og loddets vekt, samt summere den elastiske og plastiske energien, gir dette følgende:

Aluminiumsplaten: ca. 4,5 J

Stålplaten: ca. 1 J

Loddet: ca. 1156 J

Summen av dette blir omtrent 1160 Joule, slik som nevnt over. Det er altså loddet som tar opp mest av energien grunnet dens store masse. Ved å regne på den potensielle energien til loddet med en høyde  $h = 50 \text{ mm}$ , utgjør dette en energiabsorpsjon på omtrent 40 %.

En annen vinkling for å se på den prosentvise energioverføringen mellom lodd og system er ved å ta utgangspunkt i en måling. Under en testgjennomføring ble loddet sluppet fra 100 mm. Ved hjelp av høyhastighetskamera og en rask analyse av videoen, antas det at sjokkdemperne ikke når maksimal utstrekning eller kompresjon ved en slik slipphøyde, selv om den ikke var langt unna. Dermed kan man sette 100 mm som den maksimale høyden på loddet som demperne tåler. Anvender man så samme utregning som over, med potensiell energi og hensyn til en prosent,  $x$ , kan man estimere prosentandelen ut fra en forutbestemt høyde. Høyden,  $h$ , blir 500 mm fordi man må legge til 400 mm som er avstanden mellom aluminiumsplatene og støttebeina. Om det blir mest rett å si at vekten her kun er loddet eller om man skal legge til 200 kg er vanskelig å si. Utslaget på å legge til 200 kg i formelen er minimal og det anvendes derfor kun 6000 kg.

$$x = \frac{4[\text{stk}] 85,58[\text{Nm}]}{6000[\text{kg}] 9,81 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] h[\text{m}]}$$

Med utgangspunkt i 500 mm, som er blitt observert at sjokkdemperne tåler, får man en prosentandel

$x = 0,0116$ . At absorpsjonen er på 98,8 % virker veldig høyt, men kan stemme ut ifra beregningene som er gjort rundt påvirkningen av metallenes egenskaper, med tanke på hvor mange andre komponenter som også spiller inn, slik listet opp over. I tillegg vil mye av energien i kollisjon med støttebeina, gå tapt. Dette er også mulig å regne på. Det er også et viktig poeng at forutsetningene for de to fremstillingene er forskjellig. Øverst har vi at 40 % energiabsorpsjon i metallene er beregnet ut fra at aluminiumsplatene er stillestående i tillegg til at høyden er 50 mm. Videre regnes det på når loddet og platen faller sammen helt ned til støttebeina med en høyde på 100 mm mellom loddet og aluminiumsplatene.

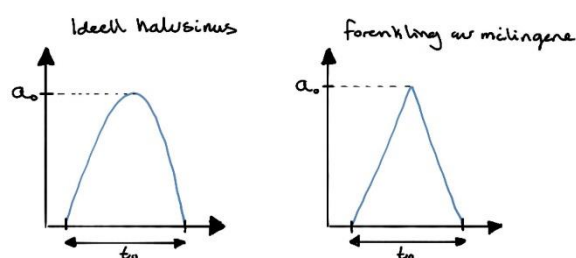
Enda en måte å anslå hva sjokkdemperne tåler, som er mer nøyaktig, er å analysere forflytningene på demperne med hjelp av høyhastighetskameraet og tilhørende analyseverktøy. Dette er tidkrevende og er ikke blitt prioritert i oppgaven, annet enn å sjekke at demperne ikke er blitt utsatt for *for* stor belastning ved 100 mm. Målingen som ble gjort er ikke lagt til i oppgaven og fungerte kun som en forsikring av at demperne tålte belastningen. Konklusjonen rundt hvilken høyde på loddet demperne tåler, blir med det at demperne i alle fall tåler 100 mm slipphøyde på loddet. Ytterligere målinger og forsøk er nødvendig for å konstatere hva de faktisk tåler i forbindelse med fallmaskinen.



