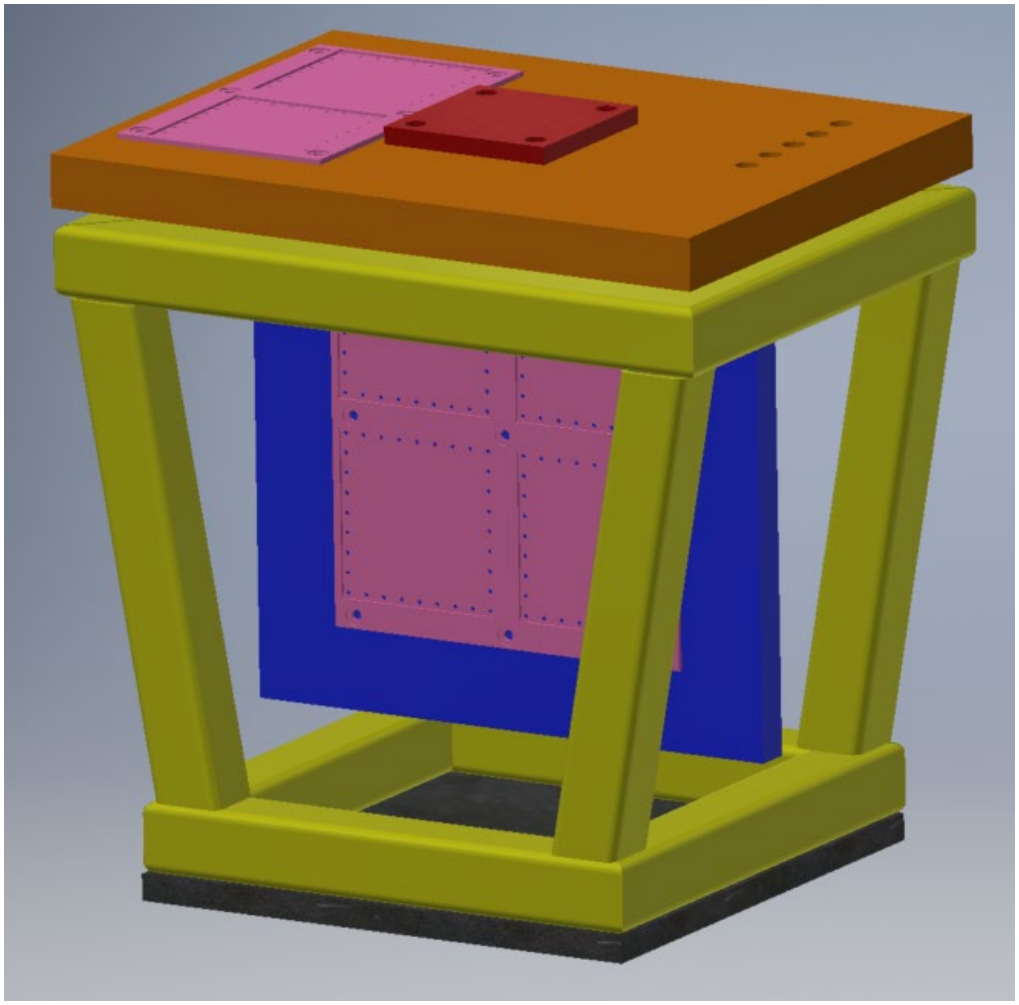
SJOKKTESTING AV SATELLITTKOMPONENTER



NTNU

FAKULTET FOR INGENIØRVITENSKAP

Institutt for maskinteknikk og produksjon

7491 Trondheim

Besøksadresse:

R.Birkelands vei, 2B, Trondheim

RAPPORT BACHELOROPPGAVE

Tittel (Både på norsk og engelsk kreves)

Sjokktesting av satelittkomponenter

Mechanichal shocktesting of satellite components

Prosjektnr

MTP-K-2019-08

Forfatter(e)

Jim Fredrik Meløysund og Per Arne Johansen

Oppdragsgiver(e) eksternt

NTNU SmallSat

Dato levert	Antall vedlegg	Totalt antall sider
20.05.19	2	51

Veileder(e) internt

Detlef Blankenburg

Rapporten er ÅPEN

Sammendrag / Summary

Oppgaven omfatter en innføring til sjokk og sjokktesting av primært kubesatellittkomponenter. Utvikling og evaluering av en innretning til bruk av studenter for sjokktesting av satellittkomponenter ved NTNU Gløshaugen.

This paper will give an introduction to shock and shock testing of primarily CubeSat components. Development and evaluation of a device for use by students to shock test satellite components at NTNU Gløshaugen.

Stikkord fra prosjektet

Sjokktest, shock test, sjokk, shock, småsatellitt, småsatellitter, Smallsat, smallsats, cubesat, kubesatellitt, pyrosjokk, pyro shock, testing, test, komponenttesting, component testing, sjokkresponsspektrum, shock response spectrum

I FORORD

Denne bacheloroppgaven er skrevet i forbindelse med avsluttende utdanning for studieretningen Bachelor i ingeniørfag, maskin. Studieretning konstruksjonsteknikk ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet i Trondheim.

Vi vil først å fremst takke vår veileder Detlef Blankenburg, for gode retningslinjer, veiledning og tilgjengelighet under oppgaveskrivingen.

Vi vil også takke hele HYPSO-teamet som til tross for sin travle hverdag har tatt seg tid til å gi av sin kunnskap, erfaring og meninger om temaet vi har tatt for oss.

Spesiell takk til HYPSO mechanics team, som hele tiden har tatt seg tid til å se på og gi tilbakemelding på vårt arbeid.

Denne oppgaven har vært svært utfordrende og derfor svært lærerik for oss, og vi håper den kan være like lærerik for de som leser.

Takk!

II OPPGAVEBESKRIVELSE

Selv om det er over 60 år siden Sovjetunionen skjøt opp Sputnik i 1957 er det fremdeles store utfordringer knyttet til å plassere en fungerende satellitt i bane rundt jorden. Utfordringene er knyttet til påkjenninger satellitten og spesielt dens nyttelaster vil oppleve under oppskyting samt miljøet satellitten vil være operativ i.

En av de vanligste årsakene til svikt i mekaniske og elektriske komponenter og systemer er mekaniske sjokk. Under for eksempel bruk, produksjon og transport kan produkter oppleve fall, velt, kollisjoner og andre sjokk kilder. For å identifisere skjøre og kritiske komponenter blir det utført mekanisk sjokktesting. Disse testene gir et bilde av utstyrs evne til å motstå de sjokkene som de potensielt kan bli utsatt for under hele livsløpet, resultatet gir produsentene mulighet til å gjøre tiltak for å minke sannsynligheten for svikt.

Produsenter prøver kontinuerlig å presse produksjonsomkostninger blant annet ved å optimalisere materialforbruk. Dette fører til en reduksjon i dempemateriale noe som gjør komponenter mer utsatt for sjokk og vibrasjoner. Et resultat av denne optimaliseringen er at kravene for sjokktesting blir høyere, for å kunne stole på at utstyr vil kunne overleve potensielle sjokk. Dette fører til at felt der det før var få eller ingen krav til hensyn av mekaniske sjokk nå vil være behov for kunnskap både på lavere- og høyere akademisk nivå.

Oppgavens fokus går på å utvikle et konsept for sjokktesting av små satellitt komponenter som ikke er OCTS. Samtidig skal det være fokus på å være en introduksjon til sjokktesting generelt da kunnskapsnivået på publiserte artikler for sjokktesting ligger på et så høyt akademisk nivå og de at det er vanskelig for studenter og personer å sette seg inn i det grunnleggende uten forkunnskaper innen sjokk og vibrasjonsteori.

Fokuset i oppgaven vil ikke være på det matematiske bak sjokktesting men heller på mulighetene for justering av et sjokkbord for å oppnå de egenskaper man ønsker basert på egne antagelser og andres erfaringer.

III OPPGAVETEKST

BACHELOROPPGAVE VÅR 2019
Jim Fredrik Gransjøen Meløysund
Per Arne Johansen

SJOKKTESTING AV SATELLITTKOMPONENTER TIL EN CUBESAT
Shock testing of components for a CubeSat

NTNU har en rik bakgrunn i assosiasjon med småsatellitter. Hovedmålet har vært å undervise studenter i det multidisiplinære feltet som vi kaller romteknologi. I 2016 startet HYPSO prosjektet, som hovedsakelig går ut på å sende opp et hyperspektralt kamera for overvåkning av havfarging og oseanografi.

Satellittkomponenter er veldig skjøre, noe som betyr at de muligens ikke tåler en oppskytning. Derfor er sjokktesting en viktig del av utviklingsprosessen.

Oppgaven gjennomføres i samarbeid med HYPSO prosjektet og omfatter følgende punkter:

1. Kort analyse og beskrivelse av produkt, teknologi og marked
2. Utvikling av nødvendige spesifikasjoner som grunnlag for arbeidet
3. Utvikling, evaluering og presentasjon av alternative konsepter
4. Valg, videre detaljering og raffinering av det mest lovende konsept
5. Utvikling av struktur, utforming og dokumentasjon av utvalgte komponenter
6. Fremstilling og test av utvalgte elementer
7. Evaluering og presentasjon av resultatene
8. Evaluering av valgt metodikk og resultatene i forhold til læringsmålene

Oppgaven skal aktiv ta i bruk PU - journal. Senest 3 uker etter oppgavestart skal et A3 ark som illustrerer arbeidet leveres til faglærer. Arket skal også oppdateres en uke før innlevering av bacheloroppgaven.

Arbeidet skal risikovurderes. Risikovurdering er en løpende dokumentasjon og skal gjøres før oppstart av enhver aktivitet som KAN være forbundet med risiko.

Besvarelsen skal ha med signert oppgavetekst, et sammendrag på norsk og engelsk, konklusjon, litteraturliste, innholdsfortegnelse, etc. Ved utarbeidelse av teksten skal kandidaten legge vekt på å gjøre teksten oversiktlig og velskrevet. Ved bedømmelse legges det stor vekt på at resultater er grundig bearbeidet, at de oppstilles tabellarisk og/eller grafisk på en oversiktlig måte og diskuteres utførlig.

Kontaktpersoner: Evelyn Livermore, NTNU - SmallSat

Detlef Blankenburg
Faglærer

IV SAMMENDRAG

Sommeren 2020 har HYPSO prosjektet i samarbeid med NTNU, AMOS og Norsk Romsenter, planlagt å skyte opp en små satellitt.

Dagens teknologisprang skaper et grunnlag for et godt marked innen romfart og rom tilknyttet industri.

Under oppskytning og i rakett sekvens seperasjoner skaper pyrotekniske innretninger sjokkbølger som brer seg gjennom romfartøyer. Disse pyrotekniske sjokkene er kjent for å føre til store ødeleggelser i komponenter i romfartøyets nyttelaster og gjøre at rom oppdrag mislykkes.

For å minimere sjansen for et mislykket oppdrag må satellittkomponenter gjennomgå en rekke kvalifikasjonstester. Deriblant sjokk testing, for å teste om designede komponenter vil overleve sjokkene de blir utsatt for gjennom sin levetid.

Å utvikle en slik sjokktestfasilitet krever høy teknisk innsikt og grundig forståelse av sjokk og vibrasjon. Sjokk har alltid blitt sett på som den mest avanserte og uforutsigbare utfordringen i romteknologien, og kunnskapen for simulering og utføring av sjokktester er enda ikke perfeksjonert.

Oppgaven ser på et konsept som baserer seg rundt modifikasjon av en allerede eksisterende penetrasjonsmaskin, og ser på hvordan man kan modifisere denne maskinen for å generere en ønsket sjokk karakteristikk.

V ABSTRACT

In the summer 2020 will the HYPSO project in collaboration with NTNU, AMOS and the Norwegian Space Centre launch a small satellite.

Today's technology leap creates a foundation for growth in the space and space related marked.

During launch and in a rocket's sequence separation will pyrotechnic devises create severe pyrotechnic shocks. These shocks are known to cause component failure in the launch vehicle's payloads and can lead to complete mission failure.

To minimize the chances for mission failure components that is exposed to shocks pass a lot of qualification tests. Including shock testing, to decide if the designed component will withstand the shocks it experiences during it lifecycle.

To develop such a shock test facility, requires a lot of technical insight and a deep understanding of shock and vibration. Shock is seen as the most complex and unpredictable challenge in space industry, and the knowledge of simulating and preforming shock tests is yet to be perfected.

The thesis is looking at a concept that is based around modification of a already existing penetration tester, and looks into how you can modify it to generate a desired shock characteristic.

VI INNHOLDSFORTEGNELSE

I Forord iii

II Oppgavebeskrivelse iv

III Oppgavetekst v

IV Sammendrag vi

V Abstract vii

VI Innholdsfortegnelse viii

Side 1: Figurer 1

Side 2: Forkortelser 2

1 Organisering 3

1.1 HYPSO prosjektet 3

1.2 AMOS 4

2 Bakgrunn 5

3 Analyse og beskrivelse av produkt, teknologi og marked 6

3.1 Produkt og teknologi 6

3.1.1 Små satellitter 6

3.1.2 Kubesatellitter: 7

3.1.3 Hyperspektral bildebehandling (HSI): 8

3.1.4 Software Defined Radio (SDR): 10

3.1.5 RGB-kamera: 10

3.1.6 Sjokktest fasiliteter: 11

3.2 Markedsanalyse 12

3.2.1 Marked for små satellitter 12

3.2.2 Markedet for sjokktesting 12

3.2.3 Markedet for hyperspektrale kameraer. 13

4 Innføring til sjokk: 14

4.1 Faremomenter rundt oppskyting av satellitter 14

4.2 Effekt på komponenter 14

4.3 Mekanisk sjokk. 15

4.4 Sjokk kategorisering 16

4.5 Modifikasjon av testkarakteristikk 18

5 Utvikling av nødvendige spesifikasjoner som grunnlag for arbeidet 19

6 Generell metode 20

7 Utvikling, evaluering og presentasjon av alternative konsepter 21

8 Valg, videre detaljering og raffinering av det mest lovende konsept 26

9 Utvikling av struktur, utforming og dokumentasjon av utvalgte komponenter 30
9.1 Rammeverk: 30
9.2 Topplate: 31
9.3 Ambolt: 31
9.4 Innfestning av nyttelaster: 32
9.5 Tombstone: 33
10 Fremstilling og test av utvalgte elementer 34
11 Evaluering og presentasjon av resultatene 35
11.1 Evaluering av valgt konsept: 35
11.2 Justeringsmuligheter og repeterbarhet av sjokk i valgt konsept. 35
11.3 Sjokktestingens destruktive natur: 35
12 Evaluering av valgt metodikk og resultatene i forhold til læringsmålene 36
13 Avvik 37
14 Veien videre 38
15 Referanser 39
16 Vedlegg 40
Vedlegg A Modal Analyse av Tombstone: 40

