

Damian Steinke

Objektiv metode for dokumentasjon av støtskader på laks

Masteroppgave i Marin teknikk

Veileder: Pål Lader

Medveileder: Bjørn Haugen

Juni 2021

Damian Steinke

Objektiv metode for dokumentasjon av støtskader på laks

Masteroppgave i Marin teknikk
Veileder: Pål Lader
Medveileder: Bjørn Haugen
Juni 2021

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for marin teknikk



Kunnskap for en bedre verden

Sammendrag

I denne masteroppgaven ble det gjort et forsøk på å etablere en objektiv metode for å dokumentere hvilke effekter støt mot oppdrettslaks har for fiskehelse og -velferd. En oppdrettslaks opplever fysiske støt i rørsystemene ved avlusning, der effekten av disse i svært liten grad er kartlagt. I et forsøk på å kartlegge disse presenterer denne oppgaven en elementmodell av en laks som videre bli analysert i en støtsituasjon. For å gjøre et forsøk på å validere modellen, blir et fysisk forsøk med laks utført.

Det ble gitt et forslag for materialegenskaper og -parametere for elementmodellen ut ifra litteraturstudien. Disse forslagene ble deretter benyttet i analysen i Abaqus, og det ble oppdaget at parameterne måtte justeres med hensyn til modellen. Ut ifra dette ble det deretter presentert de reviderte materialegenskapene og parameterne brukt i analysen.

I denne oppgaven ble det presentert en 3D-modell. Modellen ble delt opp i en hoderegion og resten ble modellert som muskler. Det viste seg å være krevende å implementere et skjelettsystem med gode materialegenskaper, og fisken ble derfor modellert uten. Ut ifra analysen av et støt på modellen, ble det tatt ut en kontaktkraft mellom modellen og veggen.

Det fysiske støtforsøket ble utført ved hjelp av en støttrigg. Resultatene fra lastcellen kunne dermed sammenlignes med resultatene fra analysen i Abaqus. Det viste seg at modellen i liten grad kunne valideres, siden resultatene hadde store avvik både når det gjaldt varighet av støtet, men også størrelsen på den målte kraften.

Forenklingene utført i denne oppgaven førte til at modellen ikke evnet å danne gode nok resultater i analysesammenheng. Forenklingene påvirket resultatene kraftig, og dermed kunne disse i liten grad bli validert opp mot det fysiske forsøket. Dersom modellen blir utarbeidet ytterligere med både bedre materialegenskaper og implementering av flere komponenter, kan den representere det fysiske forsøket på en bedre måte. Denne oppgaven presenterer likevel et startpunkt for hvordan elementmetoden kan bli tatt i bruk for dokumentasjon av effekter på fiskehelse og -velferd.

Abstract

In this master's thesis, an attempt was made to establish an objective method for documenting the effects of impacts to farmed salmon. A farmed salmon experiences physical impacts in the pipe systems during a de-lice operation, where the effect of these have been mapped to a very small extent. In an attempt to map these, this thesis presents a finite element model of a salmon that is further analyzed in an impact situation. To try to validate the model, a physical experiment with salmon was performed.

A proposal was made for material properties and parameters for the element model based on the literature study. These proposals were then used in the analysis in Abaqus, and it was discovered that these parameters had to be adjusted with regard to the model. Based on this, the revised material properties and parameters used in the analysis were presented.

The 3D-model was divided into a head region and the rest was modeled as muscles. It proved to be demanding to implement a skeleton system with good material properties, and the fish was therefore modeled without. The contact force between the model and the wall was abstracted from the analysis.

The physical impact test was performed using an impact rig. The results from the load cell could thus be compared with the results from the analysis in Abaqus. It turned out that the model could not be validated, since the results had large deviations both in terms of duration of the impact, but also in the size of the measured force.

The simplifications made in this thesis led to the model not being able to generate good enough results in analysis. The simplifications greatly affected the results and they could not be validated by the physical experiment. If the model is further developed with better material properties and implementation of more components it can represent the physical experiment better. This thesis nevertheless presents a starting point for how the finite element method can be used for documentation of effects on fish health and welfare.

Forord

Denne masteroppgaven er en del av det 5-årige masterprogrammet på marin teknikk med spesialisering innen marine ressurser og havbruk. Oppgaven er skrevet ved Institutt for marin teknikk (IMT) som ligger under fakultetet for ingeniørvitenskap (IV) ved Norges teknisk-naturvitenskaplige universitet (NTNU). Masteroppgaven tilsvarer 30 studiepoeng og har en varighet på 20 uker.

Problemstillingen i denne oppgaven er knyttet til FHF-prosjektet OWITTOOLS. For gjennomførelsen av de fysiske forsøkene har SINTEF gitt meg tilgang til en støttrigg som ble brukt i deres prosjekt. Videre har institutt for marin teknikk stilt med laboratorierom for utførelsene av forsøkene.

Jeg ønsker først og fremst å takke Pål Lader for god veiledning og innspill gjennom masteroppgaven. Videre vil jeg rette en stor takk til medveileder Bjørn Haugan for gode råd når det gjaldt utbyggingen av elementmodellen. Takk til forskerne som jobbet med OWITTOOLS prosjektet, Birger Venås som alltid stilte opp for veiledning og råd, og Morten Bondø som var essensiell i oppsettet av støttriggen. Til slutt vil jeg takke familie, venner og kjæreste for god støtte underveis. Dere har vært en enorm kilde til motivasjon og oppmuntring.

Damian Steikne
08.juni 2021, Trondheim

Innhold

| | | |
|----------|--|----------|
| 1 | Introduksjon | 1 |
| 1.1 | Motivasjon | 1 |
| 1.2 | Hovedmål og delmål | 3 |
| 1.3 | Struktur | 4 |
| 2 | Litteraturstudie | 5 |
| 2.1 | Ikke-medikamentell avlusning | 5 |
| 2.1.1 | Fiskvelferd og ny teknologi | 7 |
| 2.2 | Laksens anatomi og fysiologi | 8 |
| 2.2.1 | Skjelett | 9 |
| 2.2.2 | Muskulatur | 10 |
| 2.2.3 | Hjerne | 11 |
| 2.2.4 | Biologisk respons av et støt | 12 |
| 2.3 | Materialegenskaper | 15 |
| 2.3.1 | Lineært elastisk materiale | 16 |
| 2.3.2 | Elastisk-plastisk materiale | 17 |
| 2.3.3 | Viskoelastisk materiale | 19 |
| 2.4 | Elementmetoden | 21 |
| 2.4.1 | Fundamental teori | 22 |
| 2.4.2 | Analysetype | 23 |
| 2.5 | Bruk av dyr i forsøk | 23 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3 | Elementmodell av laks | 27 |
| 3.1 | Geometri | 27 |
| 3.2 | Analyse | 30 |
| 3.2.1 | Partisjonering av modellen | 30 |
| 3.2.2 | Materialegenskaper | 31 |
| 3.2.3 | Mesh - generere et nettverk av noder og elementer | 32 |
| 3.2.4 | Kontaktformulering | 33 |
| 3.2.5 | Grensebetingelser | 34 |
| 3.2.6 | Analyseforløp | 35 |
| 4 | Fysisk støtforsøk med laks | 36 |
| 4.1 | Implementering av LabVIEW | 37 |
| 4.1.1 | Blokkdiagram | 39 |
| 4.2 | Forsøksoppsett | 40 |
| 4.2.1 | Strømforsyning | 40 |
| 4.2.2 | Elektrisk motor | 40 |
| 4.2.3 | Lastcelle | 41 |
| 4.2.4 | Fotoelektriske sensor | 42 |
| 4.2.5 | Høyhastighetskamera | 42 |
| 4.3 | Forsøksfisk | 44 |
| 4.4 | Kurvetilpasning | 45 |
| 5 | Resultater | 47 |
| 5.1 | Elementmodell av laks | 47 |
| 5.2 | Fysisk støtforsøk med laks | 50 |
| 5.3 | Sammenligning av resultater | 55 |
| 6 | Diskusjon og konklusjon | 56 |
| 6.1 | Generelle betraktninger | 56 |

| | | |
|-----|--------------------------------------|----|
| 6.2 | Elementmodell av laks | 57 |
| 6.3 | Fysisk støtforsøk med laks | 58 |
| 6.4 | Feilkilder og usikkerhet | 60 |
| 6.5 | Konklusjon | 61 |
| 6.6 | Videre arbeid | 62 |

| | | |
|----------------|---|----------|
| Vedlegg | | i |
| A | Første utkast av modellen | i |
| B | Resultater fra lastcellen | ii |
| C | Resultater fra høyhastighetskameraene | iv |
| D | Matlab kode | vii |
| | D.1 Kurvetilpasning | vii |
| | D.2 Resultat plot fra Abaqus | viii |
| E | Blokkdiagram i LabView | ix |
| F | Frontpanelet i LabView | xvii |
| G | Elektrisk motor | xx |

Figurer

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Gjennomsnittlig hyppighet av skader i forbindelse med medikamentfrie avlusingsmetoder | 2 |
| 2.1 | Antall uker med medikamentfrie avlusinger | 6 |
| 2.2 | Behandlingsforløpet til Thermolicer avlusersystemet | 6 |
| 2.3 | Behandlingsforløpet til CALIGUS avlusersystemet | 7 |
| 2.4 | Illustrasjon av trinnvis designprosess med implementering av de ”3R-ene”. | 8 |
| 2.5 | Røntgenbilde av en laks | 9 |
| 2.6 | Skjelettkomponenter | 10 |
| 2.7 | Knoklene som danner Neurocranium | 10 |
| 2.8 | Tegning av laksens under og overkjeveknokler | 10 |
| 2.9 | Laksens tversnitt som illustrerer de røde og hvite muskelfibrene. | 11 |
| 2.10 | Anatomien til hjernen hos en voksen atlantisk laks | 11 |
| 2.11 | Plasseringen til hjernen hos en voksen atlantisk laks | 11 |
| 2.12 | Wayne State toleransekurve | 13 |
| 2.13 | Illustrasjon av trykket i hjernen i en støtsituasjon. | 14 |
| 2.14 | Spennings-/tøyningskurven for ei tynn stålstang. | 16 |
| 2.15 | Spennings-/tøyningskurven for et elastisk-plastisk materiale. | 18 |
| 2.16 | Et fjær-/dempersystem. | 19 |
| 2.17 | Karakteristikken til et viskoelastisk materiale. | 20 |
| 2.18 | Illustrasjon av en forenklet FE-analyseprosess. | 22 |
| 2.19 | Antall fisk brukt til dyreforsøk 1982-2020 | 25 |

| | | |
|------|--|----|
| 2.20 | Illustrasjon av de "3R-ene". | 26 |
| 3.1 | 2D skisse av laksen. | 28 |
| 3.2 | 3D-skisse av laksen. | 28 |
| 3.3 | 3D-modell av laksen. | 28 |
| 3.4 | 3D-skisse av laksen inkludert ryggrad og bukhule. | 29 |
| 3.5 | 3D-modell av laksen og veggen til støtforsøket. | 29 |
| 3.6 | Partisjoneringen mellom hoderegionen og resten av fisken. | 30 |
| 3.7 | 10 noders kvadratisk tetraedriske element. | 32 |
| 3.8 | 8 noders lineær firkantet element. | 32 |
| 3.9 | Geometrien til laksen og veggen delt inn i elementer og noder. | 33 |
| 3.10 | Illustrasjon av kontaktflater. | 33 |
| 3.11 | Illustrasjon av kontaktformuleringen. | 34 |
| 3.12 | Grensebetingelsene | 35 |
| 4.1 | Illustrasjon av oppsettet for det eksperimentelle forsøket. | 36 |
| 4.2 | Nærbilde av støttriggen | 37 |
| 4.3 | Bilde av støttriggen | 37 |
| 4.4 | Forpanelet for styringen av hastigheten til støttriggen. | 38 |
| 4.5 | Del av blokkdiagrammet i LabVIEW for støttriggen. | 39 |
| 4.6 | Strømforsyning | 40 |
| 4.7 | Elektrisk motor | 41 |
| 4.8 | Lastcelle | 41 |
| 4.9 | Fotoelektrisk sensor | 42 |
| 4.10 | Kamera brukt i forsøket | 43 |
| 4.11 | Hastighetsmåling i LabView. | 44 |
| 4.12 | Bilde av laksene som ble brukt til forsøket. | 44 |
| 4.13 | Kubisk spline. | 45 |
| 4.14 | Utjevnet kubisk spline. | 45 |

| | | |
|------|---|----|
| 5.1 | Kontaktkraft fra Abaqus. Fiskens hastighet: $1,5 \frac{m}{s}$. | 47 |
| 5.2 | Kontaktkraft fra Abaqus. Fiskens hastighet: $2 \frac{m}{s}$. | 48 |
| 5.3 | Kontaktkraft fra Abaqus. Fiskens hastighet: $2,5 \frac{m}{s}$. | 48 |
| 5.4 | Illustrasjon for kontaktkraften fra Abaqus. | 48 |
| 5.5 | Illustrasjon av spenningene i snuten av modellen ved støtet. | 49 |
| 5.6 | Resultater for kontaktkraften med opprinnelige materialegenskaper. | 49 |
| 5.7 | Fiskens hastighet: $1,50 \frac{m}{s}$. | 50 |
| 5.8 | Fiskens hastighet: $2,64 \frac{m}{s}$. | 50 |
| 5.9 | Fiskens hastighet: $1,62 \frac{m}{s}$. | 50 |
| 5.10 | Fiskens hastighet: $1,45 \frac{m}{s}$. | 51 |
| 5.11 | Fiskens hastighet: $1,58 \frac{m}{s}$. | 51 |
| 5.12 | Bilder fra høyhastighetskamera | 52 |
| 5.13 | Middelverdi av resultatene fra lastcellen. | 53 |
| 5.14 | Uklar måling grunnet vridninger på fisken. Fiskens hastighet: $2,65 \frac{m}{s}$. | 54 |
| 5.15 | Bilder fra kamera som viser vridningen som oppstår med fisk #4 og $2,5 \frac{m}{s}$. | 54 |
| 5.16 | Sammenligning av resultater fra Abaqus og det fysiske forsøket | 55 |

Tabeller

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | Materialegenskaper for laksens muskulatur | 17 |
| 2.2 | Materialegenskaper for laksens skjelett | 18 |
| 2.3 | Materialegenskaper for laksens hjerne | 21 |
| 3.1 | Dimensjoner for elementmodellen. | 27 |
| 3.2 | Elastiske materialegenskaper for laksens muskulatur brukt i analysen. | 31 |
| 3.3 | Elastisk plastiske materialegenskaper for laksens hoderegion brukt i analysen. | 31 |
| 3.4 | Elementmodellens vekt samt forventet vekt. | 32 |
| 3.5 | Beskrivelse og varighet av stegene i analysen. | 35 |
| 4.1 | Laksens vekt/lengde samt forventet vekt/lengde. | 45 |
| 5.1 | Resultater for maksimal kontaktkraft og varighet av støtet fra analysen i Abaqus. | 48 |
| 5.2 | Resultater for støtforsøket for fisk 1. | 51 |
| 5.3 | Resultater for støtforsøket for fisk 2. | 51 |
| 5.4 | Resultater for støtforsøket for fisk 3. | 51 |
| 5.5 | Resultater for støtforsøket for fisk 4. | 51 |
| 5.6 | Standardavvik av resultatene fra lastcellen. | 53 |
| 5.7 | Avvik i % mellom analysen med elementmodellen og det fysiske forsøket med fisk #2. | 55 |

Kapittel 1

Introduksjon

1.1 Motivasjon

Den norske oppdrettsnæringen er en næring i sterk vekst med et stadig større fokus på fiskevelferd. Med en økende befolkningsvekst i verden er tilstrekkelig matproduksjon et problem, og lite tilsier at denne trenden vil snu av seg selv. Bærekraftig oppdrett av fisk i havet og på land kan være en del av løsningen på problemet. Norsk akvakultur alene vil nok ikke kunne ende dette problemet, men kunnskapen og teknologien som blir utviklet i Norge kan være med på å øke verdens matproduksjon.

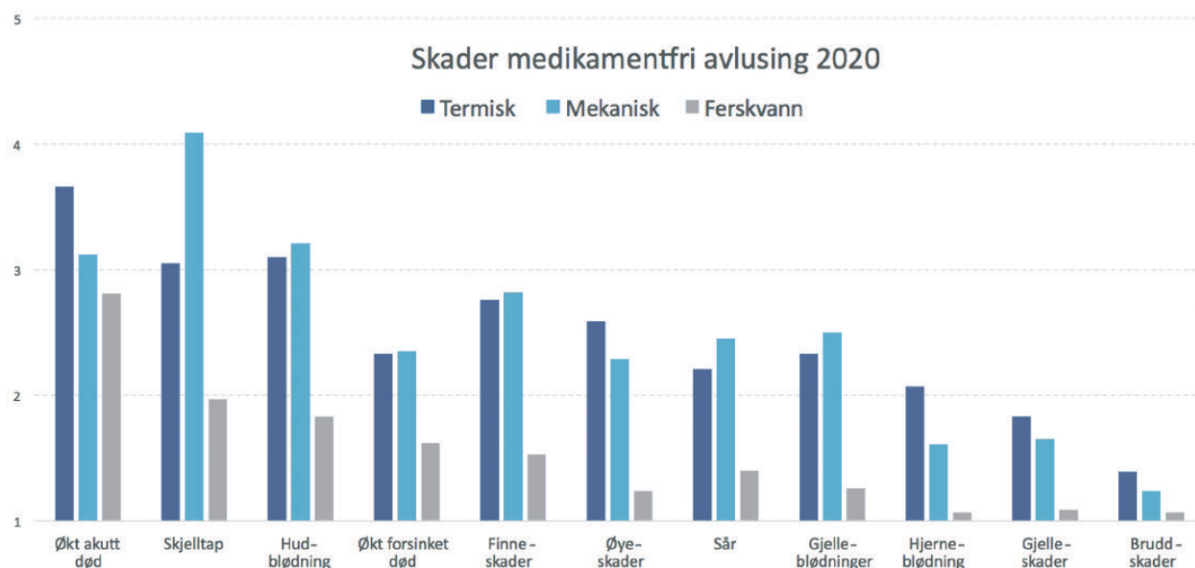
Dyrevelferdsloven slår fast at oppdrettslaks skal både ha et levested og håndteringsmetoder som sikrer god velferd gjennom livsyklusen [1]. Siden det stort sett mangler objektive metoder for å måle fiskevelferd hos oppdrettslaks, vil det være krevende å kunne håndheve denne loven. Det vil fortsatt være en vei å gå før fisk blir behandlet som enkeltindivider med egne velferdsbehov.

Håndteringen av laks med lakselus har vært et stort problem i Norge de siste årene. Dette gjelder både økonomiske konsekvenser, fiskevelferd og næringens mulighet til å øke produksjonsvolumet. Det har blitt tatt i bruk mange forskjellige metoder for å bekjempe lakselusen, som mekanisk, biologisk, medikamentell avlusning eller forskjellige preventive metoder. Dette har i stor grad holdt lusnivåene på et akseptabelt nivå.

I de senere årene har resistensen på medikamentene brukt i avlusning økt, noe som har ført til nye mekaniske avlusningsenheter. Alle disse enhetene krever håndtering av laksen som igjen fører til økt dødelighet og redusert fiskevelferd. Håndteringen av fisken svært avgjørende for å drive oppdrett på en god og bærekraftig måte.

Håndterings- og trengsoperasjoner er essensielle elementer ved oppdrett av laks per dags dato. Ved avlusning, slakting og sortering må fisken trenes og pumpes i rør for videre behandling. Selve behandlingsenheten er dermed bare én komponent laksen gjennomgår under slike prosesser. Videre er det også rørføringer, avsiler, pumper og forskjellige fiskevendere som laksen skal gjennom. I tillegg til alt dette kommer også systemene som ikke behandler fisken, men transporterer den i brønnbåter. Per dags dato er det ukjent hvilket system eller hvilken deler av systemene som påfører laksen mest skade [2].

I 2020 fikk Mattilsynet inn 1566 meldinger angående velferdsmessige hendelser, blant disse var 54% knyttet til medikamentfri avlusning med håndtering av oppdrettslaks, se figur 1.1. En undersøkelse som har blitt gjort blant fiskehelsepersonell kartla hva slags skader og hvor ofte dødelighet forekommer i forbindelse med medikamentfri avlusning. Skalaen gikk fra 1 = sees aldri/svært sjelden til 5 = sees hos nesten all fisk. De mest vanlige skadene var skjelltap og hudblødninger, men det ble også registrert finneskader, øyeskader, sår, gjelleblødninger og hodeskader. Videre rapporterte fiskehelsepersonell at akutt dødelighet de tre første dagene etter en mekanisk avlusningsoperasjon er et større problem enn forsinket dødelighet de to første ukene [3]. Hjerneblødning er en av de mindre rapporterte skadene, noe som kan skyldes at det er utfordrende å oppdage en slik intern skade. Dermed kan hjerneblødninger i realiteten også kunne inngå i kategorien ”Økt akutt død”, men at dette blir vanskelig å rapportere for fiskehelsepersonell uten videre undersøkelser.