### 5.5.2 Usikkerhet rundt målinger på akselerasjonen

Det ble tidlig stilt spørsmålstegn ved de høye akselerasjonene som ble målt. At det er snakk om så store akselerasjoner, virker ved første øyekast usannsynlig. Dette særlig i sammenlikning med målingene som ble gjort av Svarstad og Rød (Svarstad og Rød, 2021) ved samme fallmaskin. Våre målinger viser en vesentlig høyere akselerasjon enn det som ble målt i 2021 ved samme høyde. Svarstad og Rød hadde ikke moderne nok måleutstyr og analyseverktøy, så det er samtidig ikke direkte sammenliknbart. Ved regning og referanser til andre kilder vil det argumenteres for hvorfor målingene som er gjort under årets sjokkmålinger kan være riktig.

Willbrandt Gummitechnik (u.å) har publisert et hefte som omhandler beskrivelser av deres produkter, samt hvilke utregningsmetoder de anvender. Her legges det frem en forenkling av et sjokk hvor man kan se sammenhengen mellom akselerasjon, tid og energi for et halvsinus-system. Våre utregninger tar i



Figur 5.7 – Sammenlikning halvsinus vs. forenkling av måling

utgangspunktet ikke i bruk halvsinus da målingene oppfattes som komplekse, men forenklingen vil bli anvendt her. I figur 5.7 kan man se denne forenklingen, hvor vi måler  $t_0$  ut fra et gjennomsnitt av sjokkmålingene hvor man har fått den høyeste akselerasjonen.

$$E = \frac{2}{\pi^2} m (a_0 t_0)^2$$

(Willbrandt Gummitechnik, årstall ukjent: s.15)

Her er  $m$  massen,  $a_0$  er akselerasjonen for akkurat denne sinuskurven, og  $t_0$  tiden på halvsinusen. Her brukes den potensielle energien til loddet som  $E$ , selv om dette blir en tilnærming. Dette gir følgende:

$$m g h = \frac{2}{\pi^2} m (a_0 t_0)^2$$

$$6000[\text{kg}] 9,81[\text{m/s}^2] 0,45 [\text{m}] = \frac{2}{\pi^2} 200[\text{kg}] (a_0[\text{m/s}^2] 0,0875 \cdot 10^{-3}[\text{s}])^2$$

Venstre side av likhetstegnet tar her for seg loddet, altså at man ser på loddet som en energitilførsel til aluminiumsplatens. Legg merke til høyden som er satt til 0,45 m. Dette kommer av at loddet er heist 50 mm over aluminiumsplatens og platen henger igjen ca.

0,4 m over beina den skal lande på. Målingen som sees på er altså 50 mm høyde på loddet, i tillegg til at man skal prøve å finne den høyeste akselerasjonen som oppstår nederst i fallet. På høyre side av likhetstegnet ser man på aluminiumsplatens som den bevegelige komponenten som opplever en akselerasjon i et gitt tidsrom. Tiden som er satt inn er målt ut fra en gjennomsnittsmåling som er gjort. Massen av aluminiumsplatens regnes til å være ca. 200 kg, men er ikke et nøyaktig mål.

Dette gir en akselerasjon på  $a_0 \approx 292\,000 \text{ m/s}^2$ . Som tidligere diskutert er det ikke rett å tenke at all den potensielle energien loddet har, blir overført til aluminiumsplatens. Over er det argumentert for hvorfor 5 % kraftoverføring er en tilstrekkelig tilnærming. Tar man dette med i beregningene, får man en akselerasjon på  $a_0 \approx 65\,500 \text{ m/s}^2$ . Dette er ikke veldig langt unna den maksimalt målte akselerasjonen forsøkene har gitt, med tanke på hvor mange faktorer som ikke er tatt hensyn til.

Samtidig som denne utregningen vinkles som et argument til hvorfor målingene stemmer, må det nevnes at det kun er antakelser som er gjort. Med alle antakelsene og forenklingene som er gjort for å komme frem til denne akselerasjonen, kan det ikke sies for sikkert at dette er et argument for at målingene våre er korrekte.