SIDE 1: FIGURER

Figur 1.1: Opprinnelig plan til plassering av nyttelaster i HYPSO-satellitten 3
Figur 1.2: Amos visjon for samarbeid mellom flere autonome systemer. 4
Figur 3.1: Ulike CubeSat enhet konfigurasjoner. 7
Figur 3.2: 6U Kubesatellitt 7
Figur 3.3: RGB- sammenlignet med Hyperspektralt- bilde av Eple 8
Figur 3.4: Eksempel på algeovervåkning fra hyperspektralt kamera 8
Figur 3.5: 3D-modell av opprinnelig utforming av HSI-kameraet. 9
Figur 3.6: Dagens utforming av HSI-kameraet. 9
Figur 3.7: Feste skinne. 9
Figur 3.8: 3D-modell av innfestet HSI kamera 9
Figur 3.9: Eksempel RGB-Kamera 10
Figur 3.10: Prognoser for markedsvekst i småsatellitt markedet 12
Figur 4.1: Typisk utseende på et mekanisk sjokk 15
Figur 4.2: Sjokkpuls til SRS. 17
Figur 7.1: Kapsel utviklet av CalPoly. 21
Figur 7.2: Eksempel på en testkapsel montert på et vibrasjonsbord 21
Figur 7.3: en pendelhammer som gir et støt til en resonerende plate. 22
Figur 7.4: Pendelhammerløsning 22
Figur 7.5: Pneumatisk sylinder sjokkfasilitet. 23
Figur 7.6: Sjokktest maskin for testing i 3 akser. 24
Figur 7.7: Materialtekniske Laboratorier penetrasjonstestings maskin 25
Figur 8.1: Konstruert konsept for fjærakselerert pendelhammer 26
Figur 8.2: Konsept for testing i 3-akser ved bruk av fjærakselerert pendelhammer. 26
Figur 8.3: Utregninger av sjokk. 27
Figur 8.4: konsept for testing i 3 akser. 28
Figur 8.5: 2. konsept for testing i 3 akser. 28
Figur 8.6: kvadratisk ramme 29
Figur 8.7: Ramme med mindre overheng mot sokkel 29
Figur 9.1: Valgt ramme design. 30
Figur 9.2: Modell av Topplate 31
Figur 9.3: Ambolt 31
Figur 9.4: Secondary interface for ikke sentrerte nyttelaster 32
Figur 9.5: Secondary interface for sentrerte nyttelaster 32
Figur 9.6: 4U innfestningsplate 32
Figur 9.7: Modell av Tombstone før konstruksjon av hull for innfestning. 33
Figur 9.8: Modell av Tombstone etter konstruksjon av innfestning 33
Figur 10.1: 3D-modell av sammenstilling av valgt konsept 34

SIDE 2: FORKORTELSER

HYPSO - HYPer-spectral Smallsat for ocean Observation

HSI – Hyper Spectral Imaging – Hyperspektral bildebehandling

SDR – Software Defined Radio – Programvare definert radio

RGB – Red, Green, Blue – Rød, grønn og Blå

UAV – Unmanned Aerial Vehicle – Ubemannet luftfartøy

USV – Unmanned Surface Vehicle – Ubemannet overflate fartøy

AUV – Autonomous Underwater Vehicle – Autonomt Undervannsfartøy

COTS – Commercial Off The Shelf – Hyllevarer

DUT – Device Under Test –Testobjekt

SRS – Shock Response Spectrum

CAD – Computer Aided Design **–** Dataassistert konstruksjon

FEM – Finite Element Method **–** Elementmetoder

1 ORGANISERING

1.1 HYPSO PROSJEKTET

HYPSO prosjektet er primært en forsknings orientert teknologi demonstrasjon, sponset av Norges forskningsråd (NFR) i samarbeid med NTNU AMOS og Norsk Romsenter. Satellitten er planlagt å være den første små satellitten utviklet på NTNU og har planlagt oppskytning sommeren 2020. Etter hvert som nyttelaster utvikler seg og blir videreutviklet vil prosjektet videreføres og flere versjoner av satellitten skal skytes opp.

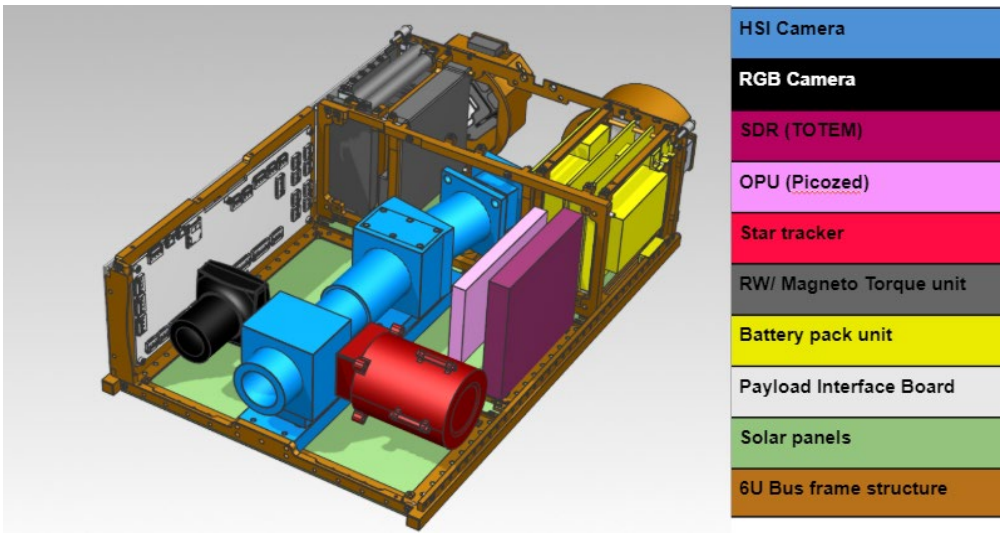
For at HYPSO satellitten skal være ett suksessfullt oppdrag er det kritisk at minst ett av disse hovedmålene oppfylles:

- Primærmålet med HYPSO satellitten er å suksessfullt skyte opp og operere ett HSI-kamera i bane. Målet er å gjøre det mulig å få lav kost, høypresisjon og autonom hyperspektral bildebehandling som innfrir kravene til havfarge fjernanalyse og oseanografi. Kameraet i samarbeid med andre autonome komponenter om bord skal da være i stand til å overvåke havet utenfor Norge og oppdage skadelige alger som kan ødelegge lokale økosystem.

- Sekundærmålet er å kunne kommunisere med arktiske forskningsstasjoner for innhenting av informasjon ved hjelp av en programvare definert radio (SDR).

- Tertiærmålet er å bruke et RGB-kamera til å ta bilden av jorda. Dette tertiære målet er en del av satellitten for å øke sannsynligheten for en suksessfull oppskytning hvis det primære og sekundære målet ikke skulle være suksessfullt.

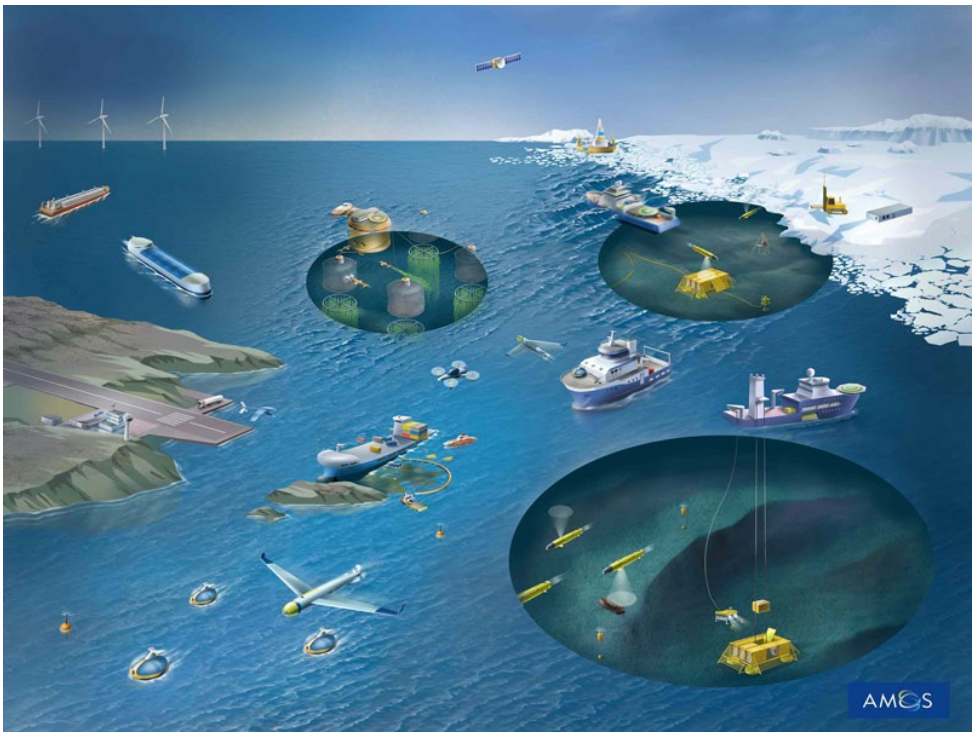
Figur 1.1 viser en oversikt over den opprinnelige planen til plassering av de forskjellige komponentene i satellitten. Det er kun HSI-kameraet, SDR-en og RGB-kameraet som vi har valgt å ha fokus på, da disse er hoved nyttelaster. Teknologien bak disse nyttelastene er forklart nærmere under Produkt og teknologi s.6-10.



Figur 1.1: Opprinnelig plan til plassering av nyttelaster i HYPSO-satellitten

1.2 AMOS

Videre har NTNU AMOS (Centre for Autonomus Marine Operations and Systems) en visjon om et samarbeid mellom flere autonome systemer som små satellitter og en rekke UAV-er, USV-er, AUV-er og bøyer som sammen skal danne et nettverk for nøyaktig havkarakterisering og forskning som illustrert i figur 1.2 [1].



Figur 1.2: Amos visjon for samarbeid mellom flere autonome systemer.

NTNU AMOS jobber med å skape et verdensledende senter for autonome marine operasjoner og kontrollsystemer. Forskere fra forskjellige avdelingsdisipliner bidrar med grunnleggende og tverrfaglig kunnskap innen marin hydrodynamikk, havkonstruksjoner og kontrollteori for å utvikle intelligente skip og havstrukturer, autonome ubemannede kjøretøy og roboter for sikkerhetskritiske operasjoner i ekstreme miljøer. Dette prosjektet blir gjennomført for å møte dagens utfordringer knyttet til miljø og klima, sikker autonom sjøtransport, kartlegging og overvåkning av store hav- og kyst områder, offshore fornybar energi, fiskeri og akvakultur samt dyphavs- og arktisk olje- og gassutfordring. [1]

2 BAKGRUNN

Helt siden vi var barn har verdensrommet alltid fasinert oss. Å kunne jobbe med et prosjekt som skulle skyte noe ut av atmosfæren har alltid vært en drøm utenfor rekkevidde. «Hvordan kunne man jobbe med noe slikt uten å være rakettforsker med 30 års erfaring». Dette viste seg å være feil.

Bacheloroppgaven ble tilbydd oss da vi hadde vist interesse for HYPSO prosjektet på forhånd og hadde kontakt med prosjektleder for HYPSO prosjektet utenom studiet. HYPSO-prosjektet trengte studenter som kunne lage ett konsept for sjokktesting av komponenter. Dette syntes vi hørtes spennende ut og valgte derfor å takke ja til oppgaven.

3 ANALYSE OG BESKRIVELSE AV PRODUKT, TEKNOLOGI OG MARKED

3.1 PRODUKT OG TEKNOLOGI

3.1.1 Små satellitter

Små satellitter er satellitter som har en masse under 180kg. Utviklingen av Smallsats er et resultat av den enorme fremgangen innen elektronikk og kommunikasjonsteknologi. Elektronikk har blitt mindre, raskere og internett er i stand til å overføre store mengder data over enorme avstander.

Ulike kilder bruker ulike definisjoner på klassifisering av Smallsats. NASA [2] har valgt å Kvalifisere dem slik:

- Minisatellitt: 180 – 100 kg
- Microsatellitt: 10 - 100 kg
- Nanosatellitt: 10 - 1 kg
- Picosatellitt: 10 - 0.01 kg
- Femtosatellitt: 0.01 - 0.001 kg

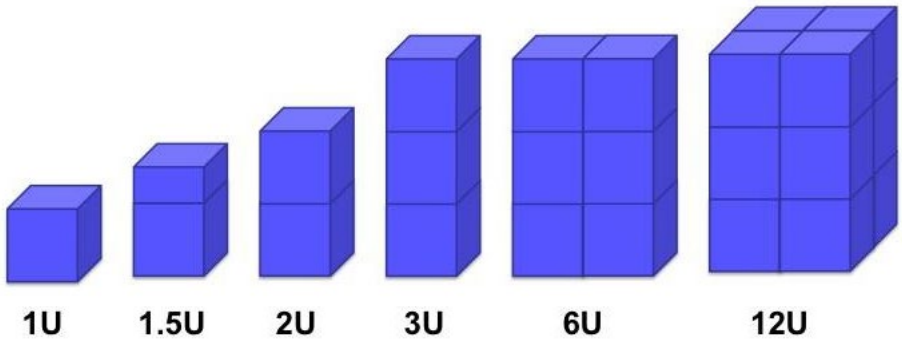
Filosofien bak Smallsats er at de skal være billigere og raskere å bygge enn tradisjonelle satellitter. Ved å benytte COTS komponenter der det er mulig reduseres designprosessen betydelig. De krever også mindre fra nedlesningsstasjonene som henter samlet informasjon og er derfor også billigere i drift.

En tradisjonell satellitt med medium til stor størrelse tar omtrent 5-15 år for å detektere behov, utvikle og sende opp, i sammenligning med en små satellitt som kan ta mindre enn 8 måneder [3].

Vanligvis blir små satellitter skutt inn i «Low orbit», denne orbitale banen ligger mellom 400-650 Km over bakken. I denne høyden tar det omtrent 90 minutter for satellitten å fullføre én bane jorda. Ved å ligge i lav bane rundt jorda garanteres det av ved endt levetid at satellitten vil krasje inn i atmosfæren og brenne opp. [3]

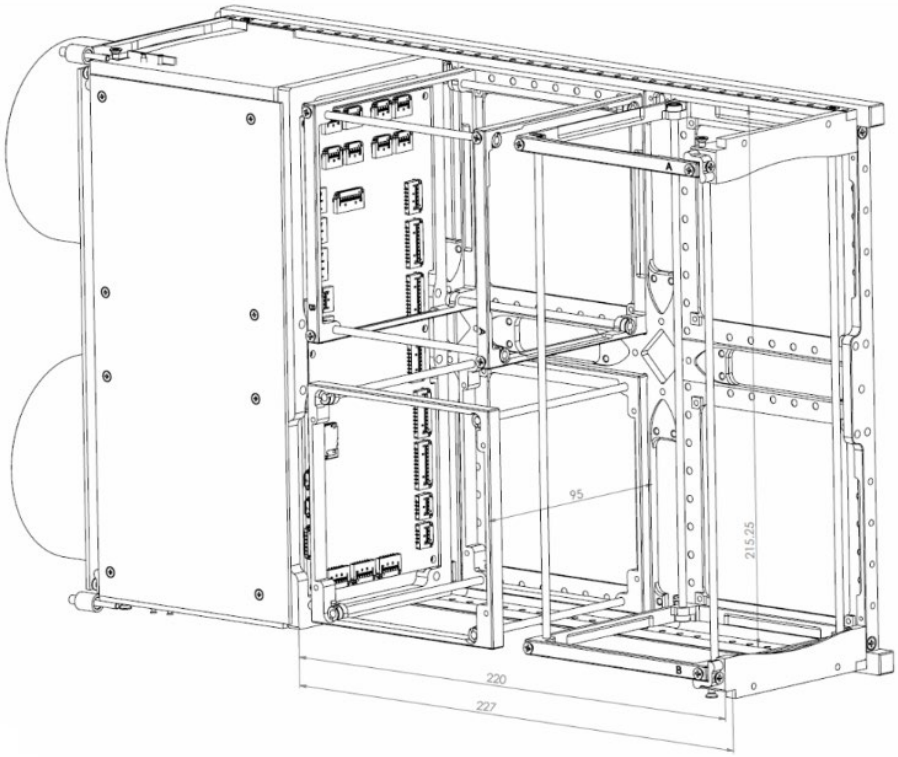
3.1.2 Kubesatellitter:

Kubesatellitt eller «CubeSats» er en klasse av nanosatellitter som bruker en standard størrelse og form. En standard CubeSat bruker en enhet «1U» som er 10x10x10 cm som kan sammenstilles i flere størrelser. 1, 1.5, 2, 3, 6, og 12U som vist på figur 3.1 [2].