Figur 1.1: Figuren viser gjennomsnittlig hyppighet av skader eller dødelighet som fiskehelsepersonell har observert i forbindelse med ulike medikamentfrie avlusningsmetoder i 2020 [3].

Den norske oppdrettsnæringen etterspør objektive metoder for dokumentasjon av fiskevel-

ferd under konstruksjon og design av nye medikamentfrie avlusningsmoduler, håndteringsoperasjoner og optimalisering av de allerede eksisterende metodene. Dette utsagnet baseres på personlig kommunikasjon med Birger Venås (forsker ved Sintef). Som et svar på dette har Sintef utviklet en sensorfisk som benyttes til å kartlegge de fysiske forholdene en fisk blir utsatt for under avlusning-/håndteringsoperasjon. For å kunne utnytte potensialet til sensorfisken må imidlertid data (temperatur, trykkprofil og støt) kunne korreleres med de objektive måledataene for fiskevelferd. Det vil si den biologiske betydningen av informasjonen som sensorpakken registrer. Ved å etablere slike biologiske tålegrenser vil det dermed kunne utarbeides en 3D-modell av en laks med rette mekaniske egenskaper. Et slikt teknologisk vektøy vil kunne bidra til bedre forståelse av fiskens velferd i rørtransportsystemer allerede i design- og simuleringfasen. Det vil bety at ingen prototype av avlusningsenheter eller rørsystem vil behøves for å kunne opparbeide seg en forståelse av hva slags krefter en laks vil bli utsatt for og hvilken betydning disse har for fiskevelferden.

1.2 Hovedmål og delmål

Hovedmålet for denne masteroppgaven vil være å jobbe mot å etablere en objektiv metode for dokumentasjon av effekter på fiskehelse og -velferd som kan brukes under konstruksjon av medikamentfri avlusningsenheter og håndteringsmetoder for oppdrettslaks. For å kunne oppnå dette hovedmålet vil flere delmål bli satt opp.

Første delmål i denne oppgaven vil være etablere et forslag til materialeegenskapene for en laks. Disse parameterne er essensielle for analysen som skal utføres i oppgaven.

Andre delmål i denne oppgaven vil være å etablere en forbindelse mellom laksens anatomi og fysiologi, og bruken av elementmetoden for å kunne dokumentere kreftene en laks er utsatt for i en avlusnings-/håndteringsoperasjon. Dette vil innebære å utforme geometrien til laksen ved hjelp av et 3D-modelleringsverktøy, samt analysere denne modellen ved hjelp av en FEA-programvare.

Tredje og siste delmål vil være å forsøke å validere denne modellen opp mot et støtforsøk utført med ekte, død laks. For å nå dette målet vil det bli tatt i bruk en støttrigg som har blitt utarbeidet av Sintef i forbindelse med OWITOOLS-prosjektet [4]. Data fra lastcellen i forsøket vil bli behandlet og sammenlignet med analysen gjort på 3D-modellen av laksen.

1.3 Struktur

I kapittel 2 presenteres et relevant litteraturstudiet og teori for arbeidet i denne oppgaven og for det videre arbeide for å utbygge en fullstendig elementmodell for laks. Videre presenterer kapittel 3 utformingen av elementmodellen og går stegvis gjennom FE-analysen. Det fysiske forsøket presenteres i kapittel 4, der alle komponentene og samspillet mellom disse blir beskrevet. I kapittel 5 blir resultatene fra både analysen og det fysiske forsøket presentert. Kapittel 6 tar for seg en diskusjonen rundt elementmodellen, analysen og det fysiske forsøket samt, diskuterer relevante feilene og utfordringene som har oppstått under arbeidet med denne oppgaven. I dette kapitlet blir det også presentert en konklusjon for oppgaven. Videre blir det gitt forslag og punkter som må bli tatt i betrakning for videre arbeid med denne problemstillingen.

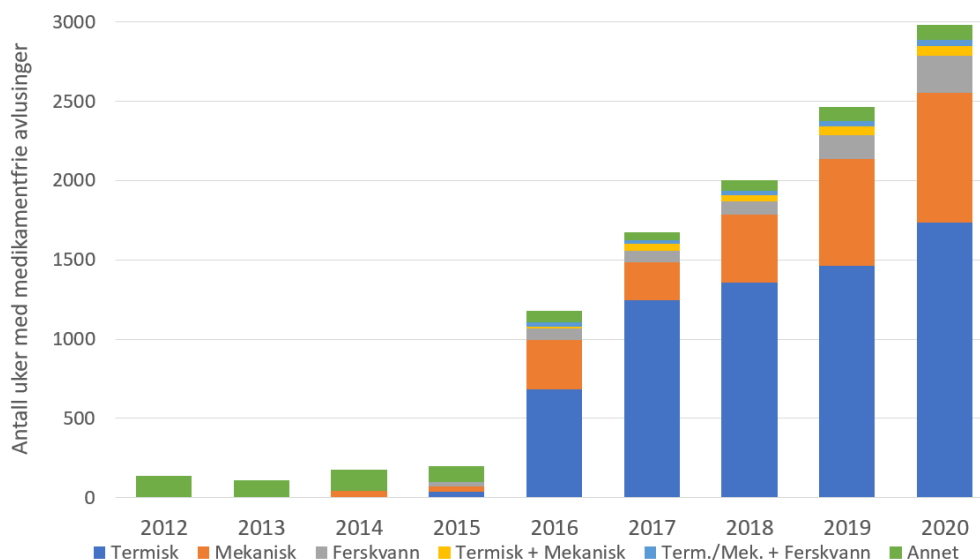
Kapittel 2

Litteraturstudie

I dette kapitlet blir det presentert et målrettet søk for å opparbeide kunnskapen til å kunne løse hovedmålet og delmålene som er satt for denne oppgaven. Kapittel 2.3 er et litteratursøk rundt materialeegenskapene til en laks og er direkte koblet opp mot det første delmålet. Videre blir det også presentert et søk rundt laksens anatomi/fysiologi (kapittel 2.2) og elementmetoden (kapittel 2.4), der disse kapitlene kobles sammen med det andre delmålet. Det blir også presentert temaer som vil være essensielle i det videre arbeidet med denne problemstillingen.

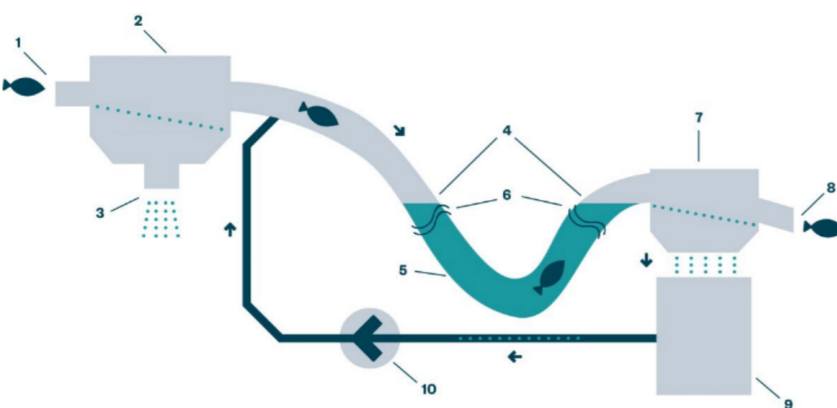
2.1 Ikke-medikamentell avlusning

Den norske oppdrettsnæringen har i flere år hatt store utfordringer med lakselus. Forebyggingen av høye lusetall har vært et viktig mål både av miljømessige og fiskevelferdsmessige grunner. Dersom oppdretterne greier å holde seg under lusegrensen vil selve lusetallet være en liten utfordring for oppdrettslaksens velferd. Utførelsen av medikamentfri behandling mot lusen har derimot vist seg å være en stor velferdsutfordring for laksen [3]. Denne behandlingen innebærer ofte trenging og håndtering, noe som vil forårsake høye stressnivåer hos laksen. Dersom dette stressnivået blir kombinert med en svekket laks på grunn av sykdom/infeksjoner, og laksen opplever mekaniske skader i avlusningsenheten, vil dette kunne ende i en akutt død. Lakselus har fått nedsatt følsomhet mot kjemiske lusemidler, noe som videre har ført til utvikling av nye medikamentfrie avlusningsmetoder. Det har vært en stadig økning i bruken av disse metodene de siste årene. I senere tid har man også kombinert metodene, se figur 2.1.



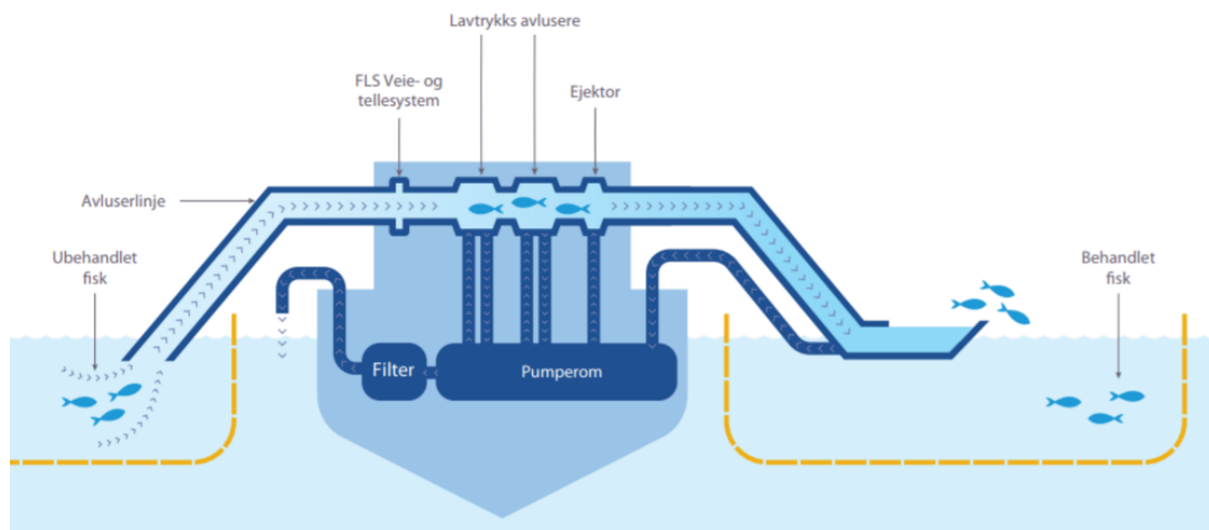
Figur 2.1: Antall uker med medikamentfrie avlusinger rapportert inn til Mattilsynet [3] per 24.01.2021.

Som vist i figur 2.1, består medikamentfri avlusning hovedsaklig av tre prinsipper; mekanisk (dvs. vannspylere, hvor også børster kan inkluderes), termisk og ferskvann. Systemene som kort skal beskrives i dette delkapittelet er Sqale AQ sin Thermolicer (termisk) [5], og Flatsetsund Engineering AS sitt avlusersystem (CALIGUS) [6]. Thermoliceren benytter seg av et lukket bad med varmt vann som fisken blir pumpet gjennom, hvor behandlingsvannet blir resirkulert videre. Figuren 2.2 illustrerer behandlingsforløpet til produktet med en påfølgende forklaring av stegene i prosessen.



Figur 2.2: 1. Fisken entrer Thermoliceren etter pumping. 2. Vannavsiling. 3. Sjøvann blir filtrert og sluppet ut. 4. Fisken utsettes for oppvarmet vann. 5. Behandlingssøyfe. 6. Vannoverflate. 7. Avsiling av behandlingsvann. 8. Fisken slippes ut i ny merd. 9. Oppvarmet vann sirkuleres til vanntanken for filtrering, lufting og oppvarming. 10. Behandlingsvannet pumpes tilbake til behandlingssøyfen [5].

Ved mekanisk avlusning med spyling og børsting, utsettes fisken for tilsvarende deloperasjoner som ved termiske behandlingsmetoder. Flatsetsund Engineering AS sitt FLS Avlusersystem (CALIGUS) bruker forskjellige spylemetoder for å fjerne lakselusen. En illustrasjon av systemet er presentert i figur 2.3.



Figur 2.3: Behandlingsforløpet til CALIGUS avlusersystemet [6].

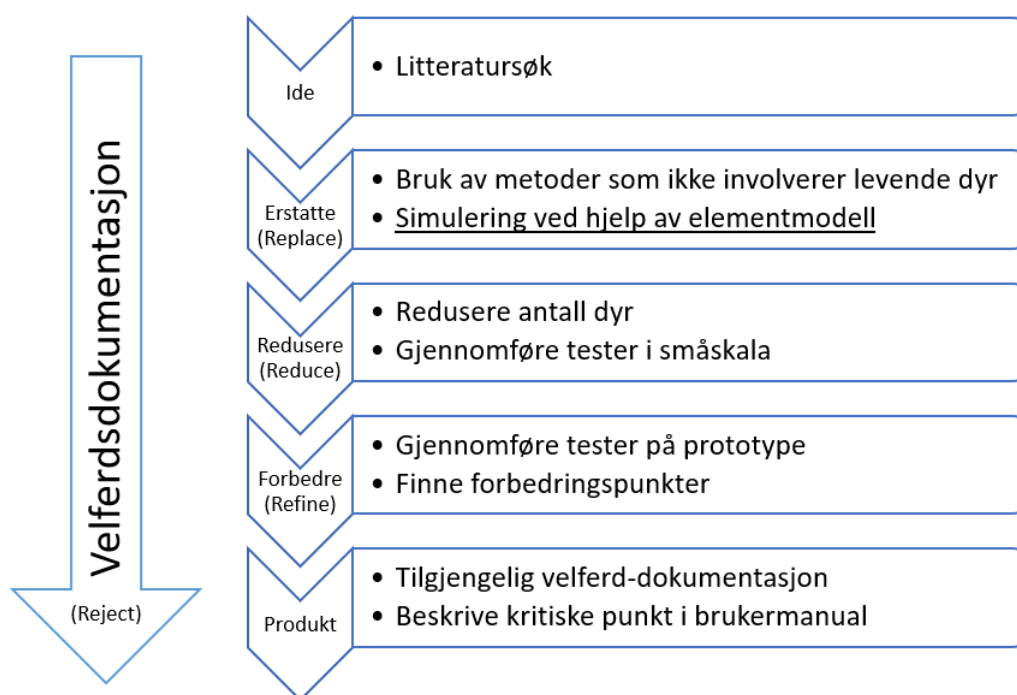
Siden mye av avlusningsprosessen foregår i lukkede systemer, som blant annet i rør og tanker, er det vanskelig å visuelt se hva fisken blir utsatt for under operasjonene. Det man vet er at fisken blir utsatt for mekaniske belastninger, noe som har blitt direkte koblet opp mot skader [7]. Derfor er det essensielt at det blir skapt standardiserte metoder til å måle belastningene fisken blir utsatt for og å opparbeide tilstrekkelig kunnskap til å kunne forstå disse målingene i en biologisk sammenheng.

2.1.1 Fiskvelferd og ny teknologi

Nye metoder og ny teknologi for både optimalisering og håndtering av oppdrettslaks er i stadig utvikling. Det har blitt lovfestet at all teknologi som skal brukes på dyr må være dokumentert som velferdsmessig forsvarlig før det eventuelt skal tas i bruk (akvakulturdriftsforskriften [8] og lov om dyrevelferd [1]). Disse bestemmelsene har vært gjeldende i mange år, likevel har de dessverre bare blitt fulgt i en varierende grad. Dette utsagnet baserer seg på en samtale med Lars Becker, administrerende direktør i FLS.

Når ny teknologi utvikles er det essensielt at prosessen fra idé til produkt gjøres i riktig rekkefølge. Når først en idé blir tatt videre i designprosessen er det viktig at en risikovurdering av metoden blir foretatt med hensyn til fiskevelferd. Her må både teknologer,

biologer og personell med kompetanse omkring fiskevelferd jobbe tett sammen. Dette kan være en krevende oppgave, spesielt hvis det ikke eksisterer så mye forskning eller erfaring på området. På dette steget vil det være fordelaktig å ha digitale verktøy tilgjengelig. I dette tilfellet, hvor det er snakk om forskjellige avlusningsystemer, kan en modellert 3D-laks med de rette mekaniske egenskapene bli brukt til simulering før en eventuell prototype med levende fisk blir testet. Dermed kan det tidlig i designprosessen bli utført en vurdering av velferden til fisken som skal gjennom denne avlusningssoperasjonen. Videre kan idéer som ikke overholder god nok fiskevelferd bli forkastet raskere enn hva som er mulig idag. I figur 2.4 presenteres hvordan en designprosess kan se ut, med tanke på fiskevelferd og implementering av de "3R-ene" (omtalt i kapittel 2.5) for et nytt avlusningsprodukt.



Figur 2.4: Illustrasjon av trinnvis designprosess med implementering av de "3R-ene".

2.2 Laksens anatomi og fysiologi

I praksis utfyller fiskeanatomi og fiskefysiologi hverandre. Mens fiskanatomi er studiet av fiskens form, så er fysiologien studiet av hvordan delene i fisken fungerer sammen. Den førstnevnte inkluderer fiskens struktur, deres organer og kroppsdeler, og hvordan de er satt sammen, slik de kan observeres på disseksjonsbordet og under et mikroskop. Fysiologien innebærer dermed funksjonen av disse delene og hvordan disse samhandler i en levende fisk.

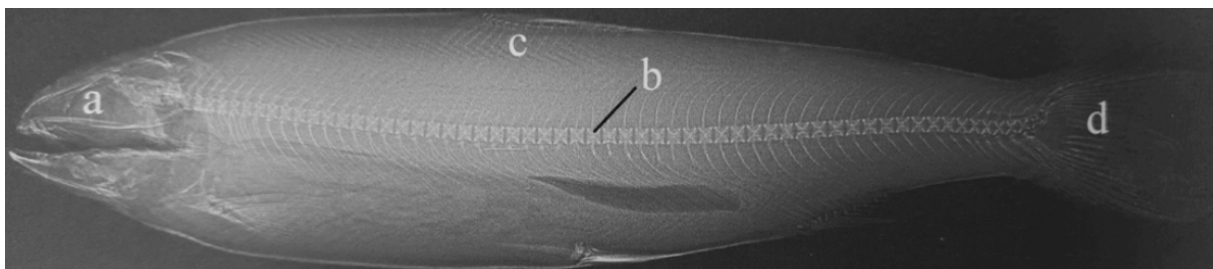
Det er essensielt å ha kunnskap om både laksens anatomi og fysiologi for å kunne lage en

modell som skal brukes i en FE-analyse. Siden det ikke har blitt utført noe forskning på de mekaniske egenskapene til en laks, vil ikke dette være en enkel oppgave. Dermed vil modelleringsprosessen av laksen i denne oppgaven bli forenklet i første omgang, men for videre arbeid må store deler av laksen bli modellert mye mer nøyaktig for at en FE-analyse skal gi gode resultater.

2.2.1 Skjelett

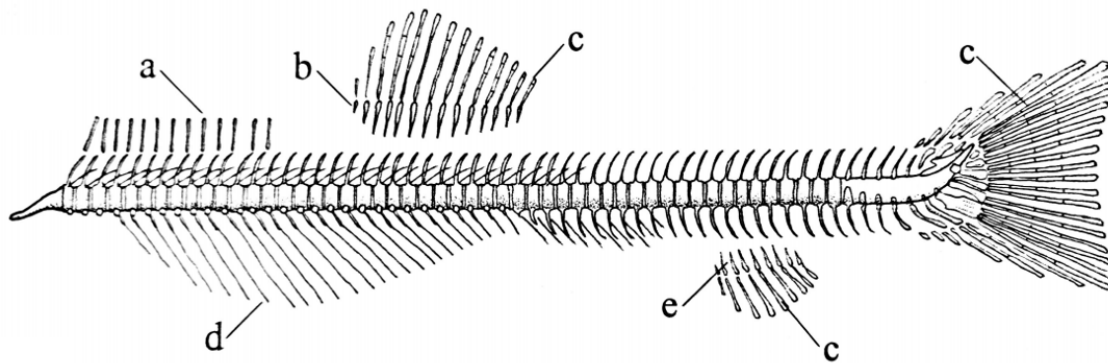
I de neste delkapittelene vil skjelettet, det muskulære systemet og hjernen til laksen bli presentert. Det er de to førstnevnte som vil være relevant for modelleringen i denne oppgaven. For videre arbeid med modellen, så vil også hjernen og skademekanismene som kan føre til hjerneblødninger være relevant.

Skjellettet til laksen gir den mekanisk styrke. Det danner et feste for musklene og beskytter nervesystemet og organene. Anatomisk kan den deles inn i tre deler: aksialskjelett, finneskjelett og hodekskallet, se figur 2.5.