Videre kan man se til det Harris og Piersol har skrevet om g-kreftene som kan virke i sammenheng med fallmaskiner generelt: «A great variety of drop testers are used to obtain acceleration pulses having magnitudes ranging from 80,000 g down to a few g.» (Harris & Piersol (2002), s.26.7). Her ser man at det ikke er uvanlig å oppnå særs høye akselerasjoner i korte tidsrom når det er snakk om sjokkmålinger, i tillegg til at våre målinger er innenfor spennet Harris og Piersol har satt seg. Det må også nevnes at Harris og Piersol kommenterer at de aller største akselerasjonene skjer når loddet ikke bare utsettes for tyngdeakselerasjonen, men med diverse metoder får en startfart.

En annen vinkling på spørsmålet om troverdigheten til målingene, er ved å regne ut en teoretisk maksimal akselerasjon for systemet. Tar man utgangspunkt i at loddet slippes fra 10 cm, i tillegg til at bremsedemperne neglisjeres grunnet deres kompleksitet, vil den teoretiske farten rett før loddet treffer beina være ca. 3 m/s. Farten er regnet ut med formelen for fart i fritt fall som ble formulert i 2.2 *Grunnleggende teori*. Den maksimale akselerasjonen vil oppstå om farten får fra 3 m/s til 0 m/s på én samplingsperiode.

Samplingsfrekvensen for denne utregningen settes til 20 kHz. Ut fra teori om akselerasjon som er lagt frem i 2.2.1 *Fart og akselerasjon*, gir dette følgende:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$
$$a = \frac{3 - 1 \text{ [m/s]}}{0,05 \cdot 10^{-3} \text{ [s]}} \approx 6000 \text{ g}$$

Tidligere er det blitt nevnt at samplingsfrekvensen er for lav for å kunne måle de akselerasjonene som oppstår i forsøkene. Dobler man samplingen til 40 kHz, vil dette gi en maksimal akselerasjon på 12000 g, som er dekkende for de akselerasjonene som er dokumentert i dette forsøket. Dette indikerer både at akselerasjonene som er blitt målt i forsøkene er veldig høye, samtidig som det poengterer at samplingsfrekvensen er for lav.

Ved å se på akselerasjonen fra flere vinkler, er det ikke usannsynlig å anta at det kan stemme at akselerasjonene blir så høye som vi har målt de til.

### 5.5.3 Sammenlikning av energi – TNT

En måte å si noe om hva fallet utgjør rent praktisk, er ved å konvertere kraften loddet påfører aluminiumsplatene om til gram TNT. For å forenkle utregningene og kun gjøre et estimat regnes det på den potensielle energien loddet og platen har, med en høyde på 0,45 m. Det vil si, ikke bare de 50 millimeterne mellom loddet og aluminiumsplatene, men også de 0,4 meterne mellom platen og beina. I tillegg regnes massen,  $m$ , som loddet og platens samlede vekt. Dette utgjør 27,4 kNm.

Ett gram TNT utgjør 4,184 kJ (Carey sublette, 2023). Det vil si at dette fallet utgjør omtrent 6,5 gram TNT. En håndgranat har gjerne ett par hundre gram TNT, som betyr at dette fallet ikke utgjør mye om man konverterer det til en eksplosjon. Å gjøre disse forenklingene blir ikke helt riktig da det er veldig komplekst med typer energi og eksplosjoner. I tillegg må man ta høyde for at fallmaskinen skal simulere et undervannssjokk hvor en bombe gjerne har en god avstand fra skroget, samt at vannet bremses opp eksplosjonen.

Det betyr ikke at den påvirkningen sjokkdemperne opplever under dette forsøket på fallmaskinen er det ekvivalente til hva de samme demperne vil oppleve til en

undervannseksplasjon med seks gram TNT. Det poengterer heller kompleksiteten av å regne om energi på denne måten.

## 6 Konklusjon

Grunnet oppgavens bredde, vil det bli presentert en todelt konklusjon for å oppsummere og avrunde oppgaven. Den første delen omhandler sensorene og datainnsamlingssystemet sin evne til å fungere sammen med Sjøkrigsskolens fallmaskin. Den andre delen handler om hvordan komponentene sammen er egnet til å gjøre anvendbare sjokkmålinger. Herunder hvordan den praktiske gjennomføringen ser ut sammenliknet med sjokk-teori. Etter dette vil anbefaling om veien videre bli presentert, som baserer seg både på opprinnelig oppsett, men også hvordan man kan jobbe videre med de funnene som er gjort i oppgaven.