Figur 3.1: Ulike CubeSat enhet konfigurasjoner.

HYPSO satellitten er en 6U Kubesattelitt som vist på figur 3.2, denne figuren er uten nyttelaster. Dimensjonen med alle komponenter vil være 340.5 mm x 226.430 mm x 100mm.



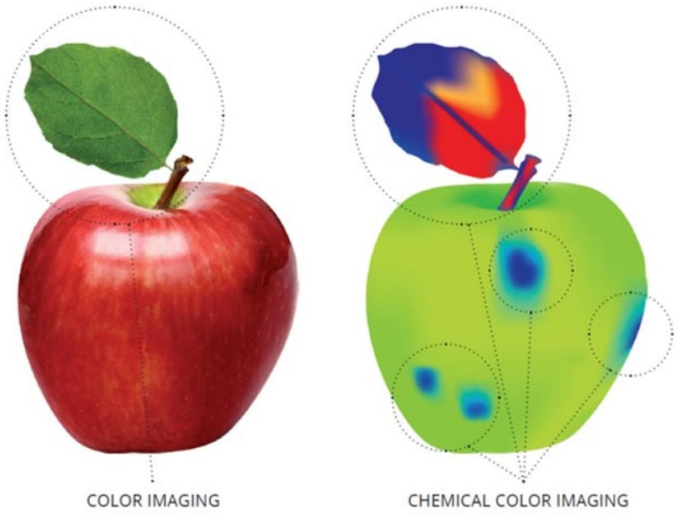
Figur 3.2: 6U Kubesatellitt

3.1.3 Hyperspektral bildebehandling (HSI):

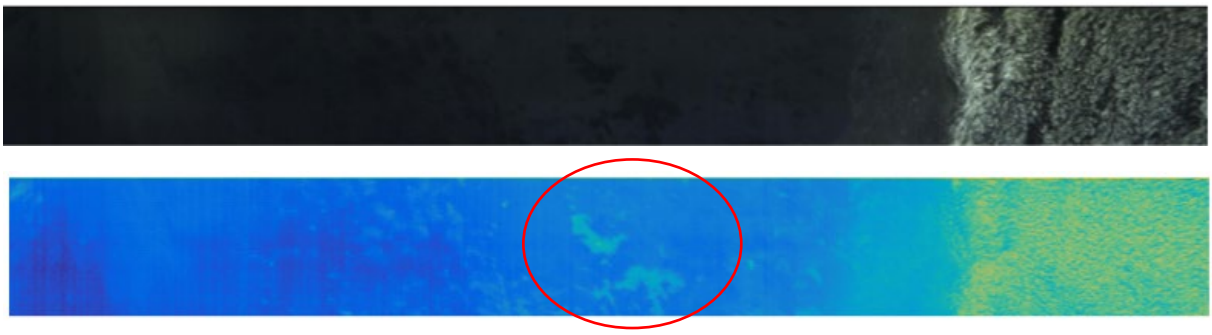
Hyperspektral bildebehandling er en kraftig teknologi som gir en ny dimensjon til optisk bildebehandling. Standard optisk bildebehandling baserer seg på øyets anatomi og operer kun i de lysfrekvensene som menneskeøyet kan oppfatte. Enkelt forklart bryter ett hyperspektralt kamera ned dette spektrumet ned i flere biter slik at forskjeller som menneskeøyet ikke vil oppdage kan bli observert på bilder. Presisjonen på denne oppbrytningen er så presis at man for eksempel vil kunne se forskjell på forskjellige alger fra rommet.

Hyperspektrale kameraer er mye brukt i dagens satellittovervåkning av land og havområder og brukes også i militær, Jordbruk og medisin. I figur 3.3 [4] ser man hvordan et hyperspektralt kamera kan observere kjemiske forskjeller i et eple.

Figur 3.4 [5] Viser et eksempel på hvordan resultatet av hyperspektrale bilder av alger vil kunne observeres markert med rød sirkel.



Figur 3.3: RGB- sammenlignet med Hyperspektralt- bilde av Eple

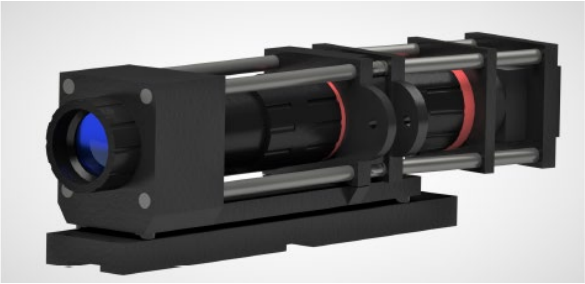


Figur 3.4: Eksempel på algeovervåkning fra hyperspektralt kamera

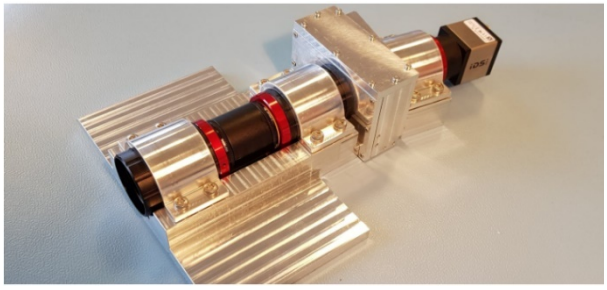
HSI kameraet som skal brukes i satellitten er oppbyggd av flere COTS komponenter.

HYPSO mechanical team har gjennom prosjektet endret design på kamera, da opprinnelig utforming som vist i Figur 3.5 viste seg å ikke være stabilt nokk. Figur 3.6 viser hvordan dagens utforming på HSI-kameraet er utformet. og sammenstilt med en ramme i aluminium som har som hensikt å sørge for linearitet og stabilitet i kameraet. Rammen sammen med festeskinner som vist i Figur 3.8 vil fungere som innfestning til selve satellitt bussen. Figur 3.8 viser planlagt orientering av HSI-kameraet.

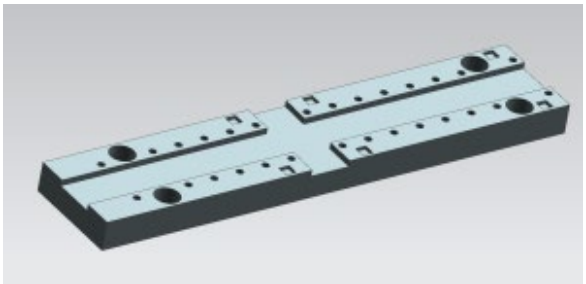
Det er viktig å påpeke at disse 3D-modellene i figur 3.5, 3,7 og 3.8 er utarbeidet av HYPSO mechanical team og ikke av studentene bak denne bacheloroppgaven.



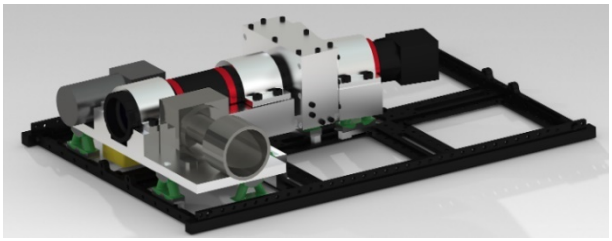
Figur 3.5: 3D-modell av opprinnelig utforming av HSI-kameraet.



Figur 3.6: Dagens utforming av HSI-kameraet.



Figur 3.7: Feste skinne.



Figur 3.8: 3D-modell av innfestet HSI kamera

3.1.4 Software Defined Radio (SDR):

En SDR [6] eller en programvaredefinert radio er en radio, som er mer fleksibel og tilpasningsdyktig enn en konvensjonell radio, da den er re-konfigurerbar. Dette gjør at en SDR vil kunne tilpasses forskjellig bakkesensorer fordi den kan reprogrammeres etter oppskytning. På dette stadiet er det ikke bestemt hvilken type SDR som skal benyttes, og derfor heller ikke nøyaktig hvordan innfestingen til satellitten vil se ut.

SDR-en skal brukes til å gi arktiske forskere raskere og lettere tilgang til innhentede data på forskningsstasjoner hvor ugjestmildt klimaet skaper høy risiko og kostnader for å hente den ut.

3.1.5 RGB-kamera:

Rødt, Grønt og Blått kamera som brukes for å ta vanlige fargefotografi av jorden og kan også brukes for geografisk orientering av satellitten. På denne tiden av rapporten er ikke modell fastbestemt og da heller ikke innfestningen til satellitten, Figur 3.9 [7] viser et eksempelblide på et RGB-Kamera

Figur 3.9: Eksempel RGB-Kamera

3.1.6 Sjokktest fasiliteter:

Sjokktestfasiliteter er innretninger som er konstruert slik at de skal kunne helt eller delvis kunne replikere fysiske sjokk på ulike komponenter og sammenstillinger. Slike fasiliteter blir brukt i dagens industri over hele verden for å kvalifisere produkter for alle mulige sjokk. Fasilitetene blir vanligvis klassifisert etter hvilken type sjokk de produserer (Forklart dypere under 4.4 sjokk kategorisering) men, kan forklares lettere ved å se på hvordan sjokket som skal produseres er i forhold til de ulike miljøene, ut fra denne tilnærmingen kan vi dele de i 3 kategorier [8]:

- **Enkle sjokkpuls maskiner:**
  Disse fasilitetene produserer sjokk med en enkel matematisk fremstilling. Disse sjokkene brukes ofte for å simulere enkelttilfeller av sjokk som for eksempel fall og enkle kollisjoner. De er ofte gjenkjennelige ved at de utfører en enkel bevegelse og ikke har mulighet til konfigurering av innfestning til ulike DUT-er.
- **Komplekse sjokk puls maskiner:**
  På grunn av den store variasjonen i sjokk som komponenter kan utsettes for er det ofte ønskelig å produsere sjokk som kan replikere flere typer sjokk med forskjellige karakteristikker og skadepotensialer. Slike fasiliteter kan ofte gjenkjennes ved at de har flere mulighet til justering av komponenter, innfestninger av DUT-er, regulering av sjokk hastighet og kollisjonsområde.
- **«Multi-impact» sjokk maskiner:**
  Mange miljøer utsetter utsyr for en relativt stor mengede sjokk over en kortere periode, for eksempel under transport. Disse sjokkene har ofte lavt skadepotensiale individuelt men deres samlede effekt vil ofte kunne ha skadepotensiale som fører til svikt. Slike fasiliteter er ofte gjenkjennelig ved at de bruker vibrasjon for å simulere sjokkene.

Resultatet av de fleste sjokktester er basert på en svikt modell. Svikt i komponenter er hvis det er feil eller endring i ytelsesevne som hindrer komponenter i å gjennomføre deres hovedoppgave. Det blir skilt mellom to typer svikt [8]:

- **Hard svikt**.
  Er hvis komponenter svikter på grunn av en permanent fysisk skade som gjør at komponentene ikke er i stand til å gjennomføre sin oppgave. Kilden til hard svikt er ofte observerbar, for eksempelsom ett brudd i mekaniske eller elektriske komponenter.

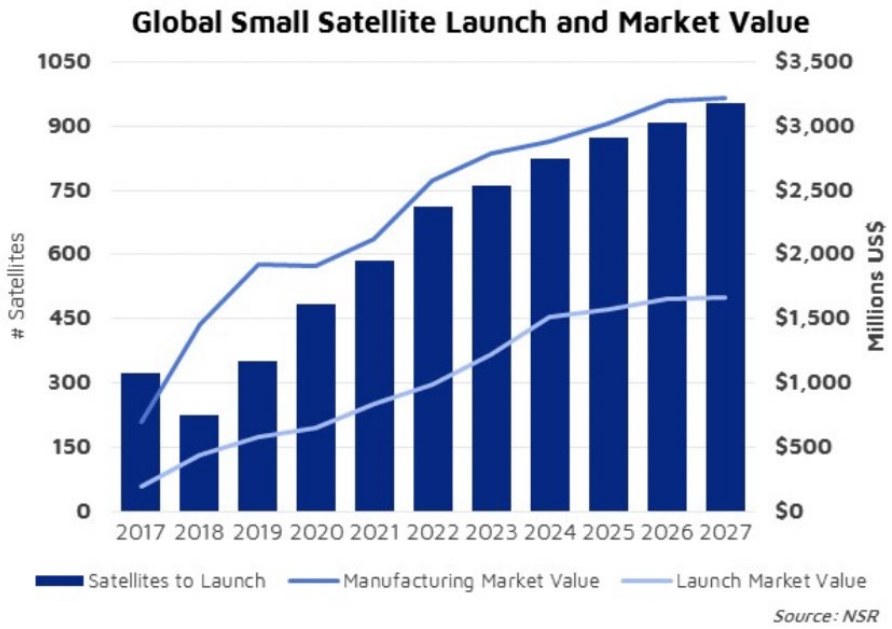
- **Lett svikt.**
  Er hvis komponenter svikter på grunn av sjokk og vibrasjon, men etter disse forstyrrelsene er borte vises ingen fysisk skade og komponenten fungerer slik den skal. Slike svikt oppstår oftest i optiske og elektriske komponenter, de kan også oppstå i mekaniske komponenter som for eksempel gyroskoper.

3.2 MARKEDSANALYSE

3.2.1 Marked for **små satellitter**

Marked for små satellitter kan brukes til en rekke ulike tjenester som telekommunikasjon, bildeteknologi, værdata, overvåkning og diverse andre oppgaver til forskjellige markeder.

Det globale Smallsat markedet størrelsen ble i 2015 verdsatt til 2045 millioner USD [9]. Som vist i figur 3.10 [10] er det forventet at innen 2025 skal det skytes opp over 2500 Smallsats fordelt de forskjellige bruksområdene. Det er også forventet at markedsverdien for oppskytning og produsering vil øke til en samlet verdi på over 4500 millioner USD.