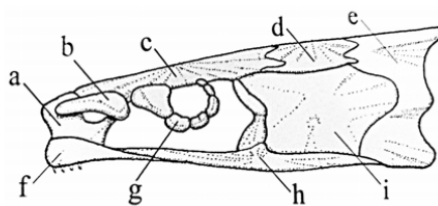
Figur 2.5: Røntgenbilde av en laks: a) hodeskjelett, b) aksialskjelett, c) ryggskjelettet , d) haleskjelett [9].

For beinfisk så danner skjelettet, som er laget av bein, støttestrukturen i fisken. Hovedskjelettelementet er ryggraden, sammensatt av ryggvirvler som er ganske lette, men sterke [9]. Ribbeina er festet til ryggraden. De viktigste ytre egenskapene til fisken, nemlig finnene, består av benete eller myke pigger som kalles stråler. Disse har ingen direkte forbindelse med ryggraden, men støttes av musklene som omgir dem. Se figur 2.6 for ytterligere detaljer.

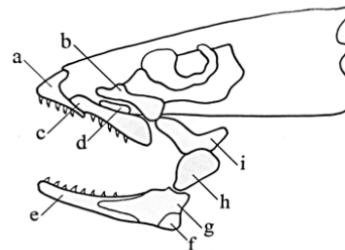


Figur 2.6: Skjelettkomponenter: a) ryggfinne, b) lepidotrichia, c) halffinne, d) gattfinne, e) pterygiophores [9].

Hodeskallen består av beskyttende bein rundt hjernen og de sensoriske organene. Hodeskallen til fisk er dannet av en serie med løst sammenkoblede bein, se figur 2.7 og 2.8.



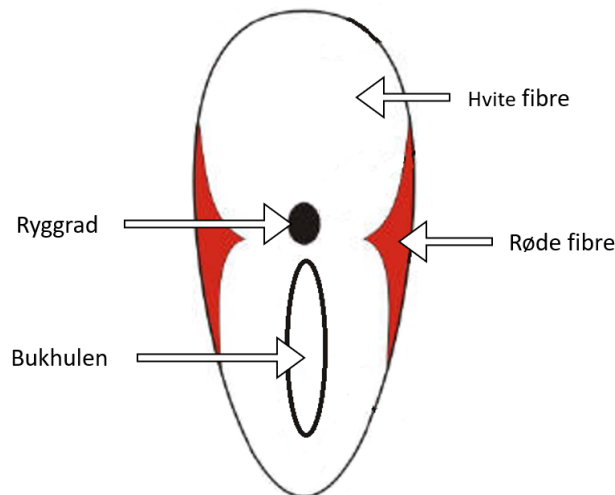
Figur 2.7: Knoklene som danner Neurocranium. a: Etmoidgruppe, b: Nasale, c: Frontale, d: Parietale, e: Occipidal, f: Vomer, g: Infraorbitale, h: Parasphenoid, i: Otisk [9].



Figur 2.8: Tegning av under og overkjeveknokler a: Premaxillare, b: Supermaxillare, c: Maxillare, d: Palatinum, e: Dentale, f: Retroangulare, g: Anguloarticulare, h: Quadatum, i: Pterygoid [9].

2.2.2 Muskulatur

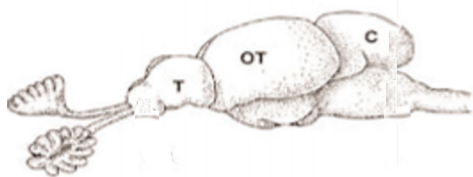
Muskulaturen til laksen utgjør den største delen av totalvekten og er den delen av fisken som har den klart største økonomiske betydningen. De laterale svømmemusklene består av forskjellige muskelfibre som kan ha opptil 50° vinkel til laksens lengderetning [9]. På grunn av behovet for å svømme i forskjellige hastigheter så utvikler laksen hovedsakelig to typer fibre: røde fibre som er på yttersiden og det hvite som ligger dypere, se figur 2.9. De røde fibre (langsomme) er mye mer utholdende mens de hvite (raske) gir laksen muligheten til å forflytte seg fort over en kort tidsperiode. Laksen har også flere mindre muskelgrupper i hodetregion. Disse musklene beveger hovedsakelig øynene, kjeve, gjellebuer og gjellene.



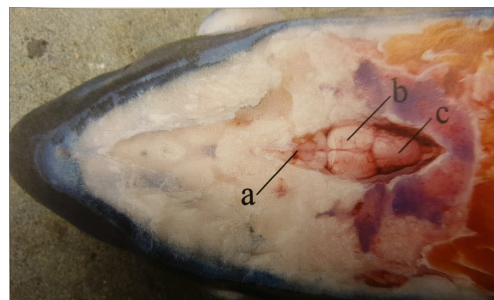
Figur 2.9: Laksens tversnitt som illustrerer de røde og hvite muskelfibrene.

2.2.3 Hjerne

Laksens hjerne ligger i enden av ryggraden hvor nervesystemet overfører informasjon som er registrert av fisken. Hjernen er beskyttet i kraniet. Hjernen er omtrent like stor som øynene til laksen, dvs. relativt små, se figur 2.10 og 2.11.



Figur 2.10: Anatomien til hjernen hos en voksen atlantisk laks. De forskjellige delene: telencephalon (T), tectum opticum (OT) and cerebellum (C) [10].



Figur 2.11: Plasseringen til hjernen hos en voksen atlantisk laks. a: telencephalon, b: tectum opticum and c: cerebellum [9].

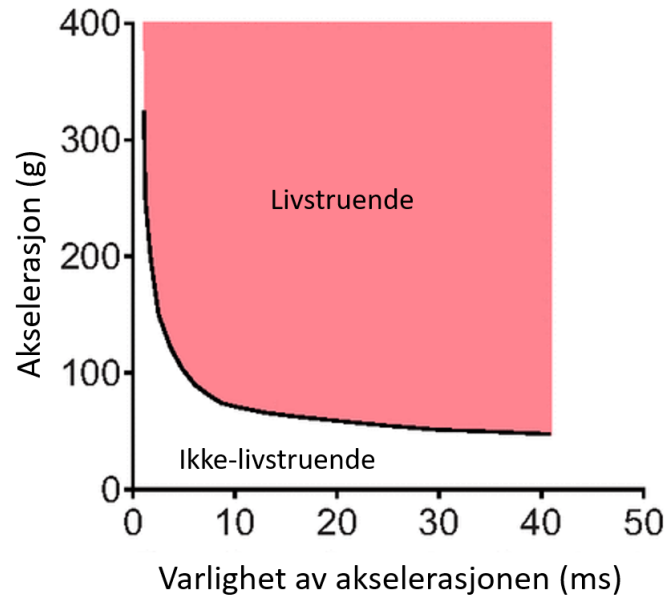
Den fremste delen av hjernen kalles telencefalon. Denne delen av hjernen har flere funksjoner, men hovedsakelig står den for informasjonsprosesseringen av lukt. Den er også homogent, dvs. det mangler et hulrom med væske. Dette er relevant med tanke på modellering av denne hjernedelen. Videre har tectum opticum, en struktur som består av flere lag, med detaljer som varierer mye fra fisk til fisk. Cerebellum koordinerer dyrets bevegelser, og dens form er ofte avrundet. Det også flere hulrom i mange av hjernens deler. Disse er fylt med cerebrospinalvæske, noe som igjen er relevant i en modelleringsprosess.

2.2.4 Biologisk respons av et støt

Det er ulike skader en laks kan oppleve i en situasjon der laksen blir utsatt for et støt. Denne oppgaven har som mål å utarbeide en enkel laksemodell som i første omgang ikke vil kunne analysere den biologiske responsen til hjernen fra et støt. Det vil riktignok være veldig relevant for det videre arbeide med å tilføye flere detaljer til modellen, da man også vil kunne se på responsen til hjernen.

Utfordringen med å se på responsen til hjernen er hovedsakelig at den er ”usynlig” for oss med tanke på at den er beskyttet av hodeskallen. I en støtsituasjon med laks, er det få metoder som er effektive til å se inn i hjernen. Det har heller ikke blitt utført tidligere undersøkelser på hjerneresponsen eller hva som faktisk forårsaker hjerneblødningen hos laks. Dermed er det ikke enkelt å svare på hvordan hjerneblødningen hos en laks oppstår. På et generelt grunnlag kan det sies at mekanismen for hvordan en hjerneblødning oppstår mest sannsynlig er likt for ulike arter. Det innebærer at ved mekanisk traumer mot hodet så vil blodårer i hjernevevet sprekke, og blødninger kan dermed oppstå i ulike deler av hinner og vev avhengig av hvor støtet inntreffer. Det vil si at hjernevevet ikke ”revner”, men avhengig av hvor i hjernevevet eller hinnene skaden er, så vil hjerneblødningen skape et høyere trykk og dermed påvirke hjernevevet også (basert på privat kommunikasjon med Siri Gåsnes, Veterinærinstituttet). For dermed å kunne danne seg et bilde på hvordan denne responsen ser ut så må mye være basert på støtforsøk med menneskehoder og rotter. Det har blitt utført flere forskningsstudier rundt kinematikken til det menneskelige hodet i en støtsituasjon. Forskere har undersøkt sammenhengen mellom kinematiske data, som ble målt under eksperimentet, og hjerneskode observert etterpå [11].

Det er hovedsakelig to pionerer innen forskning på hodekinematikk for mennesker i laboratoriesammenheng - Dr. Gurdjian og professor Lissner [12]. Disse to har blant annet utført eksperimenter hvor de testet det å slippe menneskehoder fra visse høyder og målte akselerasjonene (ved hjelp av aksiometere) ved støtet. Videre har de også sett på hode- og hjernesker under en kollisjonssituasjon. Fra denne forskning ble det utgitt en toleranskurve kalt Wayne State Tolerance Curve (WSTC), se figur 2.12. Denne grafen viser risikoen for alvorlig hodeskade når det gjelder varigheten og størrelsen på en lineær akselerasjon. Dette innebærer at et menneskehode tåler høyere akselerasjoner hvis varigheten av støtet er kort og omvendt.



Figur 2.12: Wayne State toleransekurve [13].

Denne tankegangen kan bli tatt i bruk når fisk blir utsatt for et støt. Tallene som blir presentert på grafen vil derimot ikke stemme overens. Årsaken til dette er at anatomien og fysiologien til mennesker er forskjellig fra laks. Allikevel kan dette bli brukt som et utgangspunkt da det dessverre ikke er realistisk å lage en slik kurve for laks på dette stadiet av forskningen. Det vil allikevel være realistisk å kunne anta at laks tåler større påvirkninger hvis varigheten av støtet er kort. Basert på WSTC, er det laget et kriterie for hodeskader (head injury criterion, HIC) [13]. Dette kriteriet benyttes under testsituasjoner i bilindustrien, der $HIC < 1000$ er et kriterium for bilsikkerhetssystemene. HIC er presentert i ligning 2.1,

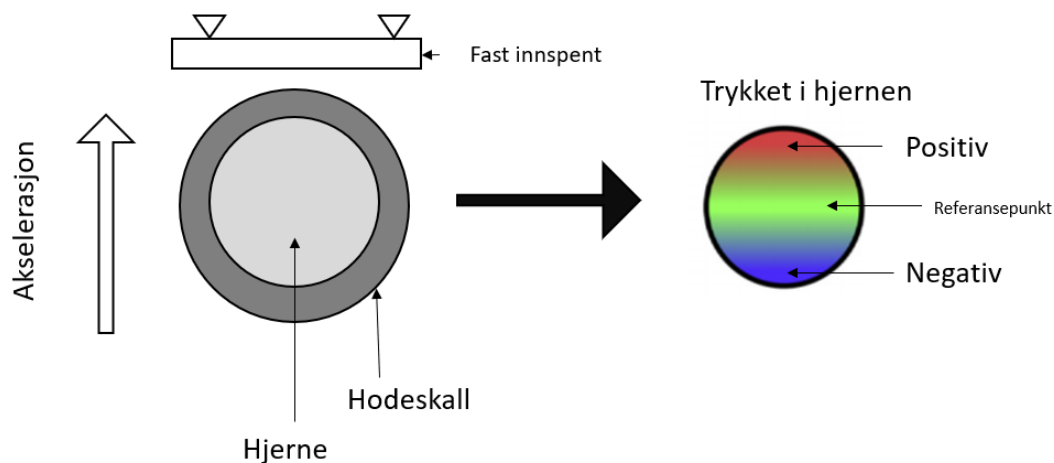
$$HIC = \left[(t_2 - t_1) \left[\frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} a dt \right]^{2.5} \right]_{MAX} \quad (2.1)$$

hvor størrelsen på akselerasjonen observert i midten av hodet er beskrevet med a . t_1 og t_2 er de to tidspunktene (start/slutt) målt i sekunder under støtet.

Dersom tålegrenser for laks blir etablert, kan en tilsvarende formel benyttes i tilfellet med laks. En detaljert laksemodell kan dermed simuleres, og med etablerte tålegrenser kan en objektiv metode for fiskehelse bli utarbeidet.

Ut ifra menneskelig forsøk kan også den biologiske responsen av laksens hjerne i en støtsituasjon til en vis grad forklares. Under støtet vil hodets bevegelse nesten øyeblikkelig

stoppe opp på grunn av stivheten til hodeskallen. Siden hjernen har et treghetsmoment, vil en relativ bevegelse oppstå. Dette vil skape kompresjonskrefter der skallen beveger seg mot hjernen og strekkrefter der hjernen beveger seg vekk fra hodeskallen, se figur 2.13. Disse kreftene vil dermed skape en trykkgradient i hjernen. Denne trykkgradienten kan forårsake at blodårer i hjernen sprekker og at en hjerneblødning oppstår.



Figur 2.13: Illustrasjon av trykket i hjernen i en støtsituasjon.

Alle hodebevegelser og direkte støt på hodet vil indusere en respons på hjernevevet. Disse responsene (tøyning/spenning) vil påvirke hjernecellene/blodårene i hjernen og kan i verste fall forårsake skade som igjen kan føre til blant annet hjerneblødning. En av de store fordelene ved å bruke en FE-modell er at man med stor grad av nøyaktighet kan beskrive belastning og stressresponser. Dette, kombinert med etablerte skadetoleranser, vil være i stand til å forklare hjerneskade på de forskjellige delene av hjernen. Det har blitt forsket på rottehjerner i støtsammenhenger, der det har blitt funnet en helt klar sammenheng med hjerneblødninger i områder med høyt trykk/stress i hjernen. Dette ble forutsett ved å bruke en FE-modell [14]. Dermed kan en slik modell også bli utviklet for laks. Utfordringen oppstår ved at rottene ble brukt i sammenheng med forskning tilknyttet bilindustrien. Det vil derimot ikke være realistisk å gjennomføre en slik studie med laks per dags dato, men med et stadig økende fokus på fiskevelferd, vil en slik studie være mulig i fremtiden.

En begrensning i bruken av tradisjonelle hodeskadetoleranser målt av aksiometere er at det er vanskelig å forstå hvordan hjernen blir påvirket. Ved å bruke teknikker som direkte strekker hjernevevet, kan det bevises at vevet blir skadet av en viss belastning/spenning. Det finnes flere måter å måle skadetoleransene på vevet i hjernen eksperimentelt. En metode som ble brukt av forskere [15] var å kutte små biter av en rottehjerne og utsette dette

vevet for mekanisk strekk. Dermed ble det funnet en sammenheng mellom skadene i vevet og belastningen. På denne måten kan de tilsvarende toleransegrensene for den spesifikke hjernedelene bli funnet. Det ble utviklet empiriske formler som beskriver nøyaktig dette [16], se formel 2.2.

$$\begin{aligned} \text{Vevsdød}_{CA} &= 0.0389(\pm 0.0011) \cdot \text{Tøyning}^{0.3663(\pm 0.0029)} \cdot \text{Tid}^{2.0150(\pm 0.0216)} \\ \text{Vevsdød}_{DG} &= 0.0323(\pm 0.0017) \cdot \text{Tøyning}^{0.3721(\pm 0.0056)} \cdot \text{Tid}^{1.8209(\pm 0.0407)} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Vevsdød er representert i prosent og CA og CG er forskjellige deler av hjernen (cornu ammonis og dentate gyrus).

Etter at en FE-analyse har blitt utført, vil disse formlene gi en indikasjon på hvor mye hjernevev som er skadet. Slike empiriske formeler kan dermed også utarbeides for laks. Ved å etablere tålegrenser, en FE-modell og empiriske formler for vevsdød, kan det bli forklart og forstått hvorfor og hvordan en laks får hjerneblødninger i støtsituasjoner.

2.3 Materialelegenskaper

Verden består av mange forskjellige materialer. Vanlige materialer brukt i ingeniørvitenskap som aluminium og stål er godt beskrevet. Materialer som biologisk vev, syntetiske komposittmaterialer og metallegeringer kan derimot være utfordrende å finne konkrete egenskaper for.

Responser til diverse materialer varierer mye ut i fra hvor raskt og hvor mye kraft som skal til for at et materialet strekkes eller komprimeres. For at modelleringen skal bli så nøyaktig som mulig så kreves det at man har kjennskap til de forskjellige materialelegenskaper som representerer de forskjellige materialtypene. For eksempel vil et lineært elastisk materiale ofte være nok til å estimere risikoen for en strukturell svikt under belastning. For å undersøke energien som absorberes av en bil som krasjer i en vegg, må materialene bli beskrevet med plastisk-elastiske egenskaper. I situasjoner som involverer respons av forskjellig biologisk materiale, som denne oppgaven fokuserer på, kan et tøyningshastighetavhengig, viskoelastisk materiale implementeres. Bare eksperimentell data kan gi tøyning-/spenningsforholdet for et materialet. Slik data vil være essensielt for å kunne gjøre analyser og beregninger på materialtypene. Dette kapittelet vil ta for seg forskjellig materialer og deres egenskaper som er relevante for denne oppgaven.

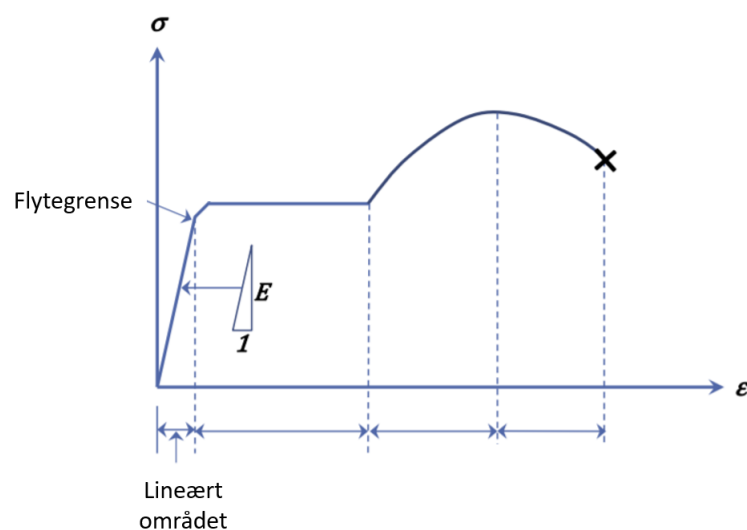
2.3.1 Lineært elastisk materiale

Et elastisk materiale vil gå tilbake til sin opprinnelige form etter at belastningen er fjernet. For et lineært elastisk materiale vil forholdet mellom tøyning/spenning være lineært, mens ved et ikke-lineært materiale vil det ikke være det. Dermed er spenning og tøyning proporsjonale gjennom Hookes lov,

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.3)$$

der E er elastisitetsmodulen (Youngs modulus), σ er spenningen og ε er tøyningen.

Materialene som finnes i verden er stort sett ikke-lineære, men disse blir ofte representert med et lineært forhold mellom tøyning og spenning. Denne antagelsen baserer seg på at materialene som blir analysert ofte opplever svært små tøyninger. I figur 2.14 vises en idealisert kurve for spenning/tøyning.



Figur 2.14: Spennings-/tøyningskurven for ei tynn stålstang.

Denne kurven inneholder flere ikke lineære deler, men det lineære området er vist rundt små tøyinger. Stigningsgraden av denne lineære kurven er E og representerer materialets stivhet. Dessuten, Poissons forhold må også karakteriseres i et lineært elastisk materiale. Når et elastisk materiale er utsatt for aksial kraft, vil den ikke bare deformeres i retning av kraften, men også vinkelrett på den. Poissons forhold ν er definert som,

$$\nu = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \quad (2.4)$$

På grunn av det faktum at de fleste materialene også vil utvide seg ut til sidene når en kraft påføres i aksial retning, gjør minustegnet i ligning 2.4 Poissons forholdet positivt. Etter denne definisjonen har nesten alle materialer et Poisson ratio fra 0–0,5. For et isotop lineært elastisk materiale, vil det dermed bare være behov for de to nevnte parameterne for å beskrive materialets oppførsel. Andre konstanter som skjærmodul og kompresjonsmodul, kan beskrives fra disse to.