Første del av konklusjonen går inn på hvordan sensorene og datainnsamlingssystemet har fungert sammen med Sjøkrigsskolens fallmaskin. Erfaringer gjort med sensorene er at anvendbarheten til sensorene er forskjellig. C53-sensoren, som måler pådraget, blir både utsatt for mer enn den tåler, i tillegg til at akselerasjonen er langt over måleområdet til sensoren. B11-sensoren har imidlertid betydelig ledig kapasitet i sitt måleområde, hvor gjennomførte tester ikke antydte noen begrensende faktorer.

Analog-til-digital-omformeren, som får inn målingene gjort med sensorene, fungerer godt med B11-sensorene. Samtidig, dersom omformeren skal anvendes videre med nye sensorer for å måle pådraget, må enten disse sensorene ha en følsomhet som er lavere enn  $0,1 \text{ mV/m/s}^2$ , eller så må omformeren byttes med en som har et større område enn  $\pm 10 \text{ V}$ .

Etter at sensorene og datainnsamlingssystemet har produsert målinger, må disse verdiene gjøres om til resultater som faktisk kan brukes til noe. Metoden her har vært integrering av målt akselerasjon, samt omgjøring til SRS. Grunnet særlig lav samplingsfrekvens på målingene, har fremleggingen av resultatene blitt noe redusert hvor ikke alt kan brukes.

Andre del av konklusjonen omhandler hvordan resultatene fra testgjennomføringene kan brukes til å forstå sjokk som fenomen. Det er blitt erfart at kompleksiteten til sjokk-faget gjør at broen mellom sjokk-teori og det fysiske fenomenet sjokk, ikke er like rett og fin som man skulle ønske. Samplingsfrekvensen har ført til suboptimale resultater som har gjort sammenlikning mellom teori og realitet vanskeligere. Innledningsvis er grafisk karakteristik fra målingene blitt anvendt for å forklare hva som skjer ved en testgjennomføring med fallmaskinen. Her ser vi at enkelte faktorer er sammenliknbare,

men at fremleggingsmetoden har satt begrensninger for hvor nøyaktige man kan være i sammenlikningen. Ved å gjøre forenklete utregninger på loddets slipp høyde i forhold til hva sjokkdemperne tåler, energioverføring i et slikt system, samt hvordan man kan nå slike høye akselerasjoner, har enkelte fysiske trekk ved faget blitt forsøkt forklart. Avslutningsvis har det raskt blitt poengtert hvor avansert teoretisk overføring av energi er, ved å se på hva fallmaskinens sjokk vil teoretisk utgjøre i gram TNT.

Altså er C53-sensorene som måler pådraget, ikke egnet i samarbeid med Sjøkrigsskolens fallmaskin. Det er derimot B11-sensoren. For å relevansgjøre fallmaskinen i test og beregning av sjokk, anbefales det å gå til anskaffelse av nye sensorer, og dette er blant de anbefalingene som vil bli presentert under i *6.1 Anbefaling om veien videre*.

## 6.1 Anbefaling om veien videre

Som nevnt tidligere har vi i stor grad latt oss motivere av mulighetene oppgaven gir for videre studier. Dermed legges det frem forslag til veien videre.

Spørsmål vi stiller oss er for eksempel «er sjokkdemperne som er plassert om bord i Den Norske Marine faktisk dimensjonert for de belastninger som kreves av dem?», «klarer sjokkdemperne å opprettholde dette gjennom sin levetid om bord?» og «hvordan kan man øke kunnskapen om sjokkdemping i marinen, samt synliggjøre temaets relevans?».

### 6.1.1 Sensorer og datainnsamlingssystem

Det anbefales å gå til innkjøp av sensorer som har en maksimal påkjenning på langt over det som er forventet å måle med fallmaskinen. I tillegg må sensorene ha et betydelig større måleområde enn akselerometeret vi har brukt. Videre er det et poeng at for å kunne fortsette å bruke analog-til-digital-omformerer, må følsomheten til en eventuell ny sensor være desidert lavere enn  $0,1 \text{ mV/m/s}^2$ . Dette er fordi følsomheten på  $0,1 \text{ mV/m/s}^2$  gir en metning på rundt  $10.000 \text{ g}$ , slik det blir formulert i 3.2.4.1 *Akselerometer med forsterker*.