Figur 3.10: Prognoser for markedsvekst i småsatellitt markedet

3.2.2 Markedet for sjokktesting

Det gjennomføres mekanisk sjokktesting på nesten alle produkter som inneholder elektronikk eller mekaniske komponenter. Dette brukes analytisk for å finne sannsynligheten for svikt i produkter. Den økende etterspørselen etter sjokktestsystemer for å kontrollere skjørheten til komponenter i et miljø med ulike mekaniske sjokknivåer er en av de viktigste drivkreftene i markedet for sjokktestsystemer. På grunn av dagens industris krav om kvalitet og bærekraft i produktene, sikres markedsvekst i sjokktest markedet.

Prognosene for vekst i små satellitt markedet gir et godt grunnlag for å vurdere veksten innen sjokktesting, da behovet for sjokktesting vil øke parallelt med behovet for små satellitter.

3.2.3 Markedet for hyperspektrale kameraer.

Da bruksområdet til hyperspektral bildebehandling er stadig økende innen militær, medisin og observasjon, vil dette markedet trolig være stabilt økende i årene fremover.

I 2017 ble det globale markedet for hyperspektral bildebehandling validert til 61.9 millioner USD og har en forventet verdi på 108.5 millioner USD innen 2023 [11].

4 INNFØRING TIL SJOKK:

4.1 FAREMOMENTER RUNDT OPPSKYTING AV SATELLITTER

Før en satellitt kan gjøre jobben den er designet for å gjøre i bane rundt enten jorden, månen eller en annen planet, må den kunne overleve ferden dit. Noen av de største farene for en satellitt foruten det miljøet den skal leve i er:

- Rakettoppskytingen
- Ferden i raketten
- Separering av hjelpetrinn
- Utskytingen fra raketten

Selve rakettoppskytningen kan være det største bidraget til eksterne belastninger satellitten vil kunne utsettes for. Antenningen av rakettmotorene, den høye akselerasjonen og detoneringen av pyrotekniske fastspenningsbolter til utskytingsrampen, kan gi store sjokk og vibrasjoner i raketten som forplanter seg til kapslene satellittene befinner seg i.

Under selve ferden vil satellitten oppleve mer vibrasjoner enn sjokk, disse vibrasjonene oppstår fra både interne vibrasjoner i rakettmotoren og dens drivstofftilførsel samt eksterne vibrasjoner fra atmosfærens innvirkning på raketten.

Separering av hjelpetrinnsmotorer skjer oftest ved å detonere pyrotekniske festebolter som holder stegene sammen. Detoneringen av festeboltene samt oppstart av andrestegsmotorene gir en ny kilde for sjokk i raketten som kan forplante seg til satellittene.

Når raketten er i området satellitten skal slippes i, blir den skutt ut av kapselen ved hjelp av pyrotekniske ladninger, pneumatisk trykk eller med en mekanisk fjær. Den vanligste metoden for å skyte ut en kubesatellitt er med en mekanisk fjær da dette er et mindre komplekst system som også gir lave belastninger på satellitten.

En siste kilde for sjokk, kan være deling av satellitten, eller utfolding av antenner og annet eksternt utstyr som ville tatt for stor plass i utskytingskapselen. Disse siste operasjonene foregår oftest ved hjelp av mekaniske fjærer, men kan også være pyrotekniske eller pneumatiske ladninger alt etter hvilken operasjon som gjøres.

4.2 EFFEKT PÅ KOMPONENTER

Store sjokkpåkjenninger på komponenter og utsyr er kjent for å kunne føre til full svikt av systemer. I romfartsindustrien vil dette kunne føre til totale tap av oppdrag eller katastrofale konsekvenser som en eksplosjon eller kollisjon av romfartøyet.

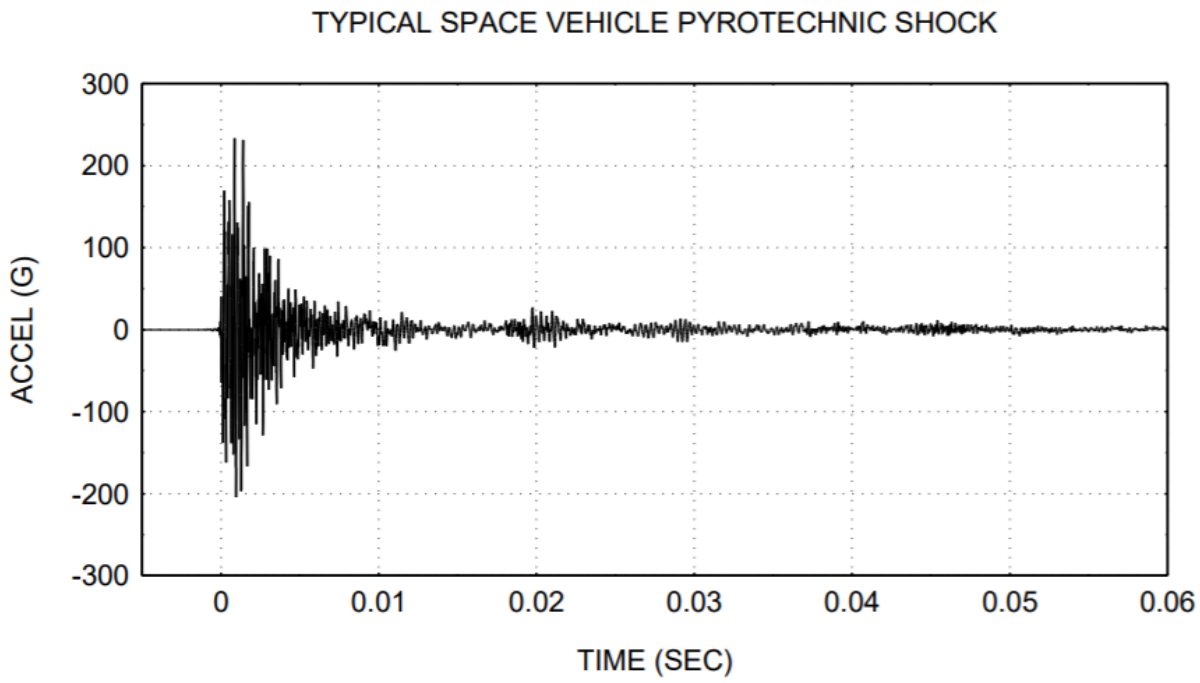
Sjokk kan føre til direkte skade utstyr for eksempel ved fall eller kollisjoner. De kan også være ødeleggende hvis bølgelengdene til ett sjokk korresponderer med egenfrekvensene til ett system, for eksempel kortslutninger i elektronikk, brist og forskyvninger i optikk og skader i andre komponenter som kan gjøre utsyr helt ubrukelig eller delvis defekte.

4.3 MEKANISK SJOKK.

Et mekanisk sjokk er en ikke periodisk eksitasjon av et mekanisk system som er preget av plutselighet og høy alvorlighetsgrad, og det forårsaker vanligvis betydelige forskyvninger i systemet. [13]

En typisk sjokkpuls som vist i figur 4.1 [12], kjennetegnes med høye akselerasjonsverdier G over en kort tidsperiode. Hoved karakteristikken for sjokk som oppstår i felten er deres store variasjon. Disse felt sjokkene kan ikke defineres nøyaktig noe som fører til at simuleringene aldri kan nøyaktig duplisere sjokkene som oppstår i feltet.

Mekaniske sjokk kan oppstå som konsekvens av en rekke faktorer som fro eksempel: kollisjon, fall, pyrotekniske innretninger og kraftige vibrasjoner.



Figur 2.1: Typisk utseende på et mekanisk sjokk

4.4 SJOKK KATEGORISERING

De store variasjonene i sjokk og den høye variasjonen i skadepotensial gjør det hensiktsmessig å kategorisere sjokkene. Det er standard å kategorisere dem slik [12]:

Hastighetssjokk

Et hastighetssjokk, er et sjokk som er et resultat av en høy netto endring i hastigheten av et system. En høy netto endring i fart vil si at hastighetsendringen er kort i forhold til den fundamentale grunnfrekvensen i systemet. Denne typen sjokk induserer ofte mye energi på frekvensnivåer rundt systemets egenfrekvens og har derfor et stort potensial til å gjøre skade på systemet.

Forskyvningssjokk

Forskyvningssjokk en annen type sjokk som også har potensial til å ødelegge materialer og strukturer. De er veldig like hastighetssjokk utenom at de istedenfor å øke netto endringen i hastighet blir den null.

Høyfrekvenssjokk

Høyfrekvenssjokk skaper lave eller ingen endring i netto hastigheten til systemet. De er istedenfor identifisert ved at de er høyfrekvente med høy akselerasjon i svingningene. Disse svingningene overskrider sjeldent egenfrekvensene til systemet og blir fort dempet i materialet og blir derfor ikke kategorisert som sjokk som har høyt skadepotensiale. Elektronikk og skjøre materialer er utsatt.

Høyfrekvenssjokk er den sjokktypen som satellitt komponenter hovedsakelig blir utsatt for gjennom sin levetid

Pyrosjokk eller pyrotekniske sjokk er høyfrekvenssjokk som har pyrotekniske komponenter som sin kilde. Høyfrekvenssjokk blir ofte omtalt som pyrotekniske sjokk i mange bøker og artikler, men kan også oppnås på andre måter som for eksempel ved for eksempel mekaniske teknikker.

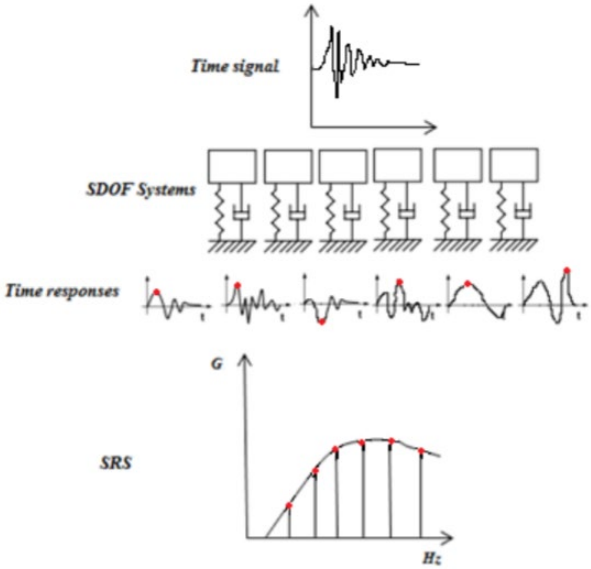
Da Høyfrekvensoscillasjonene raskt blir svekket med hensyn til avstand og antall diskontinuiteter til sjokkilden, er det blitt industristandard å kategorisere pyrosjokk. Definisjonene til tross for deres navn er ikke forbundet med avstand, men heller med sjokknivåene som utstyret blir utsatt for.

- **Near-field:**
  I near-filed miljø er sjokket et resultat av dirkete forplantning av sjokkbølgen. Toppakselerasjonene kan nå nivåer over 10000g og der en betydelig mengde energi i frekvensområdet over 10000 Hz. Det er vanlig å unngå å designe utsyr som er sensitiv som skal plasseres i ett slikt miljø i romfartsindustrien.
- **Mid-field:**
  I midfield-miljøene er sjokket et resultat av en kombinasjon av direkte overføring og resonansrespons i strukturen. Topp amplitudene ligger mellom 1000g og 10000g. og hovedparten av energien blir overført i frekvensområdet mellom 3000 – 10000 HZ
- **Far-field**:
  I Far-field er sjokket dominert av resonansrespons i strukturen. De høyeste akselerasjonene og frekvensene har blitt dempet slik at toppnivåer av akselerasjon ikke når mer en 1000 g. Frekvensområdet som får tilført energien ligger under 3000 Hz.

Sjokk respons spektrum (SRS)

Å reprodusere en pyroteknisk puls for komponentkvalifisering testing er utrolig vanskelig med en mekanisk testmetode, derfor ble det utviklet en måte for å få tilnærmede like resultater.

En SRS [10] er en grafisk representasjon av et sjokk der den horisontale aksen viser egenfrekvensene til hypotetiske «single degree of freedom» system og den vertikale aksen viser den høyeste akselerasjonen som dette systemet vil oppleve som en konsekvens av sjokket som vist i figur 4.2 [12].



Figur 4.2: Sjokkpuls til SRS.

Ved målinger av de pyrotekniske sjokkpulsene under en oppskytnings prosess kan man samle nokk data til å skape en SRS. Da det hvert pyrosjokk alltid er unikt, trenger man en mengde data for å kunne skape en SRS som er statistisk pålitelig. En slik SRS vil så bli brukt for å kvalifisere komponenter for oppskytning.

Det er viktig å huske at hvert unike rakettsystem vil ha en unik SRS, og nyttelaster vil ha ulike SRSer basert på hvor de er plassert i forhold til sjokkildene. En SRS kan gir et estimat på skadepotensialet til et sjokk for alle strukturer da alle egenfrekvensene i interesseområdet kan bli sett på individuelt.

Test kriterier for sjokk er vanligvis gitt som en kvalifikasjons SRS og er et standard verktøy brukt i romfartsindustrien. Dette er ikke tilgjengelig i HYPSO prosjektet da det enda ikke er bestemt hvilken rakket som skal brukes til oppskytning.

Ulempen med å bruke en SRS er at effektiv varighet og fase av et sjokk forsvinner i omgjøring fra akselerasjon over tid til en SRS. Noe som resulterer i at sjokk kan ha lik SRS men ulikt skadepotensiale.

Det er også flere problemer som kan påvirke kvaliteten til en SRS. Hvis akselerometeret blir påvirket slik at null linjen blir forskjøvet, en såkalt «Zero shift», slike forskyvninger kan komme av en rekke faktorer for eksempel kabelstøy og fysisk bevegelse av sensor komponenter. Slike feil kan føre til over testing av komponenter. Ved å ha en større datamengde med flere målinger vil man ha bedre grunnlag for å luke bort slike avvik.

4.5 MODIFIKASJON AV TESTKARAKTERISTIKK

En parameter kan påvirke en SRS mer en enn annen og effekten å justere på en parameter kan bli undersøkt.

Hvilke faktorer kan påvirke en SRS:[13]

- Kollisjonshastighet
- Form på hammer
- Hammer vekt
- Hammer material
- Område hammer treffer
- Område testobjekt blir plassert
- Ekstra masser på mottaker
- Form på ambolt
- Amboltmaterial
- Festemetode av testobjekt
- Mekaniske filter mellom hammer og ambolt

Disse kan bli kombinert på utallige måter for å få sjokktest fasiliteten til å gi den ønskede SRS-en. Å designe en sjokktestmaskin kan bli sett på som en prosess om å velge ut hvilke av disse paremateme som man vil holde konstant og hvilke som skal justeres. Noen parametere er enklere og endre og har større påvirkning enn andre.

Når sjokktestanlegget er ferdig produsert er det vanskelig å endre material av delene, men det er enkelt å endre kollisjonshastighet eller å legge på mekaniske filter. Materialet og formen kan lett endres med å ha flere versjoner av nøkkel deler. Men dette kan være dyrt, spesielt for store og komplekse deler.