Modellering av biologiske materialer kan være utfordrende. Enkelte materialer kan allikevel modelleres ved hjelp av lineær elastiske egenskaper. I modelleringen av elementmodellen vil muskulaturen spille en vesentlig rolle. I denne oppgaven antas det at muskulaturen til laksen kan modelleres som et lineært elastisk materiale. Denne antagelsen kan begrunnes med at den påførte belastningen i muskulaturen av et støtforsøk, vil være langt mindre enn flytegrensen til muskulaturen, og dermed ha en lineært forhold mellom spenningen og tøyningen.

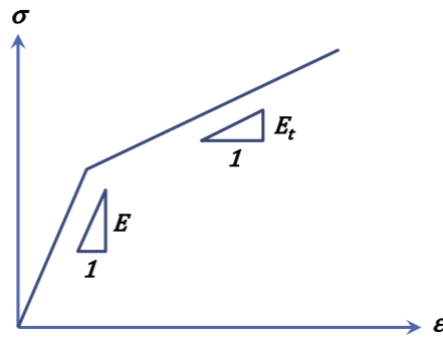
For å finne materialparameterne til laksens muskulatur, må det gjøres noen bestemte antagelser. Det er utfordrende å finne verdier for musklene direkte ettersom det ikke har blitt utført noe forskning på de mekaniske egenskapene til en laks. Forsøkene som har blitt utført er i stor grad på mennesker, og derfor vil parameterne som brukes være basert på benmuskulaturen hos mennesker. Parameterne som kan brukes i modellering av laksemuskulatur er presentert i tabell 2.1 [17].

| Parameter | Muskulatur |
|--------------------------------------|------------|
| Tetthet, ρ ($\frac{kg}{m^3}$) | 1006 |
| Young's modulus, E (GPa) | 0,2 |
| Poissons forhold, ν | 0,2 |

Tabell 2.1: Materialeegenskaper for laksens muskulatur [17].

2.3.2 Elastisk-plastisk materiale

Et elastisk-plastisk materiale kan forklares med et eksempel på en bilulykke. Karosseriet er designet å gi strukturell styrke til bilen. Den vil absorbere det meste av den kinetiske energien i tilfelle en ulykke skulle forekomme. Jo mer energi materialet klarer å absorbere, jo bedre er det for sikkerheten. Energien som er absorbert kalles tøyingsenergi og kan beregnes fra området under spennings-/tøyingskurven. Siden flytegrensen ofte er relativt liten for den elastiske delen av kurven, se figur 2.15, kan den bare absorbere en liten del av denne energien. Ved en bilulykke vil dermed den plastiske delen absorbere langt mer energi enn det mindre elastiske området. Det som kjennetegner den plastiske delen er at den ikke er reversibel som ved en elastisk deformasjon.



Figur 2.15: Spennings-/tøyningskurven for et elastisk-plastisk materiale.

For å kunne modellere denne typen problemer må det bli tatt hensyn til både den elastiske og plastiske oppførselen til materialet. Dermed kan disse materialene forenkles og karakteriseres som elastisk-plastiske som presentert i figur 2.15, noe som gjør at de relativt lett kan modelleres. Verdiene for å karakterisere oppførselen til disse materialene er dermed Young's modul (E), Poissons forhold (ν), flytespenning (σ_y) og plastmodulen (E_{tan}).

Laksens skjelett

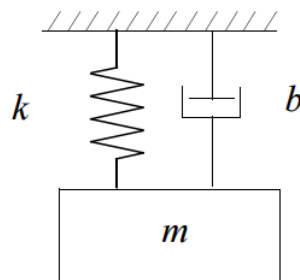
Skjelettet til laksen kan modelleres som et elastisk-plastisk materiale. Dette er en antagelse som igjen må være basert på forsøk utført på mennesker. Det må antas at materialeegenskapene til laksens skjelett er basert på kortikale bein fra mennesker. Dette er ganske komplisert materiale, men i modelleringssammenheng regnes dette som et isotropisk elastisk-plastmateriale [18]. Responsen kan dermed deles inn i elastiske og plastiske områder. Overgangen mellom elastisk og plastisk er definert som flytespenning og bruddet vil inntre ved den maksimale tøyningen skjelettet tåler. Materialparameterne som kan brukes i modellering av laksens skjelett er presentert i tabell 2.2.

| Parameter | Skjelett |
|--------------------------------------|----------|
| Tetthet, ρ ($\frac{kg}{m^3}$) | 1100 |
| Young's modulus, E (GPa) | 18,439 |
| Poisson's forhold, ν | 0,28 |
| Plast modulus, E_{tan} (GPa) | 1,25 |
| Flytespenning, σ_y (GPa) | 0,189 |
| Brudd, ε_{brudd} | 0,0178 |

Tabell 2.2: Materialeegenskaper for laksens skjelett [17].

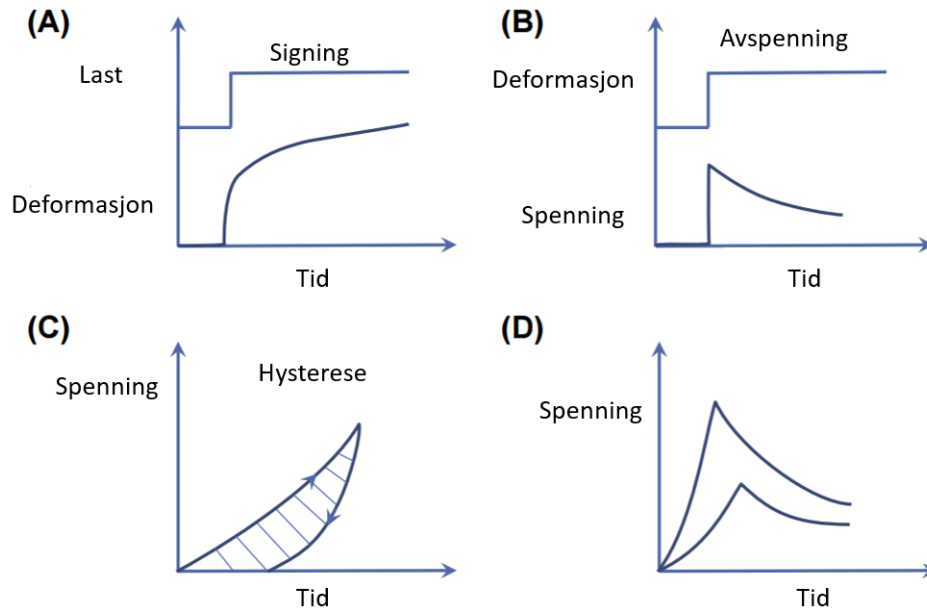
2.3.3 Viskoelastisk materiale

Et viskoelastisk materiale er veldig interessant og komplekst, samtidig som det ikke brukes i mange sammenhenger innen ingeniørvitenskap. Derfor blir denne typen materialet og dets oppførsel bli beskrevet noe mer nøyaktig i denne oppgaven. Et viskoelastisk materiale har både viskøse og elastiske egenskaper når det blir utsatt for en belastning. En typisk strukturell komponent som representerer dette, er en fjær-/demperkombinasjon, se figur 2.16. Demperen reduserer et støt og absorberer noe av energien mens fjæren returnerer objektet til sin opprinnelige posisjon.



Figur 2.16: Et fjær-/dempersystem.

For å beskrive et viskoelastisk materiale brukes tre parametere, nemlig signing, avspenning og hysteresese. Signing brukes til å beskrive kontinuerlig deformasjon av et materiale etter at lasten har nådd en konstant tilstand, se figur 2.17 A. Under konstant deformasjon beskriver avspenningen kontinuerlig reduserende spenning i materialet, se figur 2.17 B. En hysteresesløyfe (det skyggelagte området i figur 2.17 C) beskriver forskjellen i kurver for økende og avtagende belastning samtidig som den beskriver den tapte energien. Basert på disse tre egenskapene viser det seg at hvis materialet lastes raskere, vil det oppleve større spenning enn når materialet lastet sakte, se figur 2.17 D. Jo høyere lastehastighet, jo lavere er avspenningen og dermed vil det også oppstå en høyere maksimal spenning.



Figur 2.17: Karakteristikken til et viskoelastisk materiale.

For å modellere et viskoelastisk materiale må de lineære viskoelastiske egenskapene beskrives [19]. Disse egenskapene kan beskrives med superposisjon av et lineært viskoelastisk materiale og et elastisk materiale under hydrostatisk trykk. Et viskoelastisk materiale har en høy bulkmodul i forhold til skjærmodul. Dermed kan oppførselen til materialet beskrives gjennom skjærdeformasjonen, med den tidsavhengige skjærrelaksasjonsmodulen [20]. Dette er definert som

$$G(t) = G_i + (G_0 - G_i) e^{-\beta t} \quad (2.5)$$

hvor G_0 er den kortsiktige skjærmodulen og G_i er den langsiktige skjærmodulen. β kan kalles for "avtagingskonstanten" og t er tiden.

Hjerne

I denne oppgaven vil ikke laksens hjerne bli modellert, det er dog en viktig del for det fremtidige arbeidet. Hjernen har et høyt innhold av vann og kan dermed også beskrives som en nesten inkompressibelt materiale. Hjernens mekaniske egenskaper kan beskrives som et lineært viskoelastisk materiale, noe som også tidligere har blitt brukt til å modellere den menneskelige hjernen [20]. Laksens hjerne vil ha en annen geometri enn menneskehjerner, men det kan fortsatt antas at materialegenskapene vil forbli nokså like. Dermed kan laksens hjerne modelleres som et lineært viskoelastisk materiale med parametrene presentert i tabell 2.3.

| Parameter | Hjerne |
|--|--------|
| Tetthet, ρ ($\frac{kg}{m^3}$) | 1046 |
| Kortsiktige skjær-modul, G_0 (kPa) | 10,8 |
| Langsiktige skjær-modul, G_i (kPa) | 3,1 |
| Avtagings konstant, β (s^{-1}) | 456 |
| Young's modulus, E (kPa) | 9,3 |

Tabell 2.3: Materialegenskaper for laksens hjerne [20].

2.4 Elementmetoden

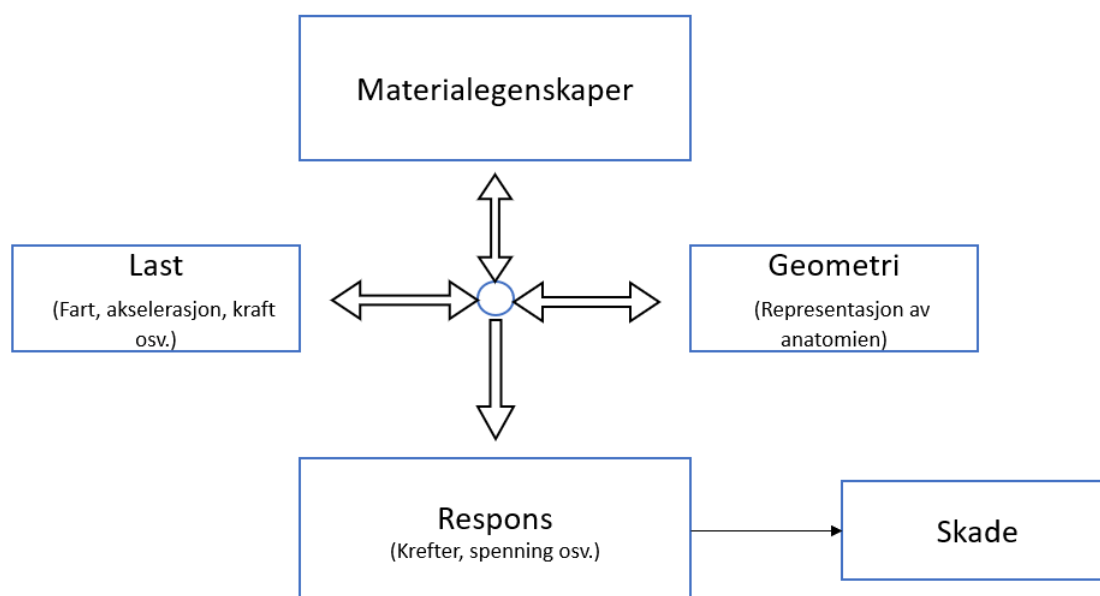
Elementmetoden (FEM-finite element method) utfører et sett med numeriske prosedyrer for å oppnå løsninger på et kontinuerlig mekanisk problem. Resultatet er nøyaktig nok for de fleste tekniske problemer. De klassiske mekaniske problemene kan beskrives med delvise differensialligninger, så lenge objektet har en enkel geometri. Dermed kan disse løses analytisk. Problemer i den virkelige verden vil dessverre ikke være så lett å løse lenger. Slike problemer vil ofte inneholde komplekse geometrier og belastninger, og kan derfor ikke lenger løses analytisk. Elementmetoden kan gi svaret på de fleste mekaniske problemer, men nøyaktigheten av svaret avhenger i stor grad av hvor godt modelleringen representerer problemet. Generelt sett så består en FE-modell av mange små elementer som er koblet til hverandre gjennom noder. Flere elementer vil gi et bedre resultat, men det er tidskrevende for en datamaskin å løse problemer som inkluderer flere elementer. Dermed må en ingeniør balansere datakraften som trengs for å løse problemet med graden av nøyaktighet som kreves.

FEA (finite element analysis) er et standardverktøy som benyttes i en rekke tekniske områder som strukturmekanikk, biomekanikk, varmeoverføring og fluiddynamikk. FE-metoden er i større grad allment tilgjengelig for både akademisk og industrielt bruk sammenlignet med et tiår tilbake. Det bør bemerkes at den teoretiske bakgrunnen for bruk av slik programvare bør være kjent for å kunne benytte den riktig. I dette delkapitlet vil det bli presentert hvorfor elementmetoden kan bli brukt til biodynamiske simuleringer.

I denne oppgaven vil elementmetoden bli brukt til et biomekanisk problem. Elementmetoden består av et sett med diskrete numeriske prosedyrer som brukes til å løse for fordeling av belastning og spenning, og andre responsvariabler, slik som forskyvning, hastighet, akselerasjon, rotasjon, spenning, belastningshastighet og kontaktkraft. På grunn av kompleksiteten til et støtforsøk, krever dette problemet en datamaskin med flere kjerner, høy ytelse og flere programvarepakker (i denne oppgaven Abaqus og Solidworks) for å utarbeide et nettverk av noder og elementer, beregne tilsvarende spenninger/belastninger, og

analysere resultatene av analysen.

For å utføre en fungerende FE-analyse, må analysen ha flere inputparametere. Dette vil innebære å utvikle en geometri for det ønskede objektet som skal analyseres, definere materialegenskapene til objektet og deretter utsette dette objektet for en last, hastighet, akselerasjon, rotasjon eller lignende. Denne prosessen er illustrert i figur 2.18.



Figur 2.18: Illustrasjon av en forenklet FE-analyseprosess.

Skadene innenfor biomekanikk og støtbiodynamikk, er prinsipper fra mekanikk brukt til å studere støtresponsen og skadetoleranser for biologiske materialer eller systemer under en påsatt belastning. Disse områdene har blitt studert grundig i forbindelse med personska-der i bilenindustrien [17], men ingen har anvendt denne metoden på laks. Dataene som en FEA produserer hvis utført riktig, kan være med på å kartlegge kreftene og dermed skaden en laks utsettes for i en avlusing- eller håndteringoperasjon. Foreløpig er elementmetoden den mest egnede måten å studere interne responser, slik som stress og belastning i en kroppsdel. Det er riktignok en vanskelig prosess å modellere hver minste detail, og det gjøres derfor forenklinger. Disse forenklingene må være godt gjennomtenkt, for hvis modellen ikke lenger representerer problemstillingen godt nok vil også resultatene være mangelfulle.

2.4.1 Fundamental teori

Hvis et materiale blir utsatt for en last, vil det oppstå spenninger. Denne belastningen kan deformere materialet og forårsake tøyning. I FE-metoden beregnes hver nodeforskyv-

ning først og deretter deformasjonen med tøynings-/spenningsegenskapene relatert til det spesifikke materialet. Dermed kan spenningen i materialet beregnes. En komplett FEA består av mange trinn, men fremgangsmåten for en slik analyse er godt beskrevet i akademisk litteratur [21]. Siden presentasjonen av hvert trinn av denne teorien ikke er direkte relevant for denne oppgaven, vil den ikke bli inkludert.

2.4.2 Analysetype

I Abaqus er det to primære analysemetoder som brukes for å løse problemer, nemlig Abaqus/Standard og Abaqus/Eksplisitt. Abaqus/Standard har statisk implisitte og dynamisk implisitte funksjoner og er egnet for å løse ikke-lineære problemer. Abaqus/Eksplisitt er derimot bedre egnet for simuleringer der det oppstår kontakt [22], noe som er tilfelle i denne oppgaven. Dette er hovedgrunnen til at Abaqus/Eksplisitt vil bli benyttet videre.

I Abaqus/Standard kan løsningen av ikke lineære problemer konvergere med vanskeligheter på grunn av kontakt eller materialkompleksitet som kan forårsake et stort antall iterasjoner. Slike analyser krever en del beregning i Abaqus/Standard på grunn av iterasjonene som har mange sett med lineære ligninger som skal løses. I Abaqus/Eksplisitt beregnes løsningen uten å iterere, men ved å eksplisitt fremme den kinematiske tilstanden fra forrige trinn.

Eksplisitt står for eksplisitt tidsintegrasjon. Selv om en gitt analyse kan kreve et stort antall tidsintervaller ved å bruke den eksplisitte metoden, krever analysen langt mindre diskplass og minne sammenlignet med Abaqus/Standard, som krever mange iterasjoner. Derfor, for problemer der beregningskostnadene for de to programmene er sammenlignbare, gjør diskplass og minnebesparelser Abaqus/Eksplisitt mer attraktiv.

2.5 Bruk av dyr i forsøk

Snutestøtforsøket som skal presenteres i denne oppgaven vil ikke basere seg på levende laks. Det er likevel viktig å danne seg en forståelse på hva som er viktig å ta i betraktning når forsøk med levende dyr skal utføres, nærmere bestemt fisk. Denne oppgaven er en del av Sintef sitt OWITOOLS prosjekt der det blir utført forsøk med levende fisk, derfor vil etikken og statistikken omkring dyreforsøk bli presentert i dette delkapittelet.

Dyr brukt i forsøksammenheng er et mye diskutert område. Forsøksdyrene er levende vesen som kan både føle smerte og ubehag. Det er i alle sin interesse å redusere dyrets lidelse til et minimum, ikke bare på grunn av dyret, men også for forsøksresultatene sin del. Et dyr som ikke er stresset eller opplever smerte vil kunne produsere bedre vitenskaplige resultater. Dermed er det fordelaktig av både etiske og vitenskaplige grunner å behandle

dyret så godt som mulig.

Eksperimentelle dyreforsøk er en relativt ung vitenskapelig metode sammenlignet med andre metoder. Læringskuven er fortsatt relativt bratt, spesielt med dyrearter som vi ikke har mye kunnskap om. Dette gjelder ikke minst for fiskearter, som i Norge utgjør mer enn 90% av dyrene som blir brukt til dyreforsøk [23]. Den varierende kunnskapen om forskjellige dyrearter har også spilt en rolle i forskning med bruk av dyreforsøk. For eksempel så har forskning vist at også fisk har evnen til å oppleve smerte [24], noe som har ført til et større fokus på fiskevelferd under forsøk.

Forsøksdyrlære kan bli definert som [25]:

“Den vitenskapelige, lovlig godkjente og etisk akseptable studien av dyr for biomedisinske formål”

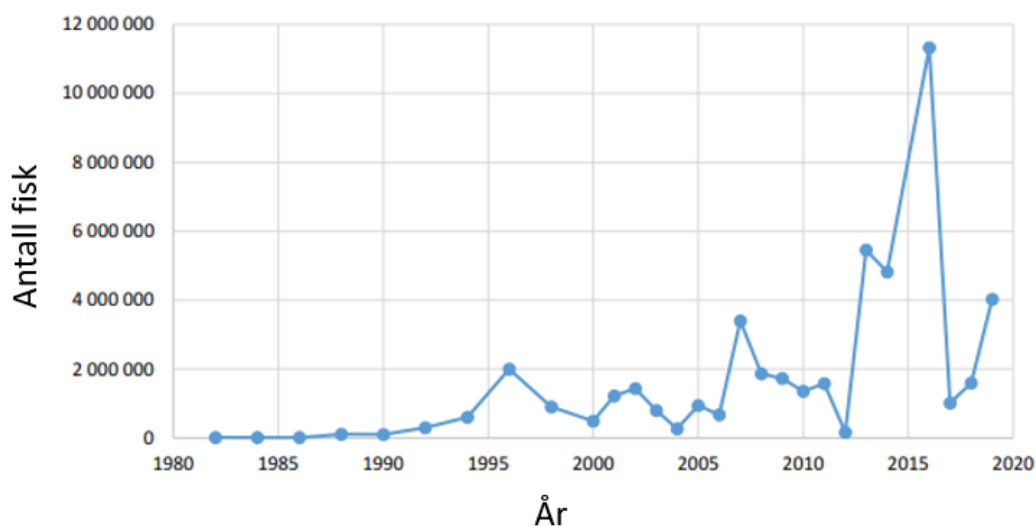
(Scand-LAS)

Denne definisjonen fastslår at planene for dyreforsøk må være kvalitetssikret på i hvert fall tre forskjellige nivå: de må være lovlige, de må ha vitenskapelig kvalitet og de må være etisk forsvarlig. Det siste kriteriet er helt klart den vanskeligste å bedømme. Lovene og retningslinjene for dette vil ikke alltid tolkes likt av alle, og dermed også implementert forskjellig.