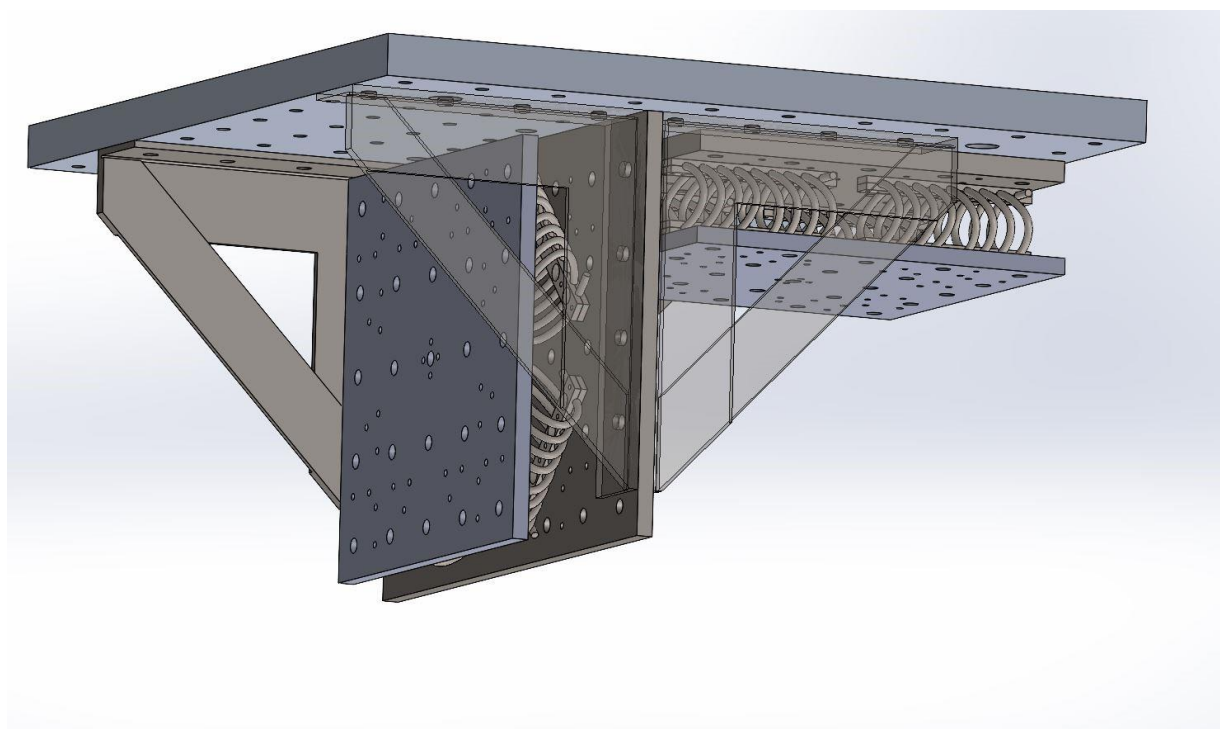
Med tanke på oppsettet av datainnsamlingssystemet anbefales det også å droppe LabVIEW. Dette fordi programmet kun ble brukt som et mellomledd. Vår vurdering er

at det er bedre å bli kjent med mulighetene GI.bench har å tilby. Dette avhenger av at man kan sette dette sammen med et program i for eksempel Python. Her er det mulig å bygge videre på vedlegg D – *Pythonskript*. I tillegg anbefales det å gå til anskaffelse av en PC med Linux da høyere samplingsfrekvens og dermed store datapakker vil kreve mer av en PC.

### 6.1.2 Planlagt oppsett

Den originale planen for testing var mer omfattende enn det som ble gjennomført. Her legges det frem en rask oversikt over hva som var planen. Dette kan dermed følges opp i ettertid. Disse punktene omhandlet testing av sjokkdemperne i skjærretning som krever et annet oppsett, testing når sjokkdemperen er montert skrått (fremdeles i fallretning), og å få testet målingene opp mot SRS, i større grad enn det som er blitt gjort i denne oppgaven. Punktene forklares under.