Det vil alltid ta en betydelig mengde prøving og feiling for å justere en SRS til ønsket konfigurasjon. Denne prosessen kan bli minimert med å samle kunnskap om hvilke og hvordan parametere påvirker en SRS.

5 UTVIKLING AV NØDVENDIGE SPESIFIKASJONER SOM GRUNNLAG FOR ARBEIDET

Sjokktestriggen skal utformes slik at den kan sjokkteste de 3 nyttelastene HSI-Kameraet, SDR-en og RGB-Kameraet. Innfestningen til sjokktestriggen må helt eller delvis replikeres slik at riggen skal kunne brukes til å teste andre komponenter i senere prosjekter. Riggen må være justerbar slik at det er mulig å teste for sjokk i 3-akser for ulike komponenter.

Input sjokk på sjokktestriggen skal kunne utføre ett input sjokk på 70 G, 2 ms og en Q-faktor = 10 noe som tilsvarer en demping på 5%. Det produserte sjokket skal ligge i far-field klassen. Det skal være fokus på at sjokktesten skal kunne justeres slik at en ønsket sjokkarakteristikk skal kunne oppnås ved hjelp av en SRS.

Testen utført av denne sjokktestriggen skal være binær og gi et svar på om komponentene overlever et bestemt sjokk eller ikke, dette blir bestemt ved utføring av funksjonstest av komponentene etter testingen.

6 GENERELL METODE

Hvilke systemer ble brukt i prosjektet?

I begynnelsen av prosjektet ble det gjennomført en enkel studie for finne ut hvilket DAK og FEM verktøy som skulle bli benyttet i prosjektet. Det var viktig å evaluere dette ordentlig, fordi det ville påvirke arbeidsflyten. Endringer i dette valget ville også ført til mere arbeid senere i prosjektet da vi må ha endret formatet til CAD filer. Denne prosessen fører ofte føre til data tap som underliggende informasjon og material data, noe som måtte ha blitt tilført på nytt.

En stor faktor for valget var at studentene hadde erfaring med Autodesk Inventor, og hadde gode erfaringer med deres FEM verktøy Autodesk Nastran.

Autodesk Inventor 2019
Autodesk Inventor 2019 er et DAK-verktøy. Inventor er godt kjent i industrien. Autodesk ble valgt på grunn av intuitivt brukergrensesnitt, funksjonalitet og tidligere erfaring med programmet, også støtte til Nastran ble satt høyt.

Autodesk Nastran In-CAD 2019
Autodesk Nastran In-CAD er en FEM solver, som brukes til lineær og ikke lineær struktur, og termiske analyser. Nastran har mange ulike simulerings muligheter. Hovedfordelen med å bruke Nastran er at alle kan bruke samme FEM modell mesh i simuleringen til tross for ulike rammer og restriksjoner.

Slack
Slack ble brukt til generell kommunikasjon mellom gruppens medlemmer. Arbeidsrommet strekker seg gjennom hele HYPSO prosjektet.

Team gantt
Team gantt er et online prosjekt planleggingsverktøy. Verktøyet er enkelt og oversiktlig, og gjør det enklere å følge flyten i arbeidet.

Google Drive
Under oppstarten av HYPSO prosjektet startet ble Google Drive valgt som hoved fildelings plattform. Drive har revisjonskontroll og åpner for enkel fildeling på tvers av prosjektet.

Sharepoint
Sharepoint er en online samarbeidsplattform, som hovedsakelig brukes til fildeling/lagring. Sharepoint ble brukt internt i bacheloroppgaven da det ikke var nødvendig å dele alle filene med HYPSO teamet.

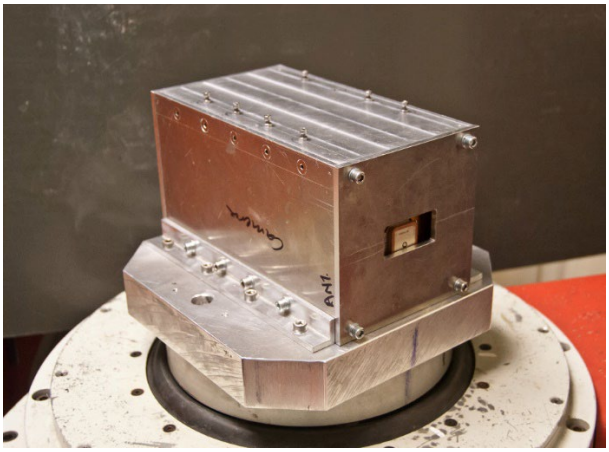
Trello
Trello er et online verktøy for å dele og fordele fremgangen i de forskjellige oppgavene hver undergruppe i prosjektet hadde. Verktøyet var ment for å hjelpe å holde oversikt over arbeidsoppgaver og for å kunne sette seg inn i andre gruppemedlemmers arbeid.

7 UTVIKLING, EVALUERING OG PRESENTASJON AV ALTERNATIVE KONSEPTER

For å teste en CubeSat behøver man strengt tatt ikke sofistikert utstyr, da hensikten med Kubesatellitter er å konstruere små enheter, med relativ kort levetid for å utføre det oppdraget man ønsker, så billig som mulig med «hyllevare» komponenter. Denne filosofien kan videreføres til testingen. Enkelte har antydet at sjokktesting ikke er nødvendig, mens andre stundentsatellitter har benyttet veldig enkle metoder slik som å benytte en slegge til å slå på satellitten eller å slippe satellitten i fritt fall på en relativt hard overflate. Valg av testmetode og hvor viktige de forskjellige testene vil være, vil variere med kompleksiteten og hvilke komponenter satellitten inneholder. I HYPSO er det fastsatt at alle tester som kan hjelpe å sikre en suksessfull oppskyting skal gjøres så nære testparameterne oppskytingsmegleren har oppgitt.

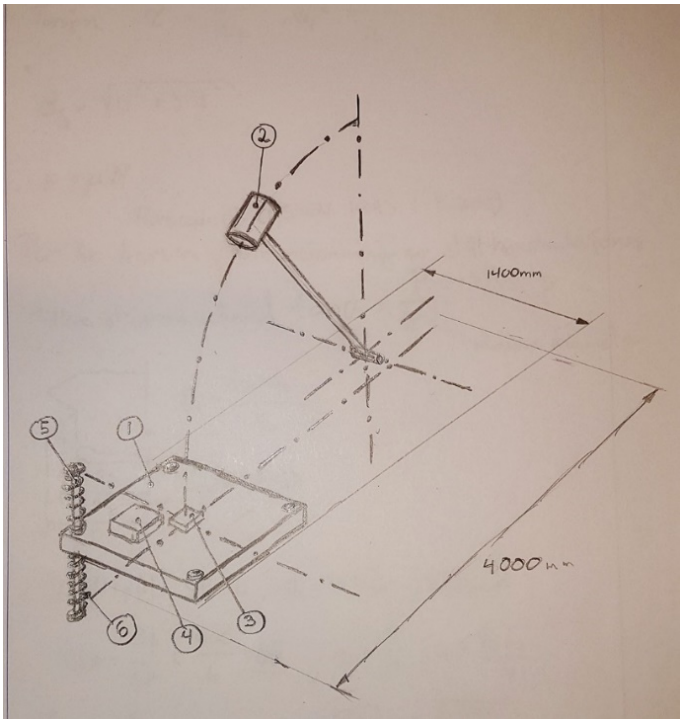
Ved testing av en hel satellitt benytter man en testkapsel lik den på figur 7.1 [14] eller 7.2 [15] som repliserer kapselen som «skyter» satellitten ut fra oppskytningsfartøyet.

Figur 7.1: Kapsel utviklet av CalPoly.



Figur 7.2: Eksempel på en testkapsel montert på et vibrasjonsbord

En populær løsning ser ut til å være en pendelhammer som gir et støt til en resonerende plate, hvor enheten som skal testes monteres på en måte som repliserer hvordan den er festet til satellitten. Figur 7.3 av pendelhammer viser resonansplaten (1), pendelhammeren (2), ambolten (3), plassering av testobjekt (4) og demping (5).



Figur 7.3: en pendelhammer som gir et støt til en resonerende plate.

Et annet design med pendelhammer vises i Shock and Vibration Handbook figur 7.4 [8]. Denne pendelhammerløsningen har en magnetisk brems, denne vil forhindre sekundære støt å inntreffe men gir en mer kompleks konstruksjon. Denne konstruksjonen vil behøve en tung sokkel for å være stabil under testing, og eller må støttes opp med dempefjører. Den avbildede maskinen er av relativt stor størrelse og benyttes på vesentlig større enheter enn det en kubesatellitt er. Denne løsningen krever også at enheten som testes rekonfigureres for testing i alle tre akser.

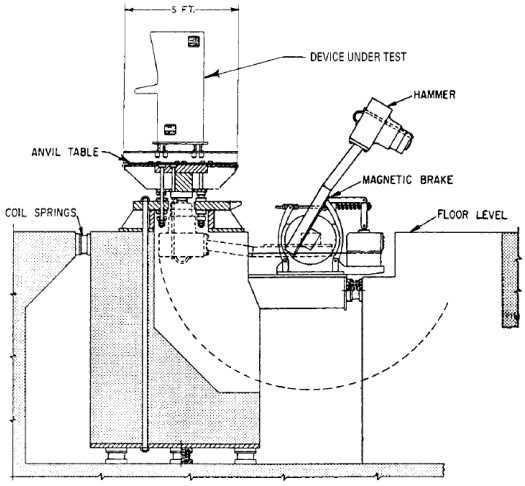
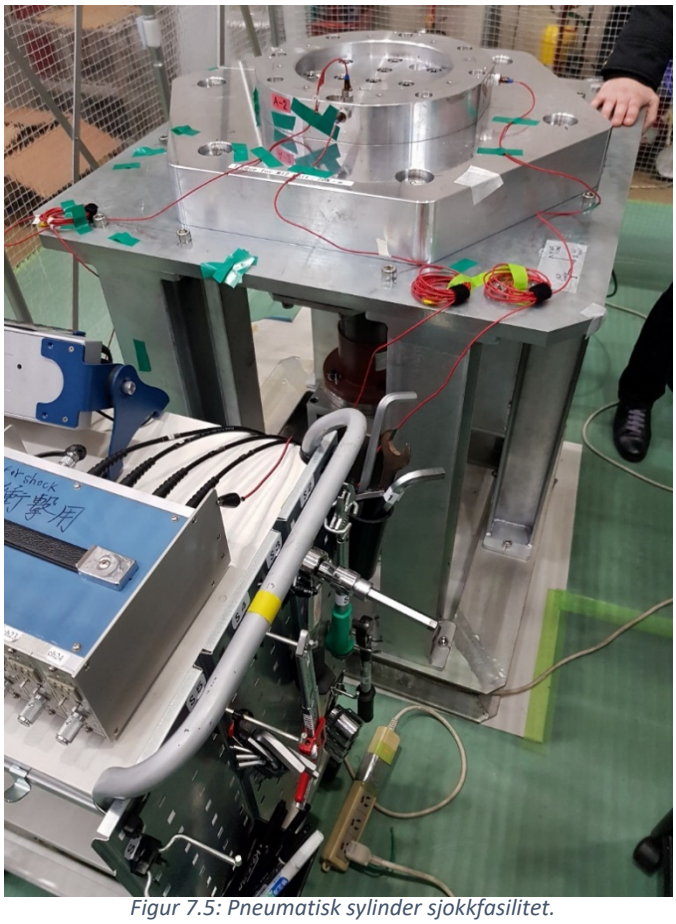


FIGURE 26.8 High-impact shock machine for medium-weight equipment.

Figur 7.4: Pendelhammerløsning

En alternativ løsning til å bruke en pendelhammer kan være å benytte en pneumatisk sylinder lik Kyutech (Kyushu Insitute of Technology) i Japan benytter for sjokktesting. Satellitten eller komponentene som skal testes monteres på toppen, den sekskantede platen kan bevege seg oppover men er låst mot sideveis bevegelse ved hjelp av de seks styrepinnene. Under bordet er det en pneumatisk sylinder som «skytes» mot bunnen av topplaten som lager sjokket. Dette er et veldig robust design som er veldig sikkert i bruk og den er relativt enkel å bruke



Figur 7.5: Pneumatisk sylinder sjokkfasilitet.

Problemet med dette designet er at det er komplekst, det krever en del spesialkomponenter for å sikre en sikker og stabil funksjon av pneumatikk komponentene og det kan være komplekst å kalibrere og justere systemet. Denne maskinen krever at enheten som testes må rekonfigureres for sjokktesting i alle tre akser.

Ønsker man derimot å teste en enhet i alle tre akser med en konfigurasjon kan man benytte en maskin lik den Figur 7.6 [8].

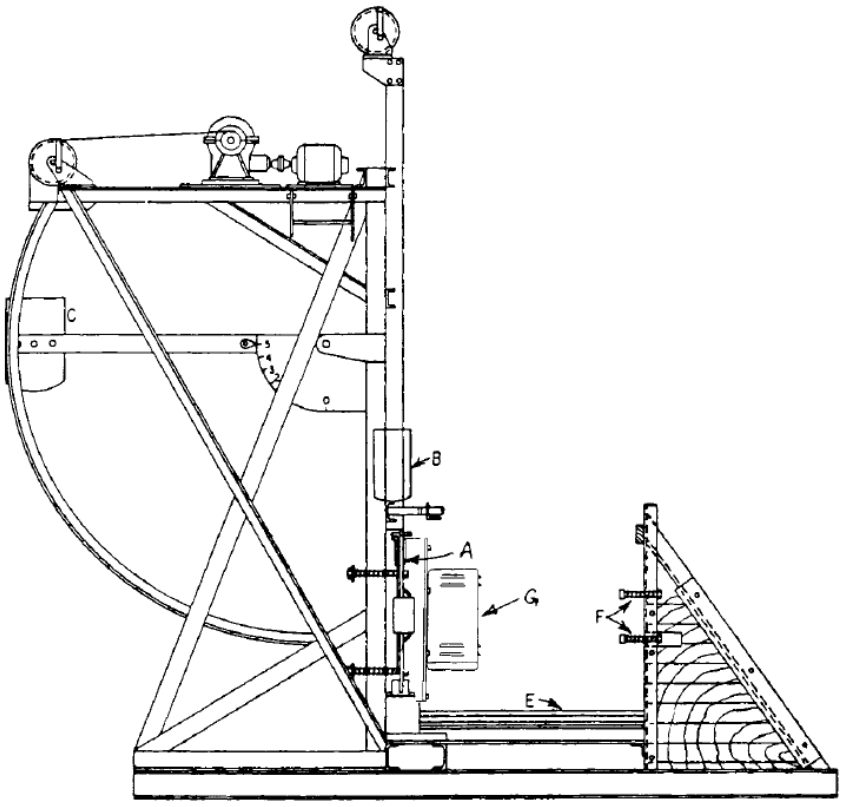
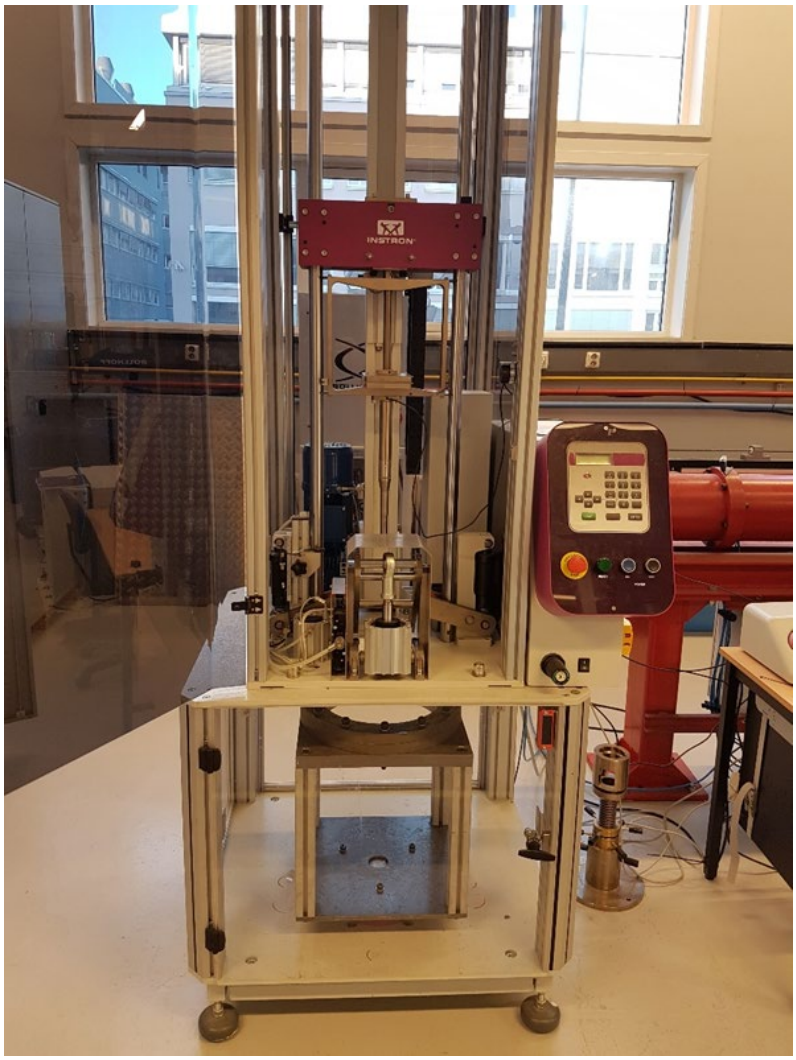