For å avveie verdien av et forsøk opp mot byrden for dyret, må en nytte-kostnadsanalyse bli utført. Slike analyser er vedtatt i EUs forsøksdyrdirrektiv [26]. Direktivet trådte i kraft 1. januar 2013. I Norge er kravene vedtatt i en forskrift [27] som trådte i kraft 1. juli 2015.

Det har lenge vært en sosial og politisk interesse omkring statistikken for antall forsøksdyr i hvert land. I Norge ble det brukt over 4.1 millioner dyr til vitenskapelige formål i 2019 [23]. Dette er et relativt høyt antall, sammenlignet med andre land [28]. Et høyt antall forsøksdyr trenger ikke nødvendigvis være negativt, da det viser at landet har et høyt nivå av forskningsaktivitet. Videre kommer også forskjellige definisjoner av dyreforsøk inn i bildet. I 2019 var det rundt 4 millioner fisk som ble brukt til vaksineforsøk. Dette var større tester som først ble testet i mindre skala. Dermed kan man argumentere for at disse fiskene ikke er forsøksdyr per se siden de uansett skulle vaksineres. Leverandører velger ofte et stort antall individer for å sørge for at vaksinens effekt under forskjellige kystforhold blir tilstrekkelig belyst. Det kan dermed sies at disse dyrene faller utenfor definisjonen av dyreforsøk i henhold til EUs siste eksperimentelle dyredirektiv. I figur 2.19 er antallet fisk som ble brukt til vitenskapelige formål fremstilt. Som figuren viser, er det stor variasjon i

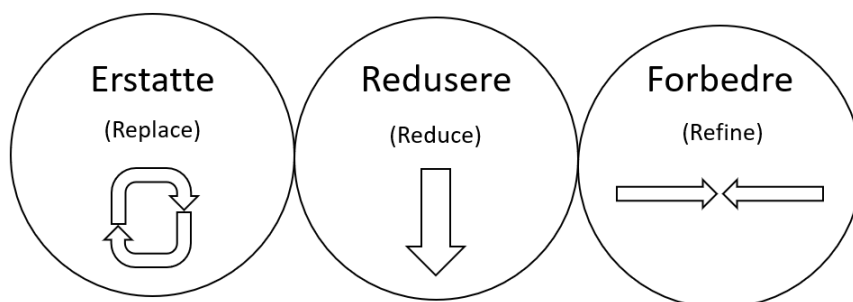
antallet fisk som blir brukt. Eksempelvis ble det benyttet 10,6 millioner laks i 2016 under to store feltforsøk med avlusningsmidler.



Figur 2.19: Antall fisk brukt til dyreforsøk 1982-2020 [23].

En nytte-kostnadsanalyse forutsetter grundig kunnskap om dyrenes evne til å oppleve ubehag og smerte. Utviklingen av velferdsindikatorer for å måle dette vitenskapelig har hatt store fremskritt de siste årene [29]. Dessverre er det lettere å identifisere positive enn negative indikatorer. Prinsippet om at tvil skal være til fordel for dyrene, kan brukes. Retningslinjer har blitt utviklet for å klassifisere belastningen på forsøksdyrene [30].

Konseptet som omhandler de ”3R-ene” (Replacement, Reduction, Refinement) som kom i 1959 [31], har satt et større fokus på dyrevelferden til forsøksdyr enn hva som har vært tilfellet tidligere. 3R-prinsippet er lovfestet i mange land deriblant Norge. De ”3R-ene” innebærer følgende: dyreforsøk skal hvis mulig bli erstattet med andre alternativer (erstatte), antall forsøksdyr skal reduseres til et minimum (redusere) og forsøket skal forbedres slik at dyret opplever minst mulig ubehag (forbedre). I løpet av 1980-tallet i Norge ble bruken av pattedyr til forsøk halvert, noe som med stor sannsynlighet skyldes 3R-konseptet, illustrert i figur 2.20.



Figur 2.20: Illustrasjon av de "3R-ene".

Det har riktignok vist seg at det å strebe etter å redusere antall forsøksdyr til enhver tid kan være en utfordring [32]. Ved reduseringen av forsøksdyr er summen av lidesle redusert, men dette innebærer to utfordringer. Det ene innebærer at det kan bli utført for mange forsøk på hvert individ. For det andre kan ikke antall forsøksdyr bli så lav at forsøket mister evnen til å levere statistisk signifikante resultater. Dermed er det viktig at personer med statistikkunnskaper er involvert i planleggingsfasen til et forsøk for å kunne avgjøre antallet av forsøksdyr. Utviklingen av nye statistiske metoder har vist seg å være i stand til å halvere antall forsøksdyr, uten at dette påvirker kvaliteten på resultatene [33].

For å kunne utføre et forsøk med levende dyr, må mattilsynet først godkjenne forsøket. Denne søknadsprosessen inkluderer at man gjør rede på hvordan de 3R-ene blir implementert i forsøket. Dermed måtte også de 3R-ene redegjøres for i OWITOOLS-prosjektet (utsagn fra Birger Venås, forsker ved Sintef). Spørsmålet vedrørende hvorfor man ikke kan oppnå forsøkets hensikt uten å benytte levende dyr, blir besvart med at hensikten med forsøket er å finne en sammenheng mellom støt som registreres av sensorfisker og grad av skade som laks påføres ved å utsettes for samme støt. Dette er ikke mulig å få evaluert på en tilstrekkelig måte uten bruk av levende dyr. Men, ved å gjennomføre et slikt forsøk vil sensorfisker kunne brukes til å erstatte (Replace) bruk av levende fisk i utviklingen av ny teknologi til håndtering av fisk, og ved kalibrering av eksisterende utstyr som er i bruk i dag, som for eksempel avlusningsutstyr. Videre blir spørsmålet om hva som gjøres for å minimalisere bruken av antall individer forklart med at det ikke finnes tilsvarende tidligere forsøk. Siden støtforsøket med støttriggen er et pilotprosjekt, vil dens hensikt være å ytterligere redusere (Reduction) antall forsøksdyr i hovedforsøket (fullskala). Antallet individer er dermed lagt så lavt som overhodet mulig sett at variasjonen i effekt er moderat per belastningsnivå. Siden dette er et pilotprosjekt og tidligere lignende forsøk ikke har blitt utført, vil det være vanskelig å forbedre forsøket med tanke på tidligere erfaringer (Refine). Dermed var alle 3R-enen implementert i forsøket og prosjektet fikk godkjent søknaden.

Kapittel 3

Elementmodell av laks

Dette kapitlet omhandler utformingen av en 3D-modell av laks, samt fremgangsmåten for analysen av modellen i en støtsituasjon. Geometrien til laksen ble laget i 3D-modelleringsprogramvaren Solidworks og analysen ble utført ved hjelp av FEA-programvaren Abaqus.

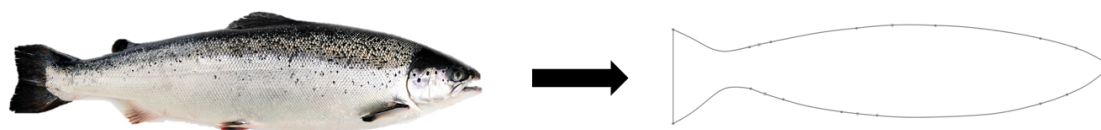
3.1 Geometri

Den fysiske geometrien til en laks er relativt kompleks. Derfor vil det være vanskelig å foreta analyser ved hjelp av en 3D-modell med høyt detaljnivå. Derfor vil denne oppgaven fokusere på å lage en modell med enklest mulig representativ geometri. Før modelleringsprosessen kan starte må dimensjonene for laksen bli bestemt. Ut ifra en bestemt lengde kan både fiskens største høyde og tykkelse bestemmes fra interpolasjon av allerede eksisterende data [34]. Dimensjonene for laksen er gitt i tabell 3.1.

| | Lengde | Høyde | Tykkelse |
|--------------------------------|--------|-------|----------|
| Dimensjoner elementmodell [mm] | 550 | 110 | 80 |

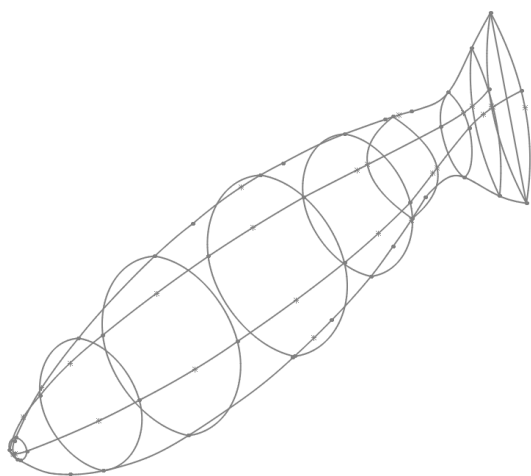
Tabell 3.1: Dimensjoner for elementmodellen.

Modelleringen startet med å ta utgangspunktet i et bilde av en fullvoksen oppdrettslaks. Ut ifra denne var prosessen relativ enkel for å lage en forenklet 2D-skisse av laksen som presentert i figur 3.1. For å skape denne skissen ble det brukt enkle splines som var koblet sammen. Denne skissen danner grunnlaget for den videre utformingen av geometrien.

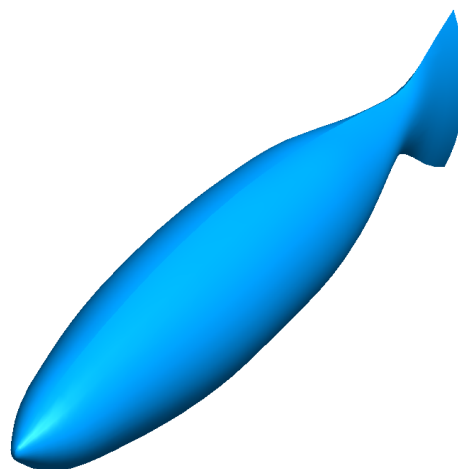


Figur 3.1: 2D skisse av laksen.

For å kunne utforme en fullstendig 3D-modell, må skissen være i tre dimensjoner. Dermed ble tverrsnittene hver for seg utformet og koblet sammen med den opprinnelige skissen. Resultatet av den ferdige 3D-skissen er presentert i figur 3.2. Når den fullstendige tre-dimensjonale skissen er tegnet og hver enkel spline er koblet sammen med hovedskissen, kan en loftoperasjon bli utført. Ved å bruke hovedskissen som en veiledende linje og de resterende tverrsnittsskissene som profiler, blir den endelige 3D-modellen utformet ved hjelp av loftfunksjonen i Solidworks, se figur 3.3. Førsteutkastet av modellen er presentert i vedlegg A. Geometrien hadde mange detaljer og var dermed utfordrende å utføre analyser med. Den ble derfor forkastet.



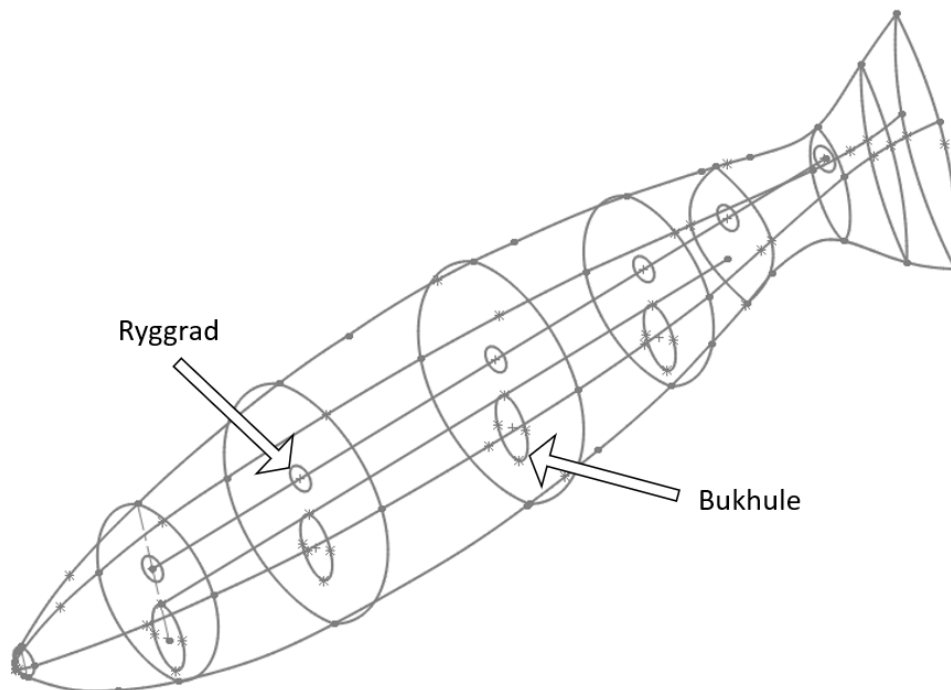
Figur 3.2: 3D-skisse av laksen.



Figur 3.3: 3D-modell av laksen.

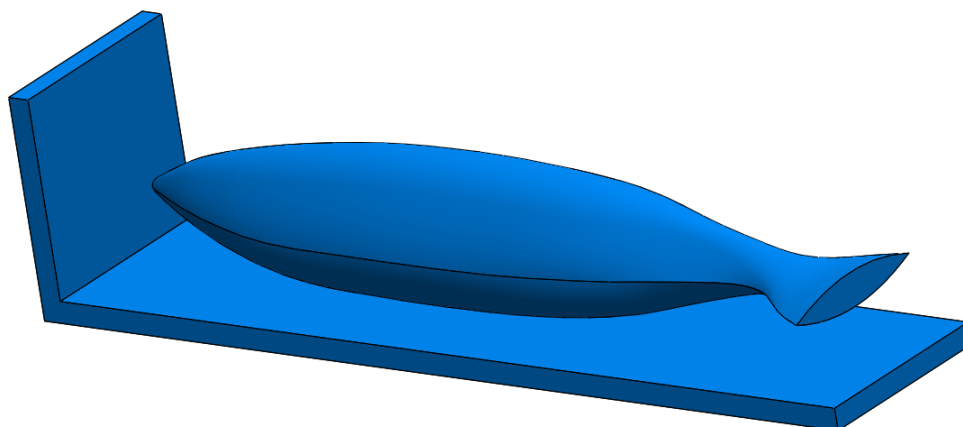
Det ble også utført et forsøk på å modellere ryggraden og bukhulen til fisken i Solidworks. Tanken bak dette var at hver del av fisken skulle modelleres i denne programvaren og deretter bli satt sammen i Abaqus. Dette viste seg å være en feilslått fremgangsmåte, siden delene i fisken må partisjoneres i Abaqus for at analysen skal fungere riktig. Fremgangsmåten for partisjoneringen av fisken er presentert i kapittel 3.2.1. I figur 3.4 er den

tredimensjonale skissen for modellen med ryggrad og bukhule presentert.



Figur 3.4: 3D-skisse av laksen inkludert ryggrad og bukhule.

Støtanalysen ble utført mot en 90° vegg. Dette var et valg som henger sammen med det fysiske forsøket som ble utført i denne oppgaven, der dette er nødvendig for å oppnå repeterbare målinger. Dermed vil dette også være et utgangspunkt i denne analysen. Ettersom veggens består av rette linjer var det ikke behov for å bruke splines, men heller ordinære linjer. Den ferdige modellen av både laksen og støtveggen er presentert i figur 3.5.



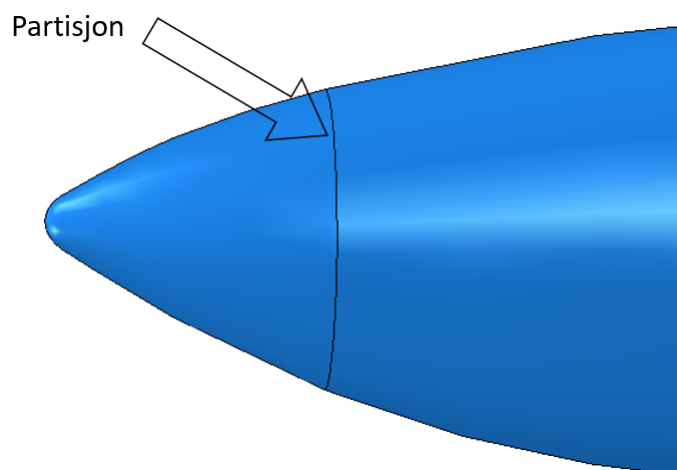
Figur 3.5: 3D-modell av laksen og veggens til støtforsøket.

3.2 Analyse

I dette delkapitlet blir de essensielle delene av analysen i Abaqus presentert. Etter at geometrien for modellen var laget i Solidworks, kunne den lastes inn i Abaqus. Analysen gikk ut på å simulere støtforsøket i tre forskjellige hastigheter, henholdvis 1,5, 2 og 2,5 $\frac{m}{s}$. Valget for hastighetene var basert på hastighetene en laks opplever i rørsystemet ved en avlusningsoperasjon [2].

3.2.1 Partisjonering av modellen

For å kunne dele den modellerte fisken inn i forskjellige deler og materialegenskaper, må den partisjoneres. I denne oppgaven blir det valgt å kun ha en enkel partisjonering: hoderegionen og resten av fisken, se figur 3.6. Det er i denne delen av analysen at fisken må bli delt inn i flere elementer for eksempelvis å kunne se på hjernerensponsen til fisken. Det ble utført et forsøk på å implementere en rygggrad i fisken ved hjelp at partisjonering. Det viste seg imidlertid fort at dette bydde på utfordringer når det gjaldt materialegenskapene som ble funnet i litteraturstudien. En diskusjon om implementeringen av rygggraden er presentert i kapittel 6.6.



Figur 3.6: Partisjoneringen mellom hoderegionen og resten av fisken.

Partisjonering av modellen fungerer bedre enn å modellere delene hver for seg for så å koble de sammen. Grunnen til dette er at det vil bli skapt en ”falsk” stivhet i strukturen ved å modellere delene enkeltvis. Under tilkoblingen av delene, vil ikke nettverket av nodene være koblet tilstrekkelig sammen og kan skape feilaktige resultater.

3.2.2 Materialelegenskaper

For at en FE-analyse skal gi gode resultater er det helt vesentlig å finne gode materialelegenskaper for de fysiske legemene eller objektene som skal simuleres. I kapittel 2.3 ble det presentert et forslag til egenskapene og parameterne som ble brukt som et utgangspunkt for denne analysen. Hoderegionen ble modellert som et plastisk elastisk materialet og resten av fisken som muskler, altså et elastisk materialet. Ved å partisjonere fisken viste det seg at de opprinnelige parameterne for materialene ikke stemte. Dette henger sammen med måten laksens geometri ble modellert på. Siden modellen både mangler buken og ryggraden, vil fisken være representert som et massivt volum. Dermed vil modellen være alt for stivt basert på de opprinnelige materialelegenskapene hentet fra mennesker. Det ble utført flere analyser helt til støtforsøket viste resultater som var realistiske. De endelige materialelegenskapene brukt i analysen er presentert i tabell 3.2 og 3.3.

| Parameter | Muskulatur |
|--------------------------------------|------------|
| Tetthet, ρ ($\frac{kg}{m^3}$) | 1006 |
| Young's modulus, E (MPa) | 1 |
| Poissons forhold, ν | 0,2 |

Tabell 3.2: Elastiske materialelegenskaper for laksens muskulatur brukt i analysen.

| Parameter | Hode |
|--------------------------------------|--------|
| Tetthet, ρ ($\frac{kg}{m^3}$) | 1100 |
| Young's modulus, E (MPa) | 50 |
| Poisson's forhold, ν | 0,28 |
| Plast modulus, E_{tan} (GPa) | 1,25 |
| Flytespenning, σ_y (GPa) | 0,189 |
| Brudd, ε_{brudd} | 0,0178 |

Tabell 3.3: Elastisk plastiske materialelegenskaper for laksens hoderegion brukt i analysen.

Etter at tettheten var definert, var det mulig å finne vekten av fisken i Abaqus. Det viste seg at geometrien av fisken stemte nokså overens med hva en gjennomsnittlig laks med de satte dimensjonene skal veie, se tabell 3.4. De forventede verdiene for laksens lengde og vekt er basert på personlig kommunikasjon med Borys Sukhanyk (prosjektleder for FrøyGruppen).