Opprinnelig var planen å teste sensorene både i fallretning og i skjærretning. Rent praktisk skulle dette bli gjennomført ved å lage en 90 graders innfestning man kunne feste stålplatene til. I figur 6.1 ser man både horisontal og vertikal innfestning av oppsettet. I og med at akseleratorene kun måler i en retning hadde det vært interessant å se hvor godt de hadde fungert for å gjøre tester i skjærretning, og hvordan det hadde vært best å feste sensorene på oppsettet. I fasen hvor vi ble kjent med utstyret, kom det frem at sensorene ikke måler det de teoretisk skulle gjort med tanke på retninger. Det skylles nok at det er vanskelig å skape en vibrasjon som ikke har bevegelse i flere retninger også. Ved hjelp av høyhastighetskamera kunne man sett om akseleratorene havner i for stor multiakslet bevegelse og hvor mye dette har å si for resultatene som kommer av målingene.



*Figur 6.1 - Teoretisk oppsett for testgjennomføring med både horisontal og vertikal innfestning. (F. Wikne, 2023)*

I tillegg ble det planlagt med å teste om det er forskjell på om man plasserer sjokkdemperne vinklet, sammenliknet med å feste de parallelt, slik det ble testet med her. Se figur 3.7 og 3.6 i 3.2.1.2 *Innfestningsplater* for å se forskjell på parallell og vinklet innfestning på demperne. Dette krever opp og nedrigging av oppsettet som det ikke ble tid til under denne studien. Det krever også at man fester stålplaten som skal monteres til aluminiumsplaten i andre gjengehull enn det vi har brukt. Eventuelt må man følge med på om demperne beveger seg nok til å treffe skruehodene. Her anbefales høyhastighetskamera for å, i større grad, kunne se sammenheng mellom målingene og det som faktisk skjer. Videre var en stor del av oppgaven å sjekke hvordan pådraget ville se ut ved bruk av Sjøkrigsskolens fallmaskin. Fordi sensorene som ble brukt her, ikke kunne måle høye nok akselerasjoner, ble det ikke mulig å anvende SRS for å predikere responsen, slik som teorien legger opp til.



### **6.1.3 Forbedringer fallmaskin**

Det anbefales å gjøre om på hele sikkerhets-mekanismen med trykkluften da denne ikke fikk noen funksjon under vår gjennomføring. Dette ble lagt inn som et eget punkt i vedlegg A – *ORM fallmaskin* for gjennomføring av sjokktester, og kunne vært unngått. I tillegg anbefales det å bytte ut utløserknappene til loddet da det er en lekkasje i ventilene som gjør at kompressoren må kjøre oftere for å øke lufttrykket.

## 7 Kildehenvisning

Harris, C. M. & Piersol, A.G.. (2002). *Harris' Shock and Vibration Handbook* (utgave fem). McGraw-Hill.

Svarstad, B. Sander og Rød, Andreas (2021). Sjøkrigsskolens sjokkmaskin: *Hvordan er maskinens karakteristikk? Kan høyhastighetskamera være et nyttig verktøy for sjokktesting?* [Bacheloroppgave]. Sjøkrigsskolen.

Andreassen, Øyvind. (21. november 2020). Introduction to Shock-Response Spectra. Norwegian Defence Research Establishment (FFI).

Andreassen, Øyvind. (26. oktober 2022). Damper Models and their Impact on Shock Response. Norwegian Defence Research Establishment (FFI).

Willbrandt Gummitechnik (ukjent årstall). *Shock absorber* [Brosjyre]. Willbrandt Gummitechnik [Schockdaempfer Shock-absorbers de en.pdf](#) (Lasted ned 06.11.23).

Plotly (2015) *Spenning-tøyning for aluminium*. Plotly.com. [Spenning - tøyning for aluminium | scatter chart made by Walle.andreas | plotly](#) (Lasted ned 08.11.2023).

Plotly (2015) *Spenning-tøyning for stål*. Plotly.com. [Spenning - tøyning for stål | scatter chart made by Jonasmw | plotly](#) (Lasted ned 08.11.2023).