FIGURE 26.6 Navy high-impact shock machine for lightweight equipment.

Figur 7.6: Sjokktest maskin for testing i 3 akser.

Disse maskinene benyttes oftest til sjokktesting i mid- til near-field intensitet. Amboltplaten (A) kan utsettes for støt fra pendelhammeren (C) eller droppvekten (B). Noen versjoner har en sekundær pendelhammer for støt i siste akse, mens den illustrerte maskinen har muligheten for å snu amboltplaten (A) 90° for å sjokkteste i siste akse.

Ved NTNU's Materialtekniske Laboratorier ved Richard Birkelands vei 1A står det en maskin som benyttes til penetrasjonstesting vist på figur 7.7. Maskinen er av merket Instron og har innebygd lastcelle med datalogging samt brems for droppmekansimen.



Figur 7.7: Materialtekniske Laboratorier penetrasjonstestings maskin

Maskinen benyttes hovedsakelig til penetrasjonstesting av plater. Platene monteres i klemringen som vises på toppen av rammen i sokkelen av maskinen, den røde bommen kan lastes med ønsket vekt, man hever bommen til ønsket dropphøyde og utløser den. Bommen faller ned og piggen vil støte i testplaten og penetrere den om det er nok kraft i støtet. Piggen som treffer testplaten er utbyttbar slik at man kan benytte forskjellige typer spiss. Lastcellen vil registrere støtet og logge verdiene, og bremsen vil hindre uønsket bevegelse av bommen.

Maskinen i seg selv, er per dags dato ikke konfigurert for støt testing. Vi mener maskinen er en god kandidat til sjokktesting, da maskinen har droppmekanisme og datalogging. Med få om noen modifikasjoner på selve maskinen, bør den kunne bli benyttet til sjokktesting. Det man må gjøre er å lage en konstruksjon i sokkelen av maskinen som kan formidle støtet til enheten som skal sjokktestes. Penetrasjonspiggen bør byttes ut med en hammer med større kontaktflate for å hindre deformasjon av amboltplaten. Konstruksjonen må ha en løsning for å teste enheter i 3 akser. Ved å benytte en eksisterende maskin vil man forenkle byggeprosessen, og man vil kunne ha en maskin som kan benyttes til flere funksjoner.

8 VALG, VIDERE DETALJERING OG RAFFINERING AV DET MEST LOVENDE KONSEPT

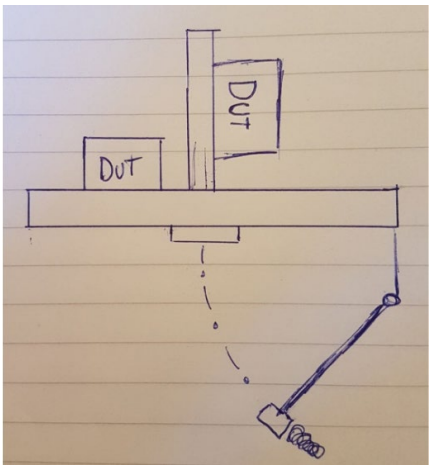
Vi anså det som kun to reelle valg når man må ta hensyn til kompleksitet i design og kanskje spesielt ved bruk av maskinen. Valgene var enten å designe en pendelhammer med resonansbord eller å benytte den eksisterende maskinen hos Materialtekniske Laboratorier.

Pendelhammer:

Et pendelhammerbord kan designes enten med en fallende hammer eller med en mekanisk akselerert hammer. Vi så på muligheten med å ha pendelhammeren akselerert ved hjelp av en fjær som vist i figur 8.1.

Figur 8.1: Konstruert konsept for fjærakselerert pendelhammer

For å teste i 3- akser så vi på en løsning som vist i figur 8.2, Med denne løsningen kan man konstruere resonansbord slik at det enkelt kan justeres å endre SRS karakteristikk. Ved å kunne flytte posisjon til DUT-er.

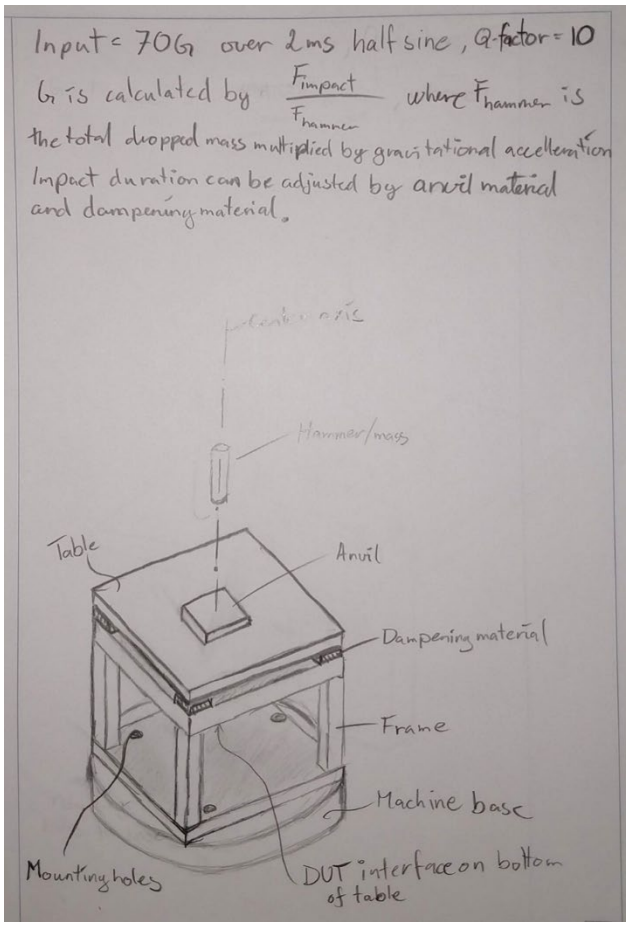


Figur 8.2: Konsept for testing i 3-akser ved bruk av fjærakselerert pendelhammer.

Vi mente at denne løsningen kunne inneha for store faremoment ved bruk, da man vil potensielt ha mye energi lagret i en spent fjær, og oppspenningen av denne fjæren kan bli komplekst for å lage en sikker løsning med en lang levetid.

Bruk av eksisterende penetreringstestmaskin:

Ved å bruke den eksisterende penetreringstestmaskinen som fundament for en sjokktestingsmaskin, må man først undersøke hvordan man kan oppnå det sjokket som er oppgitt fra oppskytingsmegleren (NanoAvionics).

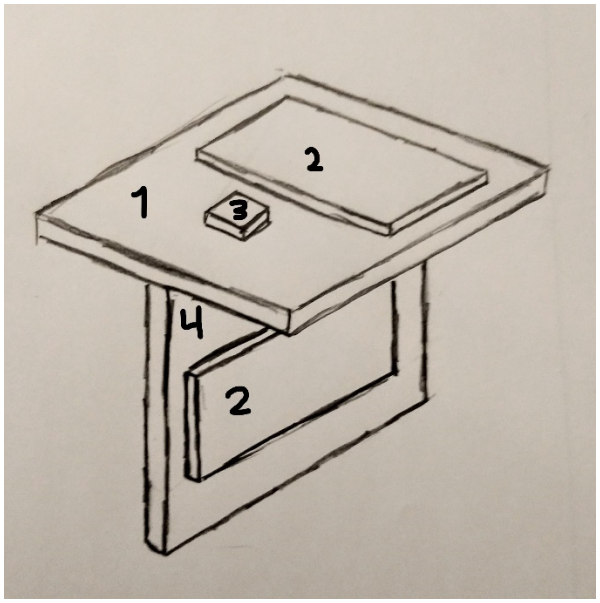


Figur 8.3: Utregninger av sjokk.

Ved å benytte den målte kraften av støtet og dividerer med kraften av hammeren med vekt i ro vil man kunne finne G-kreftene til støtet, som er oppgitt av NanoAvionics til å være 70G over 2ms halvsinus. Sinuskurven til støtet kan kontrolleres av dempingen av platen, og om mulig ved å bruke et mykere materiale i ambolten. Problemet med å bruke et mykere materiale i ambolten er at støtet fra hammeren kan være så stort at det kan plastisk deformere ambolten. Størrelsen på bordet må være stort nok til å kunne feste testplaten som komponentene skal festes til, som for eksempel vist i figur 8.3.

For å teste komponentene i alle tre akser så vi på 2 konsepter en T-løsning og en C-løsning: En løsning for testing i to av aksene kan man benytte seg av en vinkelplate hengende under topplaten som kan gi muligheten for å feste testplaten i to akser.

- **T-konsept:** Vist i figur 8.4

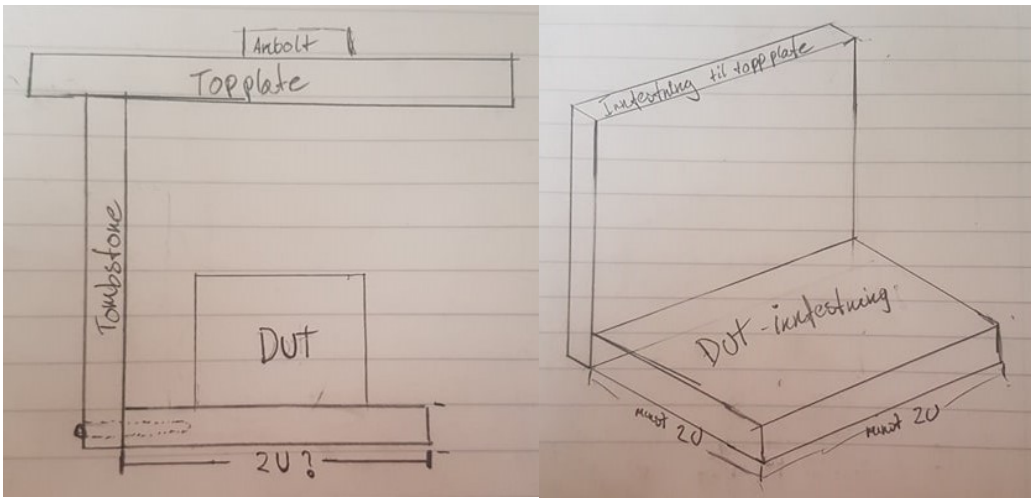


Figur 8.4: konsept for testing i 3 akser.

Under topplaten (1) henger en plate (4) hvor testplaten (2) kan monteres i to akser. På oversiden av topplaten er ambolten (3) og plassering for montering av testplaten for å sjokkteste i den tredje aksen.

- **C-konsept:** Vist i figur 8.5.

baserte seg på samme konsept bare at man fester en ekstra plate 90^0 på enden av platen som henger under.

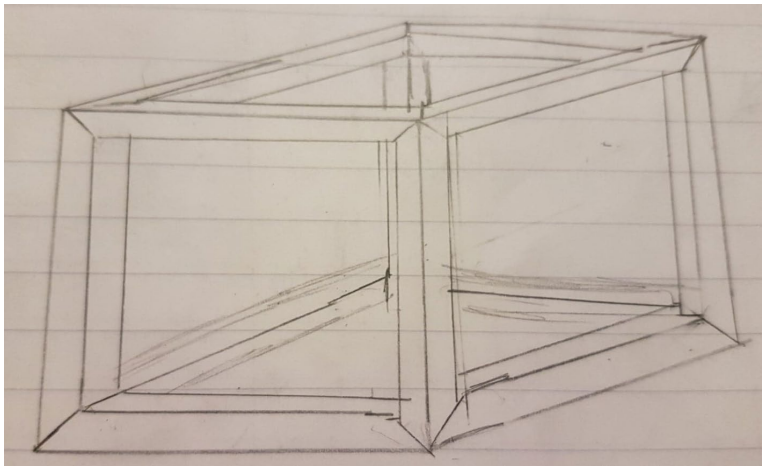


Figur 8.5: 2. konsept for testing i 3 akser.

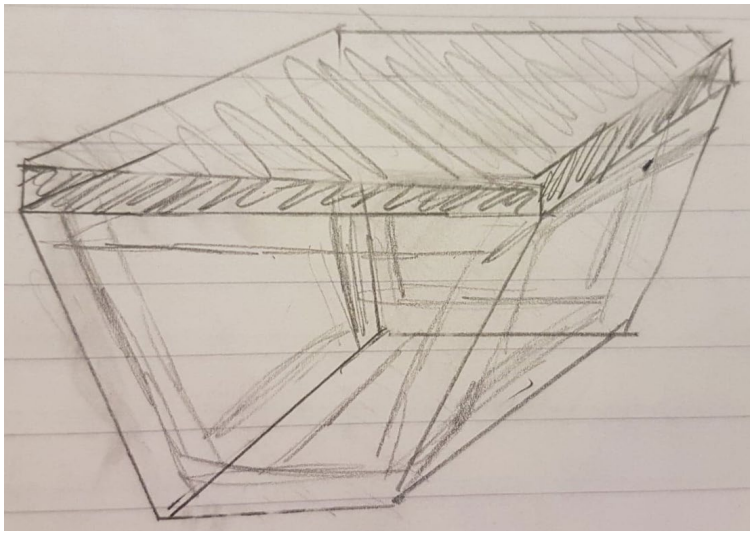
C-konseptet ble raskt utelukket da det mest sannsynlig ville innføre et for stort moment på innfestningen mellom 90^0 plata og den underhengene. Derfor ble det valgt å fokusere på T-konseptet.