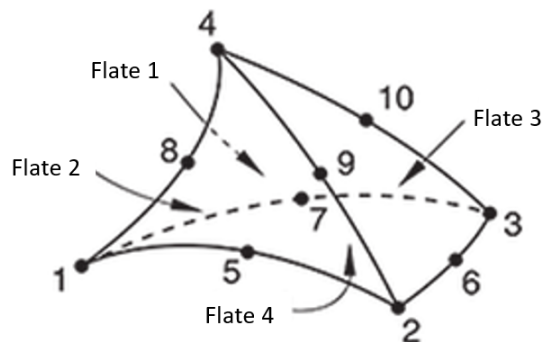
| | Laks 55 [cm] |
|---------------------------------------|--------------|
| Vekt og lengde av elementmodell [kg] | 2.45 |
| Forventet vekt og lengde av laks [kg] | 2.20 |

Tabell 3.4: Elementmodellens vekt samt forventet vekt.

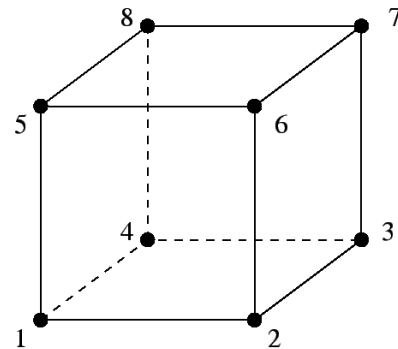
Materialeegenskapene til veggen og platen måtte også defineres. Her var det ikke særlig avgjørende hva slags materialet det dreide seg om så lengde det var stivt nok. Dermed ble det valgt at platen og veggen skulle være vanlig stål.

3.2.3 Mesh - generere et nettverk av noder og elementer

Et mesh er en samling av elementer som er sammenkoblet i noder som brukes til å idealisere objektet eller strukturen av interesse. Siden analysen i denne oppgaven forholder seg til en relativ kompleks geometri, er det nødvendig at programvaren brukt til analysen genererer elementene og nodene automatisk. For geometrien av laksen vil det bli brukt en 10 noders kvadratisk tetraedriske elementer (C3D10M). Hver side av dette elementet ble satt til å være 10mm stor. Denne typen element egner seg godt til analyser som inneholder store deformasjoner og kontaktanalyser [35]. For selve veggen blir det bruk et 8 noders lineær firkantet element (C3D8R) med en størrelse på 8mm. Begge elementtypene er presentert i figur 3.7 og 3.8.

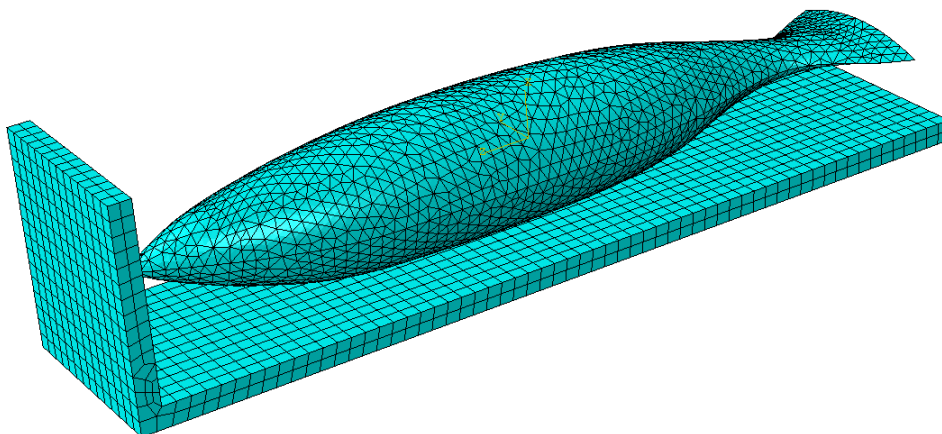


Figur 3.7: 10 noders kvadratisk tetraedriske element.



Figur 3.8: 8 noders lineær firkantet element.

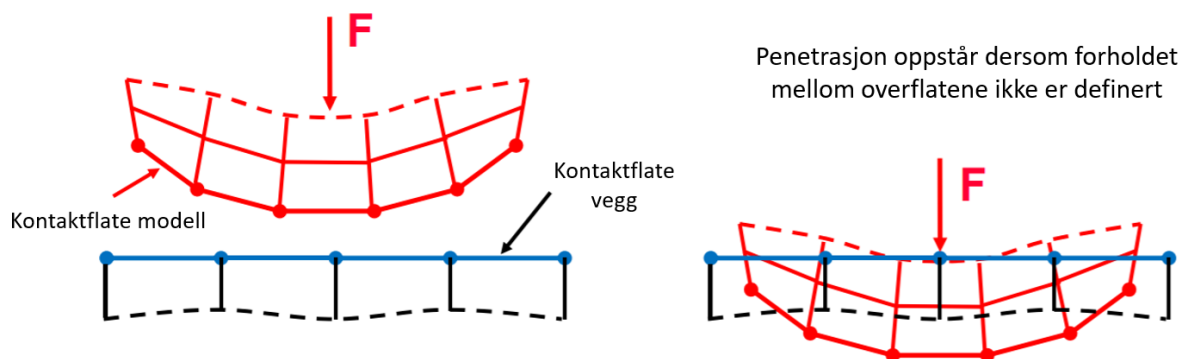
Etter at både elementene og størrelsen på disse var valgt, kunne geometrien bli delt inn i elementene automatisk i Abaqus, se figur 3.9.



Figur 3.9: Geometrien til laksen og veggen delt inn i elementer og noder.

3.2.4 Kontaktformulering

To fysiske legmer i Abaqus skal ikke penetrere hverandre. Dermed må programmet etablere et forhold mellom de to overflatene for å forhindre dem i å passere gjennom hverandre i analysen. I Abaqus kan dette forholdet etableres ved hjelp av forskjellige kontaktformuleringer. Figur 3.10 gir en illustrasjon av hva som kan oppstå dersom forholdet mellom kontaktflatene ikke er etablert.



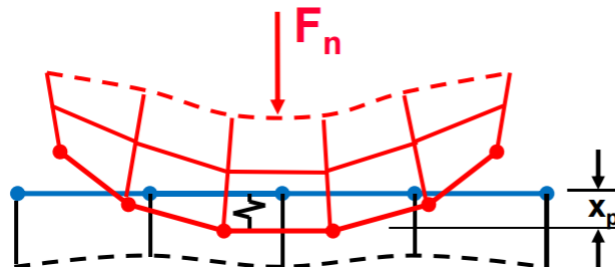
Figur 3.10: Illustrasjon av kontaktflater.

For ikke-lineære, solide legmer kan ”pure penalty”-formuleringen bli anvendt. Det er denne kontaktformuleringen som blir brukt i støtanalysen. Hovedprinsippet bak denne formuleringen er

$$F_{\text{normal}} = k_{\text{normal}} \cdot x_p \quad (3.1)$$

der F_{normal} er kontaktkraften mellom legemene, k_{normal} er stivheten og x_p er avstanden

som legemene passerer i hverandre, se figur 3.11. Ideelt sett vil man at k_{normal} er svært stor slik at det ikke oppstår penetrasjon. Dette er dessverre ikke numerisk mulig med denne formuleringen, men så lenge x_p er liten nok vil resultatene av analysen være gode.



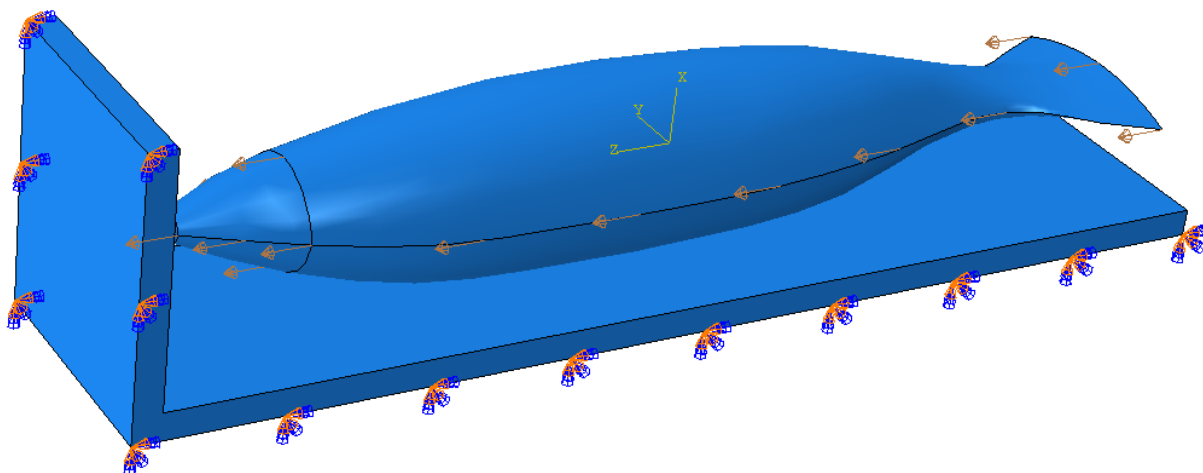
Figur 3.11: Illustrasjon av kontaktformuleringen.

Formuleringen beskrevet over gjelder dersom kontaktflatene står normalt på hverandre. I de tilfellene kontakten oppstår tangensielt i en analyse, som det også gjør mellom siden av fisken og platen den ligger på, må det defineres en friksjonskoeffisient. Denne koeffisient vil bestemme hvor store skjærspenninger som vil oppstå ved overflatene. Siden det ikke finnes et konkret tall for dette fra forskning, ble det kjørt flere analyser med forskjellige koeffisienter. Det viste seg at friksjonskoeffisienten ikke hadde en stor innvirkning på resultatet for analysen, og dermed ble denne satt til å være 0,1.

Ved at kontaktformuleringene ble definert, ble det mulig å hente ut kontaktkraften mellom vegg og modellen i støtforsøket. For å plote disse resultatene ble det brukt Matlab, se vedlegg D.2.

3.2.5 Grensebetingelser

Grensebetingelsene i forsøket omhandler hovedsaklig den fast innspente platen og den påsatte hastigheten i andre steget av analysen. I Abaqus blir hastigheten derfinert som en grensebetingelse. Platen er fast innspent gjennom alle stegene i analysen, mens hastigheten av fisken er en betingelse som bare er aktivert for steg to. Dette er også forklaringen på hvorfor steg to har en lav varighet i forhold til de to andre stegene. En illustrasjon av grensebetingelsene er presentert i figur 3.12, der pilene på fisken indikerer hastigheten og trekantene på sidene av platen indikerer innspenningen.



Figur 3.12: Grensebetingelsene illustrert på modellen.

3.2.6 Analyseforløp

Analysen utført i Abaqus er delt inn i forskjellige steg som hver for seg har et formål. Slik som fisken er modellert i Solidworks flyter den rett over platen og snuten er rett fremfor veggen. Dermed må gravitasjonskraften bli satt på hele modellen slik at fisken finner en realistisk likevektsposisjon på platen. Etter at den ligger på platen må hastigheten på fisken defineres. Videre skal fisken ikke lenger ha en påsatt hastighet i det den treffer veggen. Det vil si at fisken vil fortsatt ha en hastighet fra forrige steg, men denne er ikke påsatt lenger. I dette steget skal bare gravitasjonskreftene virke. Varigheten av disse stegene kan bestemmes i Abaqus. Tabellen 3.5 viser en kort beskrivelse og varigheten av hvert steg i analysen. Den lengste varigheten er satt til det første steget slik at fisken finner en likevektsposisjon på platen. Videre har steg to en kort varighet siden den påsatte hastigheten skal stoppe opp før fisken treffer veggen. Varigheten i det siste steget er satt til å være tilstrekkelig for å analysere selve støtet mot veggen, der hastigheten blir videreført fra steg to.

| | Beskrivelse | Varighet [s] |
|--------|--|--------------|
| Steg 1 | Gravitasjonskraften blir definert på hele modellen | 1 |
| Steg 2 | Hastigheten på fisken blir definert | 0.002 |
| Steg 3 | Støtet utføres, bare gravitasjonskraften er definert | 0.1 |

Tabell 3.5: Beskrivelse og varighet av stegene i analysen.

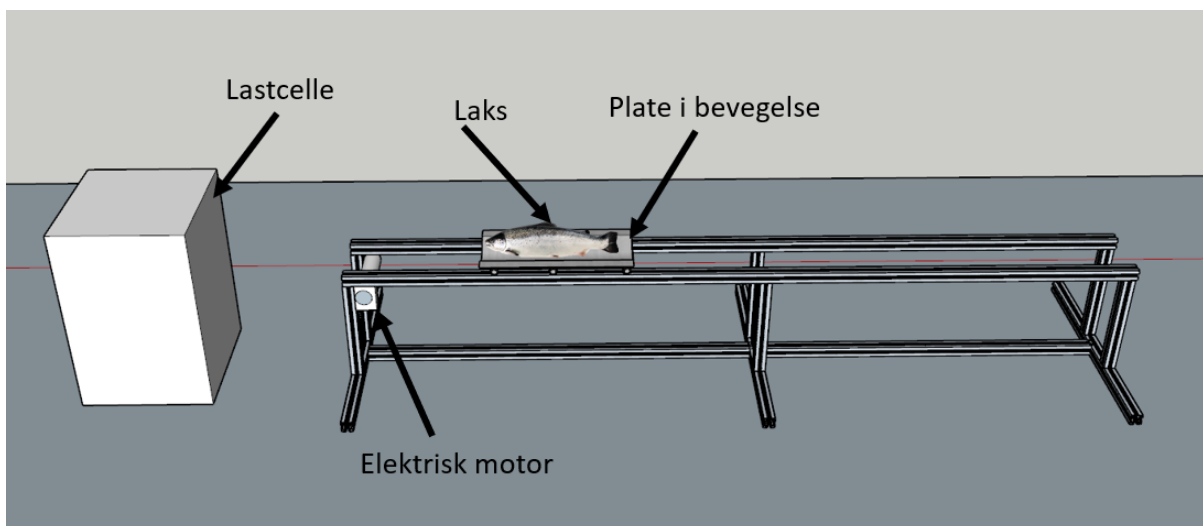
Geometrien til modellen har nå blitt utarbeidet og analysert. Det neste steget i oppgaven vil være å presentere det fysiske forsøket med laks for å kunne gjøre et forsøk på å validere elementmodellen.

Kapittel 4

Fysisk støtforsøk med laks

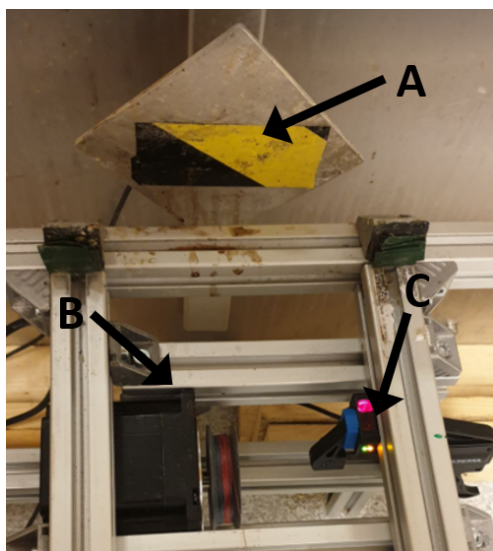
For å kunne validere analysen gjort i Abaqus, vil et støtforsøk med en ekte laks bli utført. Dette støtforsøket vil også gi en større forståelse av hva som skjer med en laks i en støtsituasjon. I dette forsøket vil laks bli akselerert opp til en vis hastighet og deretter oppleve et støt på en lastcelle 90° på fartsretningen. Det vil bli benyttet fire laks i forskjellige størrelser, og på samme måte som i analysen vil disse bli akselerert opp til en konstant hastighet på 1,5, 2 og 2,5 $\frac{m}{s}$ [2]. Videre blir det utført tre forsøk for hver hastighet for hver fisk. Alle komponentene som blir benyttet i forsøket er satt sammen til et system gjennom LabVIEW. Dataen fra lastcellen vil deretter bli kurvetilpasset og klargjort til presentasjon.

En forsøksskisse for støtforsøket er presentert i figur 4.1.

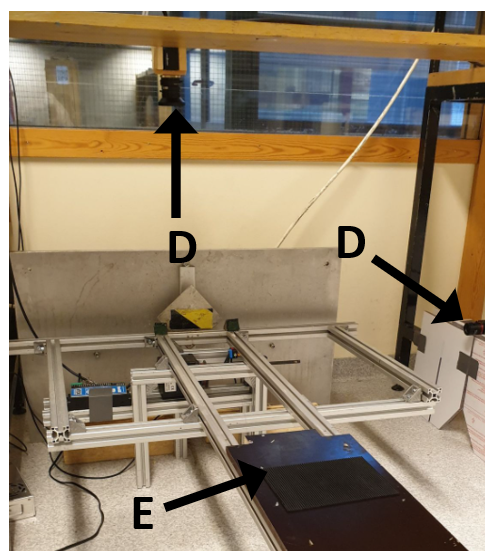


Figur 4.1: Illustrasjon av oppsettet for det eksperimentelle forsøket.

Selve konstruksjonen av støttriggen besto av aluminiumskinner der akselerasjonslengden til platen er på 2,4m. Lastcellen var festet i en tung stålplate som var satt opp mot veggen som presentert i figur 4.3. Dette var for å unngå at riggen forflyttet seg i det momentet fisken traff lastcellen. Videre var det festet en fiskesnor på den elektriske motoren og platen slik at den oppnådde den ønskede hastigheten. På den bevegende platen la det en kvadratisk gummiplate som øker friksjonen mellom fisken og underlaget så den ikke skle av ved akselerasjonen. Plasseringen av de resterende hovedkomponentene er presentert i figur 4.2 og 4.3.



Figur 4.2: Støttriggen: A) Lastcelle, B) Elektrisk motor, C) Fotoelektrisk sensor.



Figur 4.3: Støttriggen: D) Kamera, E) Bevegende plate.

4.1 Implementering av LabVIEW

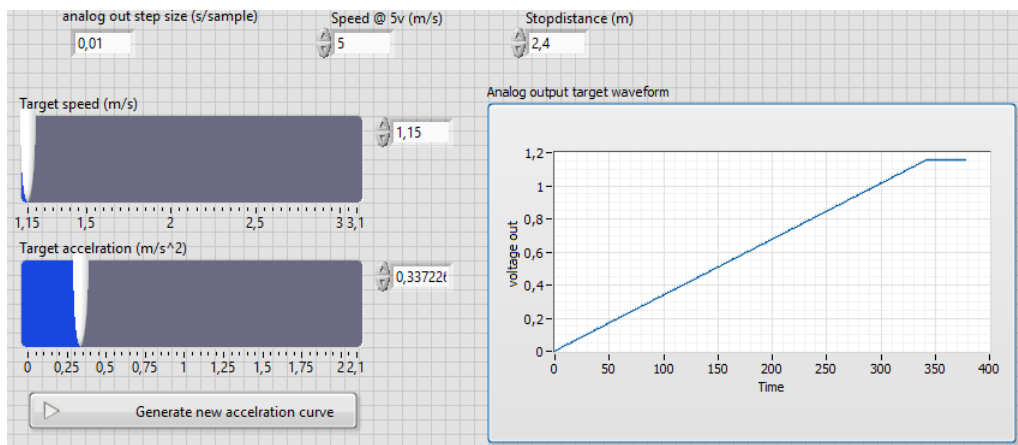
For å starte, overvåke og avslutte alle komponentene ved støttriggen riktig, ble programmet LabVIEW benyttet. Koden brukt i dette programmet ble utarbeidet av Sintef for OWITOOLS prosjektet. I denne oppgaven ble samme programmet brukt, men for ikke å bruke koden som en "black box" vil prinsippene bak koden bli forklart i dette delkapitlet.

LabVIEW er en forkortelse for "Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench". Dette er en programmeringsprogramvare der det er mulig å lage programmer ved hjelp av grafiske notasjoner (sammenkoblede funksjonelle noder der data strømmer gjennom). Dette programmeringsspråket skiller seg fra de tradisjonelle programmeringsspråkene, som C, C++ eller Java, der programmeringen foregår med tekst. LabVIEW er imidlertid mer enn et programmeringsspråk. Det er et interaktivt programutviklings- og gjennomføringssystem designet for forskere og ingeniører. Ved hjelp av det kraftige grafiske

programmeringsspråket, som mange LabVIEW-brukere kaller "G" (for grafisk), kan bruken av LabVIEW øke produktiviteten av programoppbyggingen betraktelig. Programmerer som det tar uker eller måneder å skrive ved hjelp av konvensjonelle programmeringsspråk, kan fullføres i løpet av timer ved hjelp av LabVIEW. Dette er fordi programmet er spesielt designet for å ta målinger, analysere data og presentere resultater for brukeren. Siden LabVIEW har et så allsidig grafisk brukergrensesnitt som er relativt enkelt å programmere med, er det også ideelt for simuleringer, presentasjon av ideer eller generell programmering.