Heinz G. Urban. (2002). *Handbook of underwater acoustic engineering*. STN ATLAS Elektronik GmbH.

Willbrandt Gummitechnik. (ukjent årstall). *Wire rope isolators* [Brosjyre]. Willbrandt Gummitechnik. [Cavoflex wire rope isolator | wire rope vibration damper \(willbrandt.com\)](#) (Lastet ned: 24.11.23).

Carey sublette. "Nuclear Weapons Frequently Asked Questions." [Section 1.0 Types of Nuclear Weapons \(nuclearweaponarchive.org\)](#) (Lastet ned: 22.11.2023).

TSI Solutions. «MC 3350-0 Shock Absorber.» Trisolutions.ur. [MC 3350-0 Shock Absorber \(tsisolutions.us\)](#) (Lastet ned: 23.11.23).

Willbrandt Gummitechnik. (2014). SpringViewer (versjon 2.01) [tabelloversikt]. Willbrandt Gummitechnik.

Van de Vegte, J. (2001). *Fundamentals of Digital Signal Processing* (1. utg). Prentice Hall.

Floyd T.L. (2015). *Digital Fundamentals* (11. utg.). Pearson Education Limited.

Dag Håkon Hanssen. (2015). *Programmerbare Logise Styringer* (4. utg). Fagbokforlaget Vigmostad & Bjørke AS.

PCB Piezotronics. *Introduction to ICP Accelerometers*.  
<https://www.pcb.com/resources/technical-information/introduction-to-accelerometers>  
(Lasted ned 2.11.2023).

Gantner Instruments. *GI.bench*. <https://www.gantner-instruments.com/products/software/gi-bench/> (Lasted ned 30.11.23).

Gantner Instruments. *Q.bloxx XL A111 BNC* [Brosjyre]. <https://gi-productbase.gantner-instruments.com/en/products/105/datasheet/web/latest/a4/> (Lasted ned 20.11.2023).

Gantner Instruments. *Q.station XT* [Brosjyre]. <https://gi-productbase.gantner-instruments.com/en/products/274/datasheet/web/latest/a4/> (Lasted ned 20.11.2023).

PCB Piezotronics. *Model 320C53* [Brosjyre].  
[https://www.pcb.com/contentstore/docs/pcb\\_corporate/vibration/products/manuals/320c53.pdf](https://www.pcb.com/contentstore/docs/pcb_corporate/vibration/products/manuals/320c53.pdf) (Lasted ned 20.11.2023).

PCB Piezotronics. *Model 353B11* [Brosjyre].  
[https://www.pcb.com/contentstore/docs/pcb\\_corporate/vibration/products/manuals/353b11.pdf](https://www.pcb.com/contentstore/docs/pcb_corporate/vibration/products/manuals/353b11.pdf) (Lasted ned 20.11.2023).

## **Vedlegg**

### **Vedlegg A – ORM fallmaskin**

I dette vedlegget fremlegges Operational Risk Management for testgjennomføringene ved bruk av Sjøkrigsskolens fallmaskin.

### **Vedlegg B – Resultater**

I dette vedlegget kan man se samtlige resultater som er blitt gjort under testfasen.

### **Vedlegg C – Målinger**

I dette vedlegget kan man se verdiene fra sensorene som er brukt for å lage resultatene.

### **Vedlegg D – Pythonskript**

I dette vedlegget fremlegges scriptet som er brukt for å lage resultatene. Både akselerasjon, fart og forflytning sett opp mot tid, og sjokkresponspekter som er i frekvensdomenet.

### **Vedlegg E – Spenning-tøyning-diagram**

I dette vedlegget utdypes utregningene som ble gjort for å se på energiabsorpsjon i stål og aluminium. Dette inkluderer spenning-tøyning-diagram for både stål og aluminium som er markert med de verdiene utregningene baserer seg på.

### **Vedlegg F – Utregninger av fjærssystem**

I dette vedlegget vil utdypende utregninger for fjærsystemet presenteres.

### **Vedlegg G – Video fra høyhastighetskamera**

Dette vedlegget er en mp3-fil som viser en video som er tatt med høyhastighetskameraet fra 100 mm.