Utforming av rammen:

Det ble vurdert flere ulike typer utforming på rammen for eksempel som vist i Figur 8.6 og 8.7. Valget av ramme er vanskelig da man ikke vet hvordan rammen vil påvirke egenfrekvensen til systemet. Hoved funksjonene til rammen er å stabilisere sjokksystemet og ved god innfestning til underlaget ble det antatt at valg av ramme ikke hadde mye å si i dette tilfellet.



Figur 8.6: kvadratisk ramme

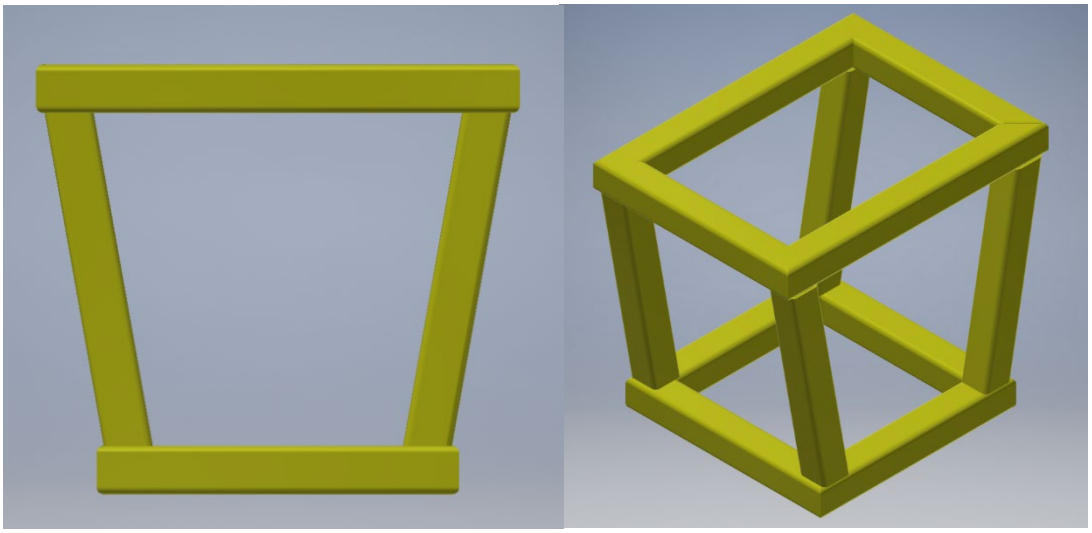


Figur 8.7: Ramme med mindre overheng mot sokkel

9 UTVIKLING AV STRUKTUR, UTFORMING OG DOKUMENTASJON AV UTVALGTE KOMPONENTER

9.1 RAMMEVERK:

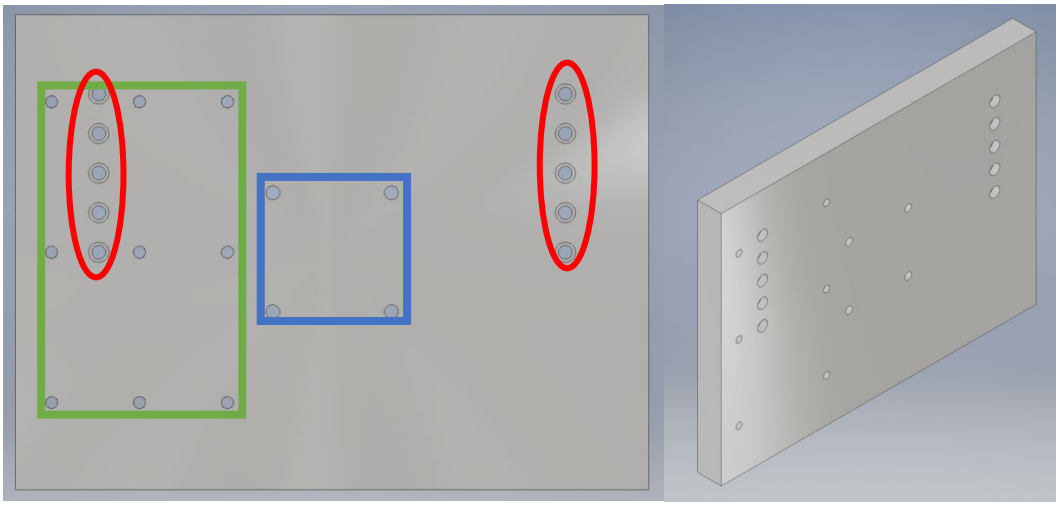
Vi valgte å konstruere en ramme med skrådde føtter for å gi minst mulig overheng mot sokkelen til den eksisterende maskinen og størst mulig overflate til platen for å få plass til enhetene som skal testes.



Figur 9.1: Valgt ramme design.

9.2 TOPPLATE:

En topp plate ble konstruert for innfestning til 9.3 Tombstone, Ambolten og



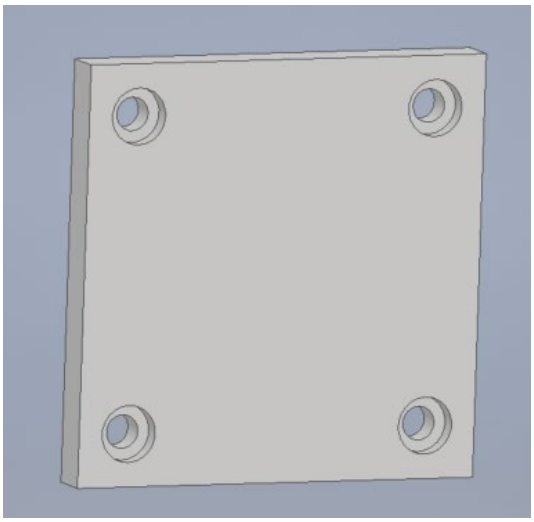
Figur 9.2: Modell av Topplate

Innfestninger er markert slik på Figur 9.2:

- Blå er innfestning til ambolt
- Rød er innfestning til Tombstone
  For å kunne justere plasseringen av 9.3 Tombstone med tanke på justering av en SRS.
- Grønn er innfestning av testplate for nyttelaster.

9.3 AMBOLT:

For at sjokket ikke skal direkte påvirke topplaten er det nødvendig å bruke en ambolt som ofrer seg for det dirkete sjokket. For å kunne replikere ett sjokk flere ganger er det viktig at kollisjonsflaten mellom hammer og topplaten er tilnærmet konstant, derfor er ambolten konstruert slik at den enkelt skal kunne byttes ut ved store deformasjoner og brudd.

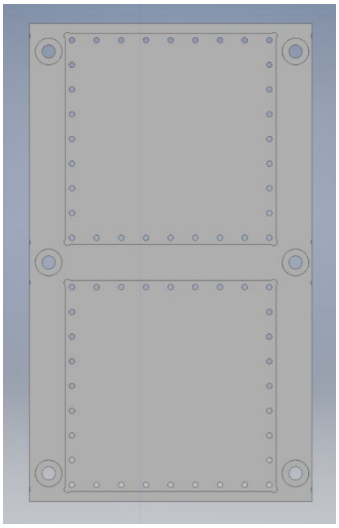


Figur 9.3: Ambolt

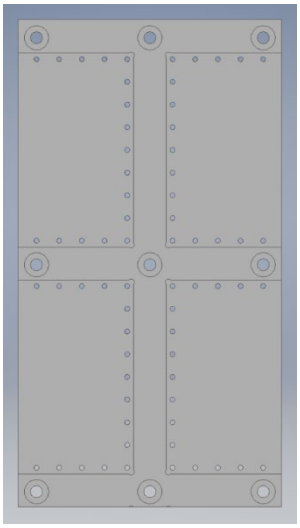
9.4 Innfestning av nyttelaster:

For å gjøre innfestningene av nyttelastene mest mulig realistisk i forhold til innfestning i satellitten, ble det valgt at innfestningsplaten skulle være så lik som mulig og gi de samme mulighetene som i satellitten.

Da nyttelastene kan festes på ulike måter i satellitten er det nødvendig for valgt konsept å ha to ulike sekundære innfestninger for testing i X-aksen. Dette kommer av det ikke er plass til en hel 4U innfestning på topplaten. Figur 9.4 er innfestning til nyttelaster som ikke er sentrert i satellitten og Figur 9.5 er for sentrerte nyttelaster slik som HSI kameraet.

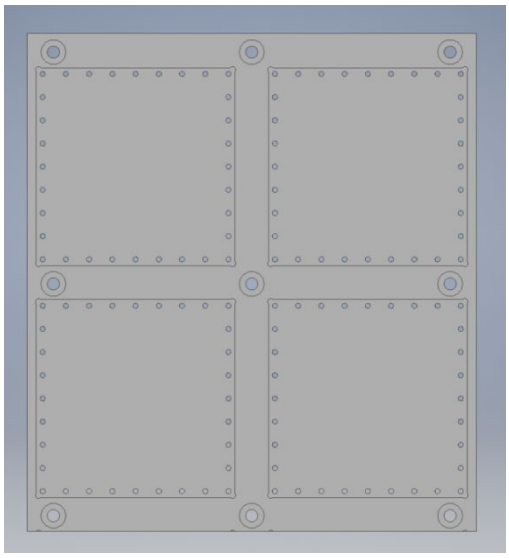


Figur 9.4: Secondary interface for ikke sentrerte nyttelaster



Figur 9.5: Secondary interface for sentrerte nyttelaster

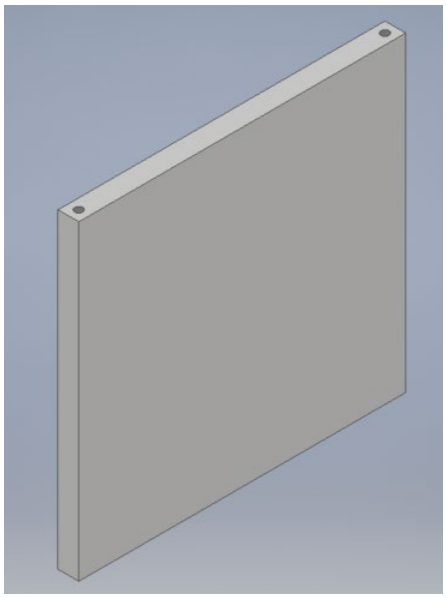
Innfestningsplaten vist i figur 9.6 er innfestningsplaten for å teste Y- og Z-aksen. Platen er slik at det er mulig å feste både sentrerte og ikke sentrerte nyttelaster.



Figur 9.6: 4U innfestningsplate

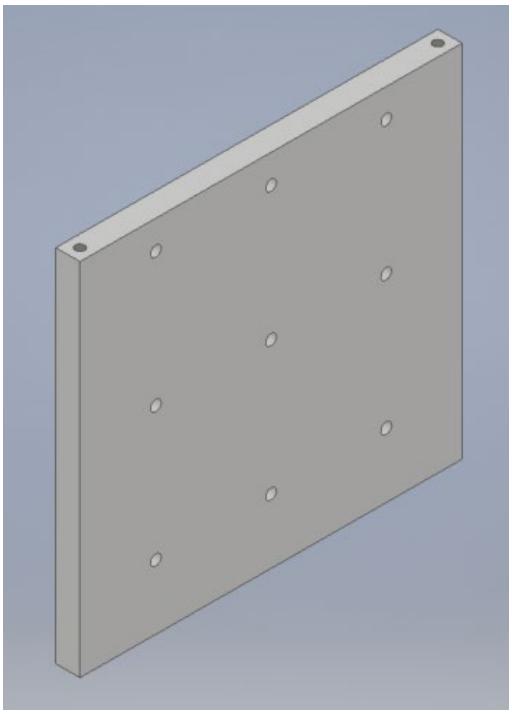
9.5 TOMBSTONE:

Med valgt løsning kreves det det en egen plate for innfestning av nyttelaster for testing i Y og Z-aksene. Ved å benytte en palte som henger under topplaten som vist i figur 9.7. Denne ble fikk kallenavnet Tombstone.



Figur 9.7: Modell av Tombstone før konstruksjon av hull for innfestning.

For å se på hvordan Tombstone ville reagere på ett far-field sjokk ble det gjennomført en modalanalyse for å på hvilke egenfrekvenser Tombstone hadde Vedlegg A. Basert på analysen av ble det valgt å plassere innfestningen til 4U innfestningsplaten slik at minst mulig av innfestningshullene skulle ligge i områdene påvirket av egenfrekvensene for å unngå at egenfrekvensene skaper for høye verdier. Det er derfor valgt å plassere hullene som i figur 9.8.

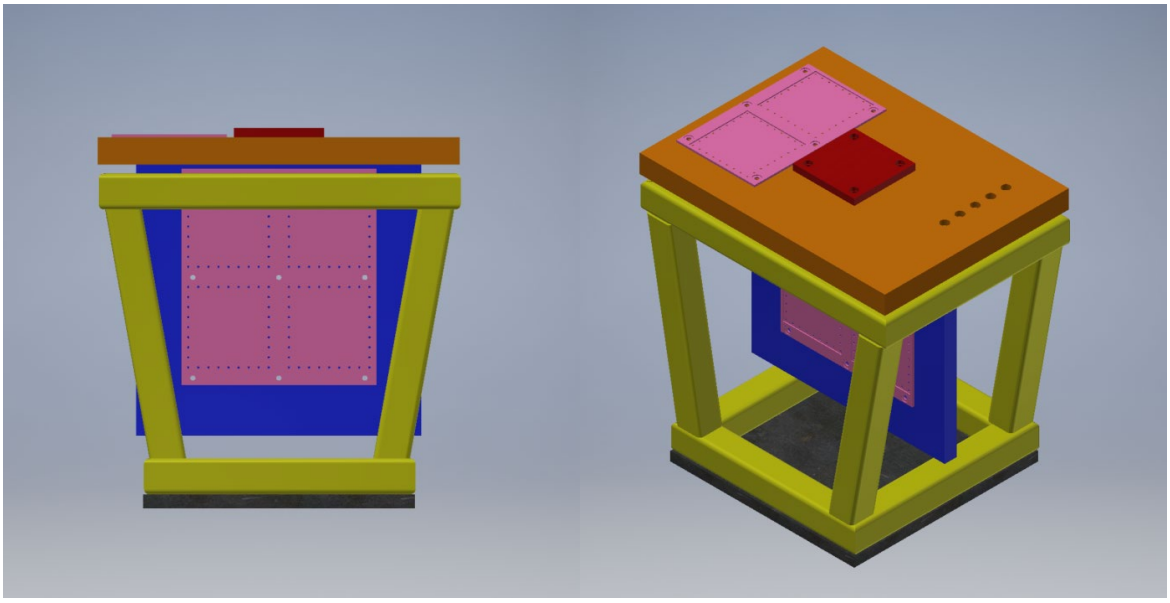


Figur 9.8: Modell av Tombstone etter konstruksjon av innfestning

10 FREMSTILLING OG TEST AV UTVALGTE ELEMENTER

Sammenstilling:

Figur 10.1 Viser sammenstilling av valgt konsept. Da penetrasjonsutstyret gir god kontroll på kollisjonshastighet og konseptet er designet for å kunne bruke forskjellige typer dempemateriale, samt det er gode innfestningsmuligheter for dummyloads og variasjons mulighet for innfestning av Tombstone vil det være mulig å justere sjokk karakteristikken til en viss grad.