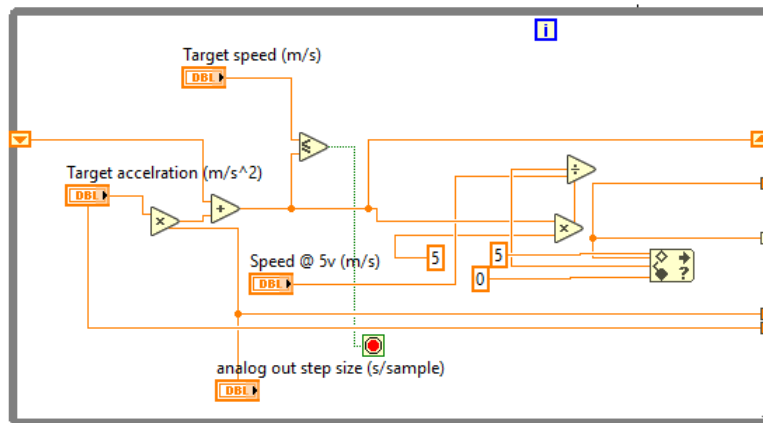
Et LabVIEW-program består av ett eller flere virtuelle instrumenter (VI). Det kalles "virtuelle instrumenter" fordi utseende og bruken ofte imiterer fysiske instrumenter. Bak kulissene er de analoge med hovedprogrammer, funksjoner og under rutiner fra programmeringsspråket C. Et program har dermed to hoveddeler: et frontpanel og et blokkdiagram.

Frontpanelet er det interaktive brukergrensesnittet til en LabVIEW, som simulerer frontpanelet til et fysisk instrument, se figur 4.4. Frontpanelet kan inneholde trykknapper, grafer og mange andre kontroller og indikatorer. For de resterende delene av frontpanelet brukt i denne oppgaven, se vedlegg F.



Figur 4.4: Forpanelet for styringen av hastigheten til støttrigen.

Blokkdiagrammet er LabVIEWs kildekode, konstruert på det grafiske programmeringsspråket G, se figur 4.5. Blokkdiagrammet er koden som kjører hele systemet. Komponentene i et blokkdiagram er innebygde funksjoner, konstanter og kontrollstrukturer. Datastrømmen blir definert ved å koble de aktuelle objektene sammen. Objektene på frontpanelet har tilsvarende terminaler på blokkdiagrammet, slik at data kan overføres fra brukeren til programmet og tilbake til brukeren.



Figur 4.5: Del av blokkdiagrammet i LabVIEW for støttrigen.

4.1.1 Blokkdiagram

Blokkdiagrammet som sto for styringen av støttrigen er relativt komplisert, se vedlegg E. Undertegnende utarbeidet ikke hele koden, men prinsippene bak er relevant for å forstå hvordan riggen fungerte. Kort forklart så fungerte koden slik:

1. Starte alle komponentene og frontpanelet
2. Akserlasjonskurven blir oppdatert, input til motoren blir beregnet
3. Starte forsøk
 - Motoren blir startet
4. Starte datainnsamling
 - Motoren stopper når platen går over den fotoelektriske sensoren
 - Lastcelle starte logging
 - Begge kameraene starter logging
5. Avslutte forsøket
 - Resultatene fra lastcellen blir presentert i frontpanelet og lagret
 - Bildene fra kameraene blir presentert i frontpanelet og lagret
6. Hastighetsmålingen med kamera blir utført i frontpanelet

4.2 Forsøksoppsett

Støttriggen besto av flere komponenter som hver for seg utgjorde en viktig del av systemet. I dette delkapitlet vil hovedkomponentene bli presentert og deres funksjon i støttriggen forklart.

4.2.1 Strømforsyning

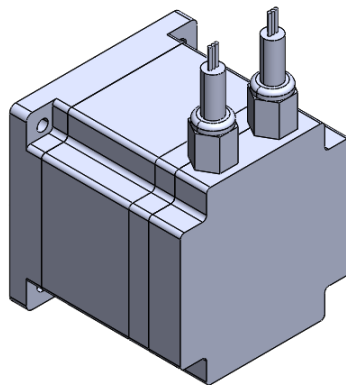
En likestrømforsyning (DC) er et standard test- og måleutstyr som brukes av elektroingeniører og kretsdesignere for å teste og drive ulike elektriske system. Denne typen strømforsyning leverer stabil DC-spenning som er nødvendig for elektriske komponenter. I dette forsøket ble det benyttet en forsterker til lastcellen/strekklappene som hadde et behov for en stabil DC-spenning på 24V. En forsterker ble brukt for å forsterke spenningen som ble levert av lastcellen slik at den kunne prosesseres videre. Det var også viktig at strømforsyningen var ”lab grade”. Dette innebærer at den leverer stabil spenning uten mye støy siden det viste seg at forsterkeren ikke var robust nok mht. støy på strømforsyningen til å bruke en vanlig 24V DC PSU. Dermed ble strømforsyningen som er avbildet i figur 4.6 brukt.



Figur 4.6: Strømforsyningen brukt i forsøket.

4.2.2 Elektrisk motor

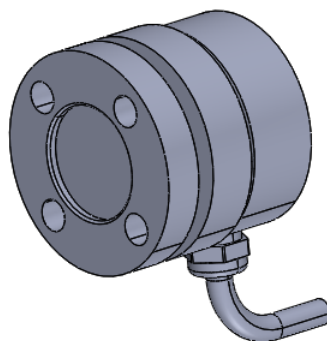
Det er den elektriske motoren som får den bevegende platen til en ønsket hastighet ved hjelp av en snor fra motoren til platen. Etter at den ønskede hastigheten er gitt som input-parameter i LabVIEW, blir det beregnet hvor mye strøm som må gå til motoren for å oppnå denne hastigheten, se vedlegg G. Figur 4.7 viser en illustrasjon av motoren.



Figur 4.7: Elektriske motoren brukt i forsøket [36].

4.2.3 Lastcelle

For å måle kraften som oppsto i støtet mellom laksen og veggen, ble det brukt en lastcelle. En lastcelle konverterer kraft til elektrisk energi som kan måles og dermed avleses. Denne konverteringen skjer hovedsaklig i to trinn; kraften blir registrert av en strekkmåler og deretter omgjort til et elektrisk signal gjennom endring av den elektriske motstanden i strekkmåleren. Denne strekkmåleren endrer form avhengig av hvor stor belastningen er. Gjennom sin deformasjon endres mengden strøm som går gjennom, og denne endringen kan leses av som en kraft. Lastcellen brukt i dette forsøket har flere strekkmålere. Ved å ha flere strekkmålere kan kraften oppdages og konverteres nøyaktig, selv om kraften ikke konsekvent er lokalisert i midten av måleren. Strekkmålerne i lastcellen er anordnet i en diamantformasjon, kjent som Wheatstone Bridge-formasjonen [37]. Det er viktig å ha en lastcelle med flere strekkmålerne for dette forsøket siden det vil være utfordrende å treffe snuten til laksen nøyaktig midt på sensoren. Figur 4.8 viser en illustrasjon av sensoren brukt i forsøket.



Figur 4.8: Lastcellen brukt i forsøket [37].

Samplingsraten til lastcellen i forsøket var $30\,000 \frac{\text{målinger}}{\text{s}}$. Videre ble lastcellen satt opp til å lagre 0.3s etter at den fotoelektriske sensoren ble aktivert. En aluminiumsplate ble videre festet frempå sensoren for å øke arealet fisken kan treffe. Lastcellen måtte også kalibreres. Dette ble utført ved at en person sto på cellen og kalibrerte den ved å skrive inn sin egen kroppsvekten. Usikkerheten ved målingene ligger på 0.5% [37] under kontrollerte forhold, men den største usikkerheten rundt målingene vil være om fisken treffe lastcellen nærme nok midten av sensoren.

4.2.4 Fotoelektriske sensor

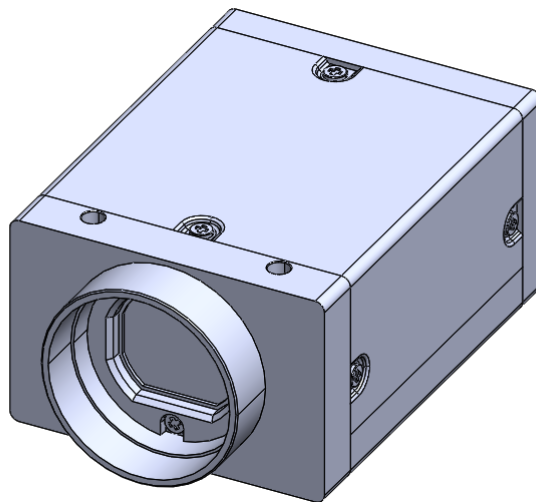
For å vite når motoren skal stoppe slik at platen ikke lenger ble dratt langs støttriggen, ble det brukt en fotoelektrisk sensor. Den fotoelektriske sensoren avgir ”lys” som synlig lys og infrarøde stråler gjennom senderen, og oppdager en endring i mengden lys som reflekteres av et objekt og dermed sender et signal ut. Prinsippet for den fotoelektriske sensoren blir som følgende: det lysgivende elementet til senderen sender ut lys som mottas av det lysmottakende elementet. Dette fører til at utgangssignalet fra sensoren går inn i LabVIEW som videre stoppe motoren og starter logging av data fra både lastcellen og kamerane. Sensoren brukt i forsøket er avbildet i figur 4.9.



Figur 4.9: Fotoelektriske sensoren brukt i forsøket.

4.2.5 Høyhastighetskamera

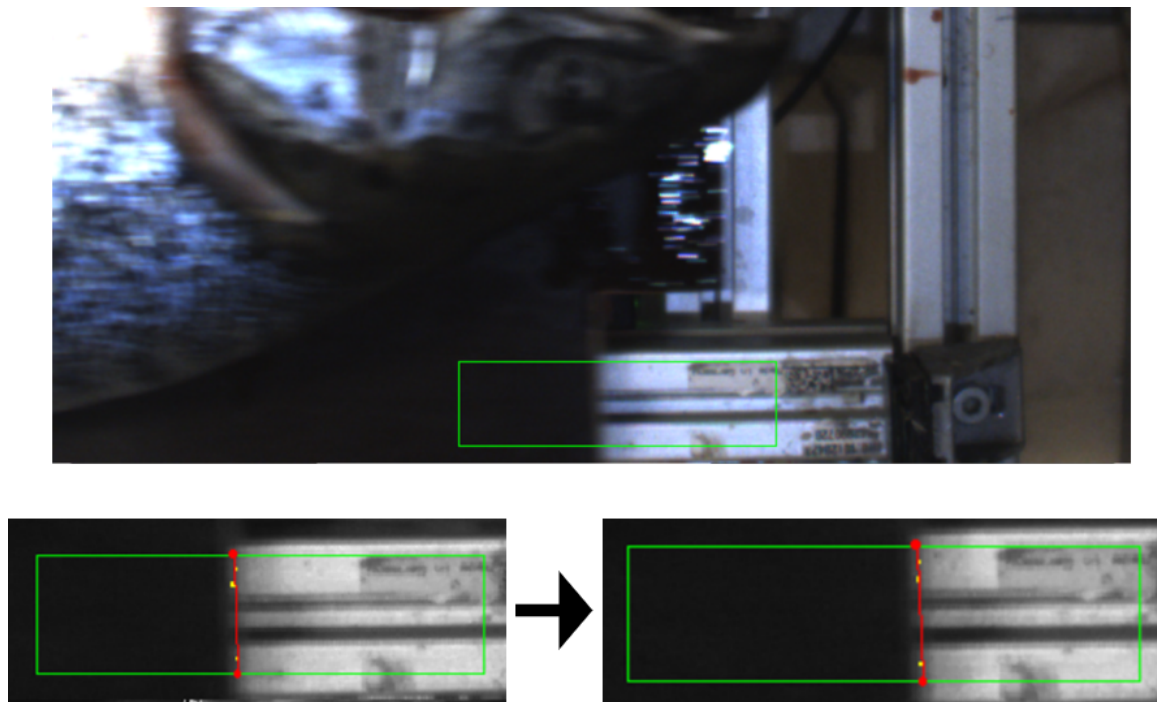
Støtforsøket i seg selv foregikk svært raskt, noe som førte til at det ble utfordrende å se detaljene av forsøket uten et høyhastighetskamera. Kamerane ble brukt til å ta bilder, men også for å dobbelsjekke at hastigheten til den bevegende platen stemte. Kameraene brukt i forsøket er illustrert i figur 4.10.



Figur 4.10: Kamera brukt i forsøket [38].

Kamerane var plassert slik som presentert i figur 4.3. En lå på samme plan som den bevegende platen mens det andre lå rett ovenfor lastcellen. Begge hadde en bildefrekvens på rundt $380 \frac{\text{bilder}}{\text{sekund}}$. Kamerane var stilt inn slik at de startet å lagre bildene i 700ms etter at den fotoelektriske sensoren ble aktivert (den bevegende platen utløser sensoren). Deretter tok begge kamerane 200 bilder og lagret disse for hvert forsøk. Dette var innstillinger som kan justeres i LabVIEW, men etter litt kalibrering ble det konkludert med at disse innstillingene fanget bevegelsene i støtet godt.

Hastigheten til den bevegende platen ble satt gjennom moteren. Det var riktignok ikke alltid denne var pålitelig, mest sannsynlig grunnet elektrisk støy fra strømforsyningen. Dermed var det essensielt å ha en komponent til som sjekket at den ønskede hastigheten stemte. Ved hjelp av kameraet som sto vinkelrett ned på den bevegende platen kunne dette utføres. Dette ble gjort ved å måle hvor mange *piksel* per *mm* det var i det ønskede planet (i forsøket var dette $0.495 \frac{\text{mm}}{\text{piksel}}$). Videre var tiden mellom hvert bilde som ble tatt av kameraet kjent. Dermed kunne det programmeres i LabVIEW at kameraet automatisk skulle gjenkjenne den bevegende delen i bildene, se figur 4.11 (grønne firkanten i figurene). Ut ifra dette var både distanse og tid kjent, og dermed kunne hastigheten til den bevegende platen bli beregnet.



Figur 4.11: Hastighetsmåling i LabView.

4.3 Forsøksfisk

For å kunne utføre forsøket, var det behov for usløyd oppdrettslaks i forskjellige størrelser. Siden det ikke var mulig å kjøpe usløyd laks i vanlige butikker, ble laksene brukt i forsøket hentet på Lerøy sitt slakteri på Hitra. Figur 4.12 viser individene nummerert etter stigende vekt.



Figur 4.12: Bilde av laksene som ble brukt til forsøket.

De forespurte fiskene skulle være på 2, 3, 4 og 5 kg. Dette var for å kunne utføre støttriggforsøket med forskjellige størrelse på laksen og sammenligne data mellom disse. Fiskene ble målt og veid, og deretter sammenlignet med de forventende verdiene for

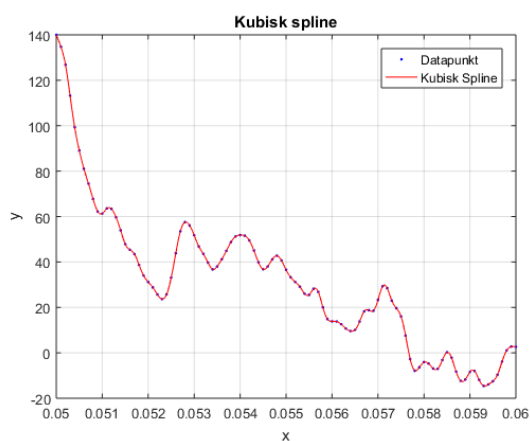
en laks gitt vekt/lengde, se tabell 4.1. Ut ifra de forventende verdiene kan det konkluderes med at forsøksfiskene i dette forsøket var relativt godt representativt utvalg.

| | | Fisk #1 | Fisk #2 | Fisk #3 | Fisk #4 |
|----------------------------------|-----------|---------|---------|---------|---------|
| Vekt og lengde av forsøksfisk | [kg]/[cm] | 2.12/61 | 2.43/65 | 4.01/67 | 4.34/66 |
| Forventet vekt og lengde av laks | [kg]/[cm] | 2.11/55 | 2.43/57 | 4.02/68 | 4.35/70 |

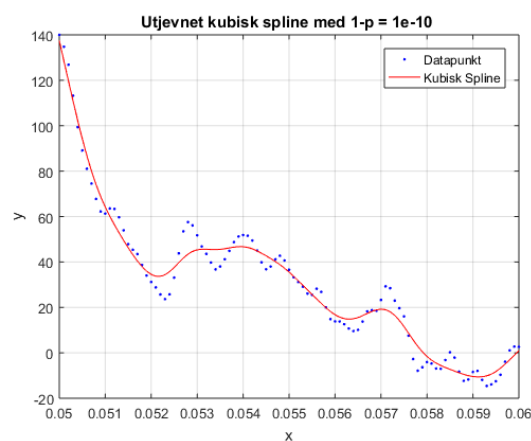
Tabell 4.1: Laksens vekt/lengde samt forventet vekt/lengde.

4.4 Kurvetilpasning

Lastcellen i det fysiske forsøket vil produsere data i form av punkter med *tid* på x-aksen og *Newton* på y-aksen, se figur 5.7. For å kunne jobbe videre med dataen må disse punktene tilpasses en kurve. Metoden brukt for kurvetilpasning i denne oppgaven er ”Utjevnet kubisk spline”. Denne kurvetilpasningsteknikken tar i bruk ideer fra kubiske splines [39] og krumningminimering [40] for å skape et datamodelleringsverktøy for data med mye støy. Tradisjonell kubisk spline-interpolasjon representerer de gitte punktene som en stykkevis kontinuerlig kurve som passerer gjennom alle datapunktene. Intervallet mellom punktene er representert med kubiske polynom, med krav om at endepunktene til polynomene og deres første og andre deriverte er lik i endepunktene. Hvis dataen inneholder mye støy vil ikke resultatet være tilstrekkelig siden kurven går gjennom alle punktene, se figur 4.13. Hvis en utjevnet kubisk spline er tilpasset til de samme datapunktene, vil den generelle trenden av dataene blir fanget opp uten at splinen etterligner støyen, se figur 4.14.



Figur 4.13: Kubisk spline.



Figur 4.14: Utjevnet kubisk spline.

Både kubisk spline og utjevnet kubisk spline er begrenset til å ha sammenhengende første og andre derivater, men bare den kubiske splinen har et krav om gå gjennom alle data-

punkter. Uten disse N -datapunktbegrensningene er det behov for nye ytterligere begrensninger for å ha en fullt bestemt løsning. Når det gjelder den utjevne kubiske splinen, er det følgende to funksjonelle begrensninger: en som minimerer den kvadrerte feilen mellom data og spline, og en som minimerer krumningen [41].

For å minimere den kvadrerte feilen minimeres funksjonen 4.1, der y_i er dataens koordinater, og $g(x)$ er kubiske polynomer.

$$\sum_{i=1}^N (y_i - g(x_i))^2 \quad (4.1)$$

For å minimere krumningen blir funksjon 4.2 minimert. Siden man kun er interessert i størrelsen på krumningen og ikke om krumningen er konveks eller konkav, er krumningen kvadrert og dermed blir de negative verdiene eliminert.

$$\int dx (g''(x_i))^2 \quad (4.2)$$

For de fleste datasett fungerer disse to begrensningsfunksjonene i motsetning til hverandre. Den første begrensningen skyver splinen så nær datapunktene som mulig, mens den andre prøver å holde splinen så fri for krumning som mulig. I den endelige formuleringen blir disse to utjevne begrensningene forbundet med en vektingsparameter p . p balanserer de to motsatte begrensningene og resulterer i en utjevnet kubisk spline.

$$\min_g p \cdot \sum_{i=1}^N (y_i - g(x_i))^2 + (1 - p) \cdot \int dx (g''(x_i))^2 \quad p \in [0, 1] \quad (4.3)$$

Hvis $p = 1$ blir krumningsbegrensningen opphevet og den utjevne kubiske spline passerer deretter gjennom alle datapunktene og resulterer i en interpolasjonsspline. Med andre ord, med $p = 1$ blir det en naturlig kubisk spline-løsning, se figur 4.13. Hvis $p = 0$ er bare krumningen på spline minimert. Dermed minimeres den gjennomsnittlige kvadratfeilen over lineære funksjoner, noe som resulterer i en rett linje. Kurvetilpasningen for dataen fra lastcellen ble utført i Matlab, se vedlegg D.1.

I dette kapitlet har det fysiske forsøket blitt presentert, inklusivt forsøksoppsettet og metodikken som ligger til grunn. Den neste delen av oppgaven vil presentere resultatene fra både det fysiske forsøket og analysen utført i Abaqus.