Figur 10.1: 3D-modell av sammenstilling av valgt konsept

11 EVALUERING OG PRESENTASJON AV RESULTATENE

11.1 EVALUERING AV VALGT KONSEPT:

Siden dagens konsept er basert på å bruke utstyret til materialtekniske laboratorier er HYPSO prosjektet direkte avhengig av dem for å kunne utnytte denne løsningen. Dette var greit under gjennomføringen av bacheloroppgaven. Men i lengden kan det tenkes at dette er et uønsket senario og det bør om mulig utvikles en avtale for bruk av maskinen ved Material tekniske laboratorier, eventuelt muligheten for å etablere et testlaboratorie i egnede fasiliteter som kan brukes uavhengig av andre aktører.

Det er utallige måter å utføre sjokktester. Valgt metodikk er basert på tilgjengelig utstyr ved NTNU Gløshaugen for å minimere kost til NTNU Smallsat. Konsekvensen av en begrenset tidsramme gjør at vi ikke kan produsere valgt design og derfor heller ikke testet ut om ønsket sjokkvalitet er oppnåelig.

11.2 JUSTERINGSMULIGHETER OG REPETERBARHET AV SJOKK I VALGT KONSEPT.

Slik konseptet er nå er det uvisst om designet har tilstrekkelige muligheter for finjustering for å oppfylle en eventuell SRS. Dette er en konsekvens av at oppskytningsmegleren ikke har fremlagt en SRS og at testparameterne kun ble oppgitt som et input sjokk i starten av prosjektet.

Som dagens konsept er utformet er det 2 flater for montering av komponenter for å kunne teste i 3 akser. Dette er for komplisert for å være realistisk repetere samme SRS i alle akser da man endrer på for mange parametere ved å flytte massen fra bunnen til toppen. Eventuelt må det blitt plassert en dummyload med samme vekt som testobjektet ved testing så ved bytte må man også bytte plass på denne dummyloaden. Dette vil kunne gjøre testen repeterbar for alle akser men det er tvilsomt om SRS-en vil kunne justeres på den ønsket måte.

For å kvalifisere sjokktestutstyr kreves finjustering og muligens redesign på sjokktestriggen. Materialvalg og utforming av hammer, materialtykkelse på sjokkplate, ambolttykkelse og material, vektjusteringer, dropphøyde og dempemateriale vil alle innvirke maskinens SRS.

11.3 SJOKKTESTINGENS DESTRUKTIVE NATUR:

Den destruktive naturen til sjokktesting gjør at denne testmetoden motstrider mot tankesettet til småsatellitt markedet som handler om å presse ned prisene og få opp effektiviteten.

Siden sjokktester fungerer som de fungerer, får man ikke et klart svar på hvordan designet må endres for å få komponentene til å overleve sjokket. Ved testing av kritiske og gjerne dyre komponenter kan man kanskje først teste med et lavere sjokk, og arbeide seg oppover i sjokkintensitet over flere sjokk. Problemet med dette er at det kan oppstå mindre skader ved lavere sjokk som ikke skader funksjonen, men ved å sjokke den samme komponenten flere ganger, med økt intensitet for hvert sjokk, kan gi skader som ikke ville oppstått ved normal testprosedyre på tre sjokk, et i hver akse.

Da det er kritisk å teste nyttelaster for sjokk, kan dette kompenseres med å bruke «standard» komponenter som allerede har gjennomgått sjokktesting og er ansett som «space ready». Dette gjør at man kan gi et større fokus på nyttelastene.

Ambolten er et utsatt område på utstyret. For å øke repeterbarheten er det nødvendig at denne er lett utbyttbar.

Ved å bruke droppetårnet vil vi spare mye plass ved å ikke ha en fast plass der en sjokktestmaskin må plasseres, men heller en mulighet til å ta av sjokktestinnretningen slik at utstyret kan fortsette å brukes for sitt originale formål.

Det vil også være store besparelser på produksjon da hele mekanismen for å skape sjokket allerede er der og kan brukes kostnadsfritt.

12 EVALUERING AV VALGT METODIKK OG RESULTATENE I FORHOLD TIL LÆRINGSMÅLENE

Innhenting av kunnskap innenfor sjokktesting og sjokk generelt er en komplisert oppgave da nivået på publiserte artikler ofte ligger veldig høyt og for å få full forståelse trengs det fordypning i både fysikk, mekanikk og materialteknologi.

Et delmål for Bacheloroppgaven var å danne et grunnlag for at fremtidige studenter kan ta over prosjektet å dra nytte av våre erfaringer. Vi er klar over at deler av rapporten og teorien i oppgaven kan virke og er mangelfull på noen områder, mener vi at det er mye informasjon i oppgaven som vil gi en god start i forståelsen av sjokk og sjokktesting. Det er med overlegg vi har utelatt mye av detaljene rundt sjokk, med den enkle grunn at det for oss er på et for høyt nivå til at vi kan gjengi informasjonen på en måte vi er komfortable med.

Selv om valgt konsept kanskje ikke er optimalt, har læringsutbyttet vårt vært høyt. Ved å kunne vurdere hvorfor valgt konsept kanskje ikke er tilstrekkelig og begrunne dette øker ingeniørfaglig innsikt, samtidig som forståelse for design av sjokktestutstyr øker.

13 AVVIK

Kommunikasjonsprosessen med Materialtekniske Laboratorier kom til ett punkt der de sluttet å svare på henvendelsene våre, grunnen til dette er ikke kjent, men vi antar at henvendelsene ble bortprioritert. Konsekvensen av dette er at vi ikke fikk muligheten til å gjøre målinger av utstyret deres og derfor har vi valgt å også utelate dimensjoner i modellene våre da disse sannsynligvis ville blitt feil uansett.

14 VEIEN VIDERE

Ved videreutvikling og eventuelt bygging av vår valgte løsning, eller om det skal utvikles en egen testfasilitet, anbefaler vi på det sterkeste at det monteres akselerometer nære enhetene som testes, slik at man kan logge sjokkdataene og lage en SRS til å legge ved dokumentasjonen av testingen.

I videreutviklingen av prosjektet bør det også tas bedre hensyn til å kunne justere sjokktestutstyret for å kunne justere flere parametere. Dette er nødvendig for å ha en allsidig sjokktestingsmaskin som kan benyttes til å teste etter bestemte SRSer. Med mer tid, midler og rom vil dette være høyst oppnåelig.

All litteratur, notater og skisser vil bli tilgjengelig for videre studenter gjennom HYPSO prosjektet. Det er også mulig å kontakte studentene vil for eventuelle spørsmål om prosjektet etter endt studieløp.

15 REFERANSER

[1] AMOS, About NTNU AMOS https://www.ntnu.edu/web/amos/about-amos [01.05.19], 2018

[2] NASA, What are SmallSats and CubeSats? https://www.nasa.gov/content/what-are-smallsats-and-cubesats [06.05.19], 2015

[3] Alén, A Basic Guide to Nanosatellites https://alen.space/basic-guide-nanosatellites/#que [01.05.19], 2019

[4] PSI Technics, Hyperspectral Imaging https://www.psi-technics.com/EN/Services-Products/Industrial-Image-Processing/Hyperspectral-Imaging.php [17.05.19], Ukjent.

[5] João Fortuna. Hyperspectral Imaging System Summer 2017 UAV flights report November 9, 2017

[6] NASA, Software Defined Radios https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/txt_sdr.html [10.04.2019], 2012

[7] OPLi, Picture of RGB-camera https://www.opli.net/opli_magazine/imaging/2017/3d-one-extends-avior-series-with-rgb-nir-multi-spectral-camera-jan-news/ [17.05.19], 2017

[8] C. M. Harris og A. G. Piersol, "Harris' Shock and vibration handbook", McGraw-Hill, 2002

[9] Allied Marked Research, Small Satellite Marked https://www.alliedmarketresearch.com/small-satellite-market [07.05.19], 2017

[10] NSR, Small Satellite markets https://www.nsr.com/research/small-satellite-markets-5th-edition/ [07.05.19]

[11] Mordor Intelligence, Hyperspectral imaging marked https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/hyperspectral-imaging-market [22.04.19]

[12] Revision S, By Tom Irvine. An introduction to the shock response spectrum. July 9, 2012

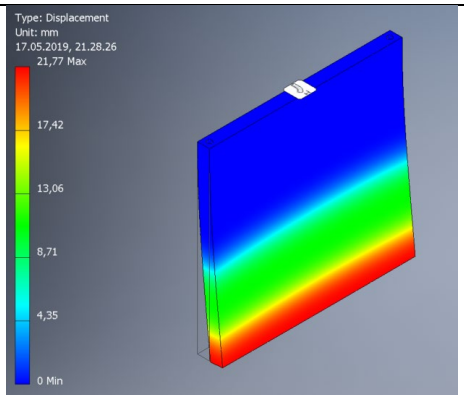
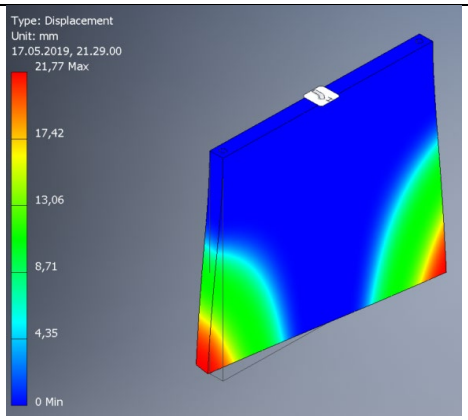
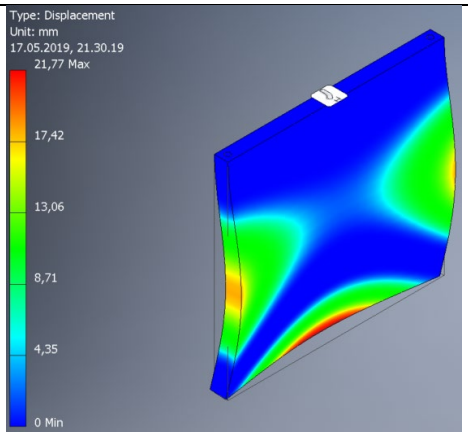
[13] Martin Jonsson, "Development of a Shock Test Facility for Qualification of Space Equipment", 2012 URL: http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/167112.pdf

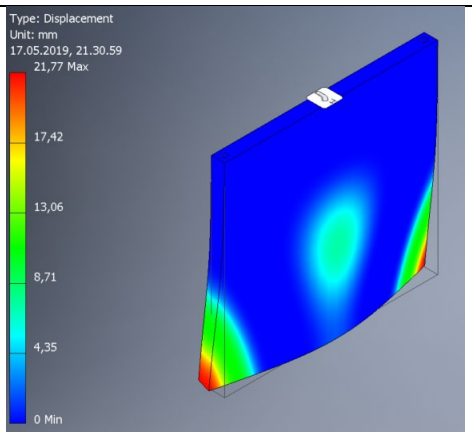
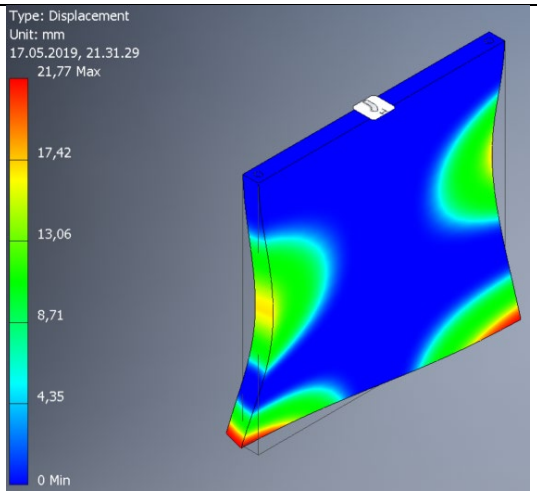
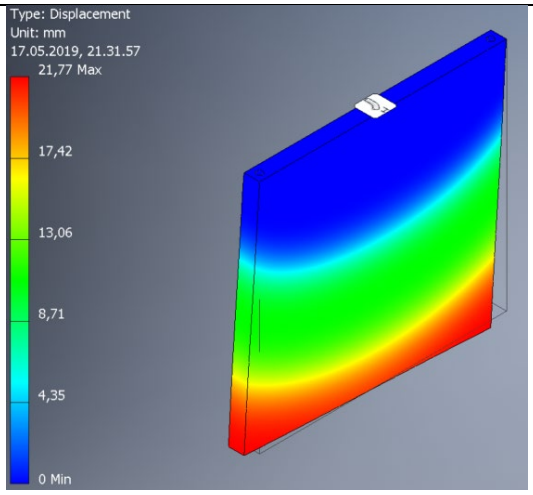
[14] Cubesat Developers Workshop, Bilde http://mstl.atl.calpoly.edu/~workshop/archive/2004/Spring/04c-Toorian(CubeSat)-P-POD.pdf [10.04.19],Ukjent.

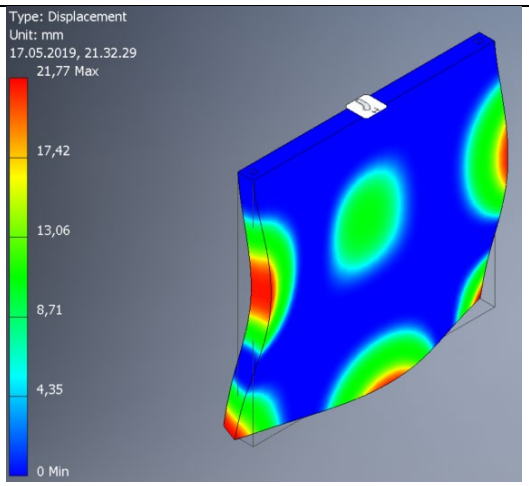
[15] UPSat, Vibration campaign successful https://upsat.gr/?p=304 [10.04.19], 2016

16 VEDLEGG

VEDLEGG A MODAL ANALYSE AV TOMBSTONE:

Egenfrekvenser til Tombstone antatt «fixed» placement.		
No.	Frekvens	Bilde
1	189,42 Hz	
2	431,88 Hz	
3	1118,32 Hz	

4	1339,30 Hz	
5	1570,10 Hz	
6	1784,54Hz	

7	2626,37 Hz	 Type: Displacement Unit: mm 17.05.2019, 21.32.29 21,77 Max 17,42 13,06 8,71 4,35 0 Min