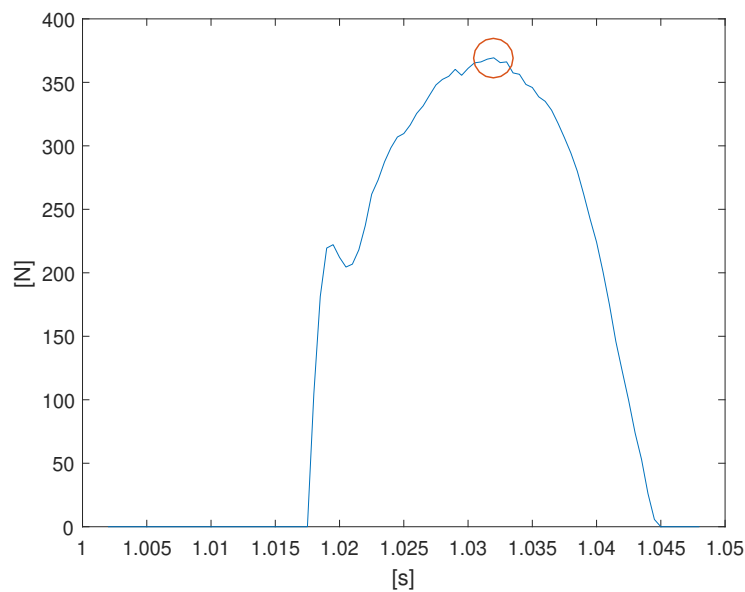
Kapittel 5

Resultater

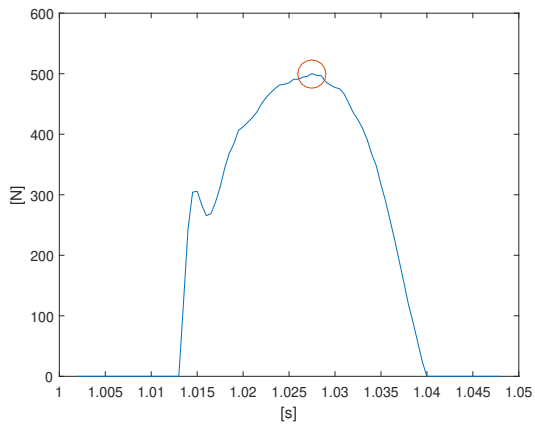
I dette kapitlet blir resultatene fra både analysen av elementmodellen og det fysiske forsøket med laks presentert. Videre blir det også presentert en sammenligning av resultatene fra kontaktkraften i Abaqus og lastcellen.

5.1 Elementmodell av laks

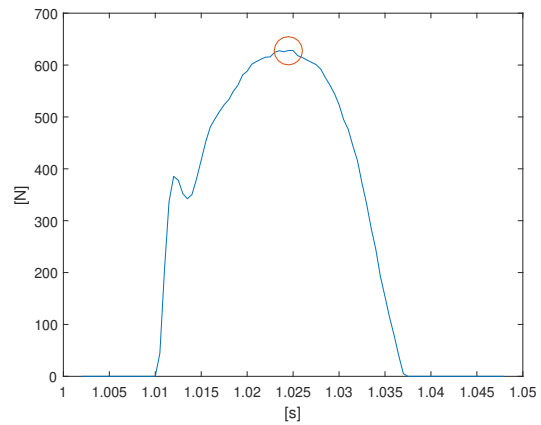
I dette delkapitlet blir resultatene fra analysen utført i Abaqus presentert. Figur 5.1, 5.2 og 5.3 viser resultatene for kontaktkraften mellom elementmodellen og veggen, med hastighetene 1,5, 2 og 2,5 $\frac{m}{s}$. Videre er også toppunktene for hver av grafene markert med en sirkel.



Figur 5.1: Kontaktkraft fra Abaqus. Fiskens hastighet: 1,5 $\frac{m}{s}$.



Figur 5.2: Kontaktkraft fra Abaqus. Fiskens hastighet: $2 \frac{m}{s}$.



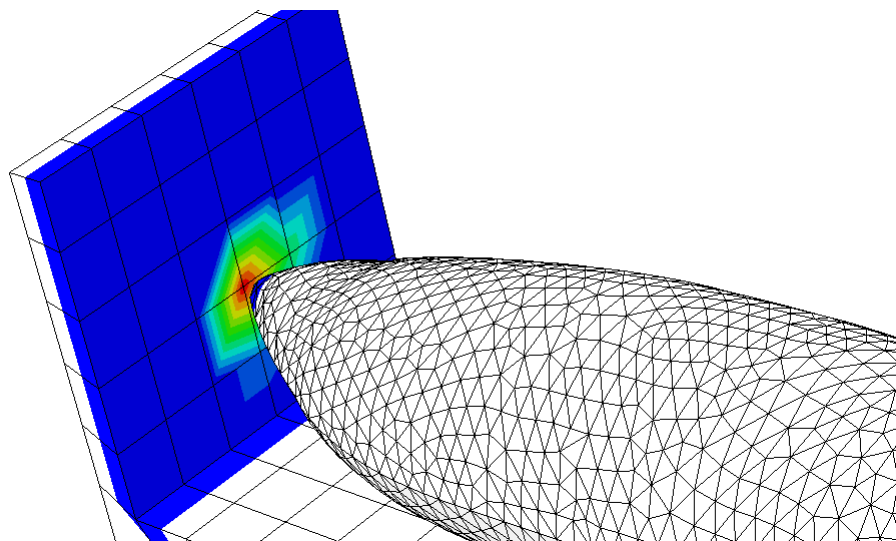
Figur 5.3: Kontaktkraft fra Abaqus. Fiskens hastighet: $2,5 \frac{m}{s}$.

Verdiene for den maksimale kontaktkraften og varigheten av støtet for de tre hastighetene er presentert i tabell 5.1.

| Elementmodell | $1,5 \frac{m}{s}$ | $2 \frac{m}{s}$ | $2,5 \frac{m}{s}$ |
|------------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| Kontaktkraft [N] | 369 | 500 | 629 |
| Varighet [s] | 0,028 | 0,027 | 0,025 |

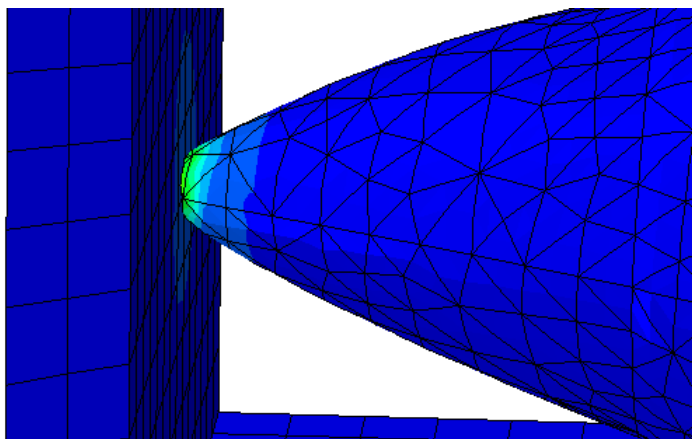
Tabell 5.1: Resultater for maksimal kontaktkraft og varighet av støtet fra analysen i Abaqus.

Figur 5.4 er en illustrasjon av hvor kontaktkraften på platen oppsto. Rødfargen indikerer størst kraft.



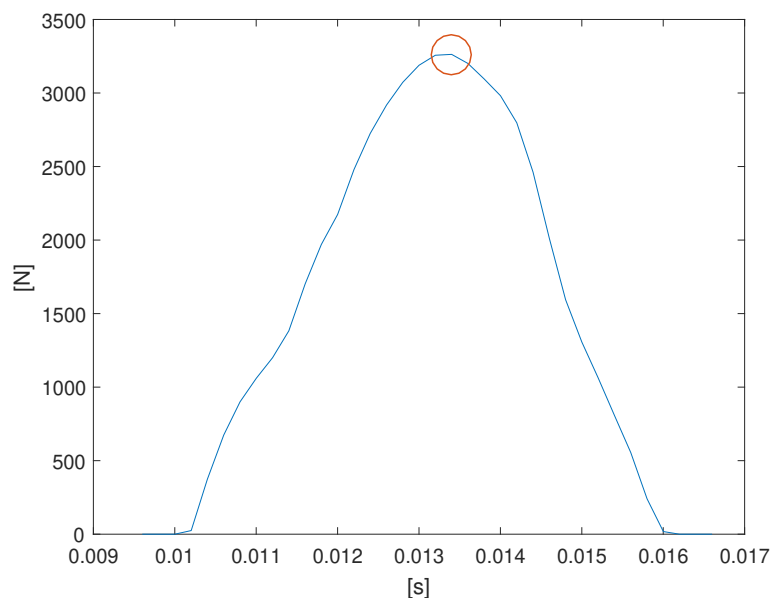
Figur 5.4: Illustrasjon for kontaktkraften fra Abaqus.

Analysen viste også at det oppsto en stor opphoping av spenninger i materialet på snuten av elementmodellen. Dette indikerer at spenningen forplantet seg relativt dårlig gjennom modellen. Denne opphopingen av spenning i snuten er illustrert i figur 5.5. Det grønne område viser høyest konsentrasjon av spenning.



Figur 5.5: Illustrasjon av spenningene i snuten av modellen ved støtet.

Materialeegenskapene som ble valgt i denne analysen (se kapittel 3.2.2) ble kraftig redusert fra det opprinnelig forslaget som ble funnet i litteraturstudien. Ved å bruke de opprinnelige verdiene ble elementmodellen for stiv og hadde svært små deformasjoner. I figur 5.6 er grafen for kontaktkraften med de opprinnelige materialeegenskapene presentert.

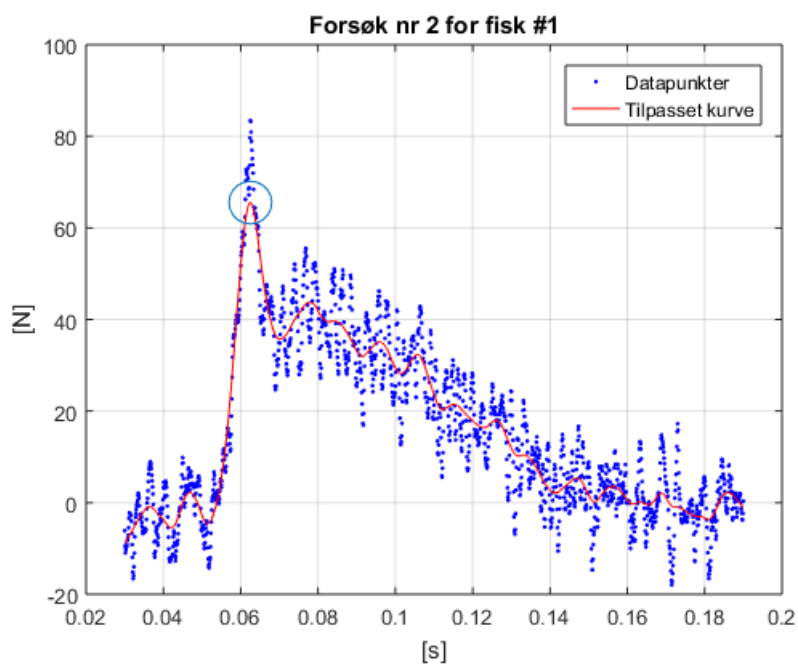


Figur 5.6: Resultater for kontaktkraften med opprinnelige materialeegenskaper.

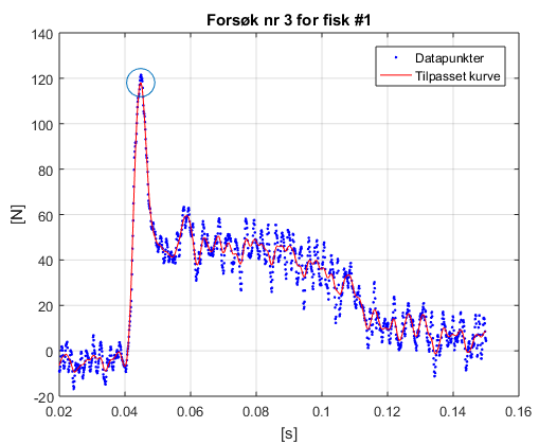
5.2 Fysisk støtforsøk med laks

I dette delkapitlet blir resultatene fra det fysiske støtforsøket med laks presentert. Dette vil innebære resultater fra både lastcellen, men også bildene som ble tatt med høyhastighetskameraene.

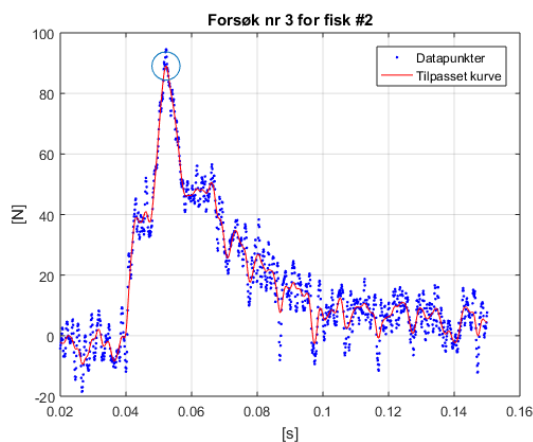
Figurene 5.7 - 5.11 viser et utvalg av resultater fra lastcellen for forskjellige fisk og hastigheter, der de blå punktene representerer datapunkter fra lastcellen og den røde kurven representerer kurvetilpasningen. For flere resultater fra lastcellen se vedlegg B.



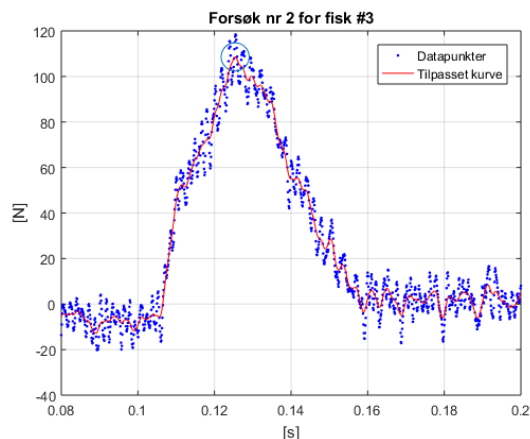
Figur 5.7: Fiskens hastighet: $1,50 \frac{m}{s}$.



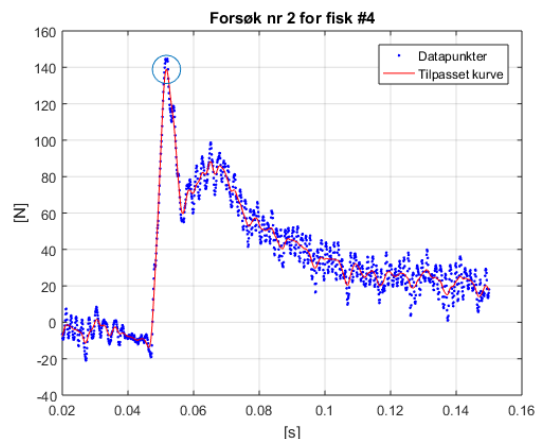
Figur 5.8: Fiskens hastighet: $2,64 \frac{m}{s}$.



Figur 5.9: Fiskens hastighet: $1,62 \frac{m}{s}$.



Figur 5.10: Fiskens hastighet: $1,45 \frac{m}{s}$.



Figur 5.11: Fiskens hastighet: $1,58 \frac{m}{s}$.

Toppunktene fra resultatene fra lastcellen for hver fisk og de tilsvarende hastighetene er presentert i tabellene 5.2 - 5.5. Merk at grunnet uklare målinger er ikke resultatene for fisk #4 med hastighet $2,5 \frac{m}{s}$ presentert.

| Fisk #1 | $1,5 \frac{m}{s}$ | $2 \frac{m}{s}$ | $2,5 \frac{m}{s}$ |
|--------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| Forsøk 1 [N] | 43 | 96 | 151 |
| Forsøk 2 [N] | 75 | 110 | 120 |
| Forsøk 3 [N] | 68 | 116 | 118 |

Tabell 5.2: Resultater for støtforsøket for fisk 1.

| Fisk #2 | $1,5 \frac{m}{s}$ | $2 \frac{m}{s}$ | $2,5 \frac{m}{s}$ |
|--------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| Forsøk 1 [N] | 69 | 131 | 205 |
| Forsøk 2 [N] | 87 | 157 | 195 |
| Forsøk 3 [N] | 89 | 170 | 227 |

Tabell 5.3: Resultater for støtforsøket for fisk 2.

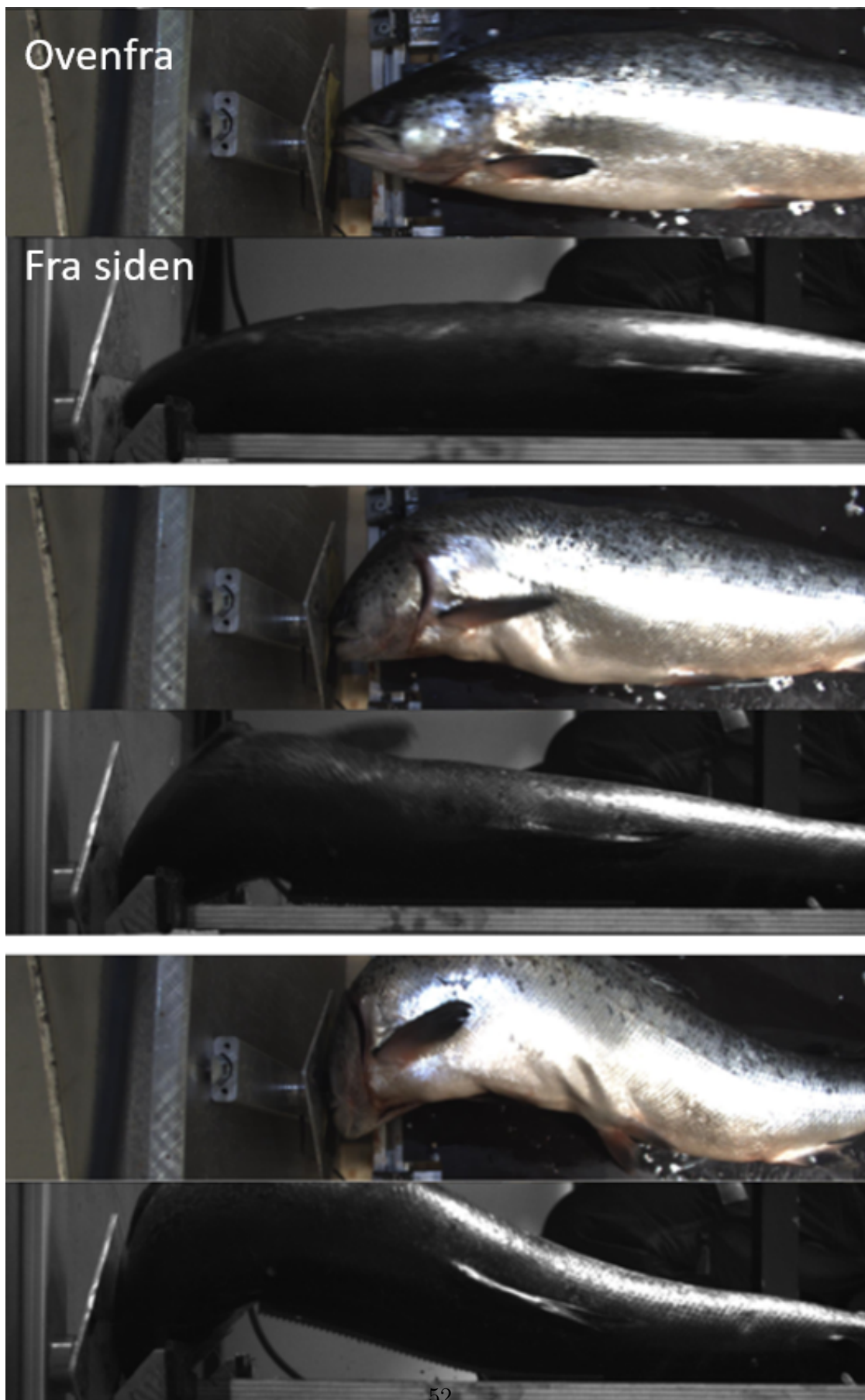
| Fisk #3 | $1,5 \frac{m}{s}$ | $2 \frac{m}{s}$ | $2,5 \frac{m}{s}$ |
|--------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| Forsøk 1 [N] | 110 | 249 | 306 |
| Forsøk 2 [N] | 105 | 216 | 283 |
| Forsøk 3 [N] | 108 | 196 | 288 |

Tabell 5.4: Resultater for støtforsøket for fisk 3.

| Fisk #4 | $1,5 \frac{m}{s}$ | $2 \frac{m}{s}$ | $2,5 \frac{m}{s}$ |
|--------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| Forsøk 1 [N] | 120 | 162 | - |
| Forsøk 2 [N] | 138 | 151 | - |
| Forsøk 3 [N] | 141 | 165 | - |

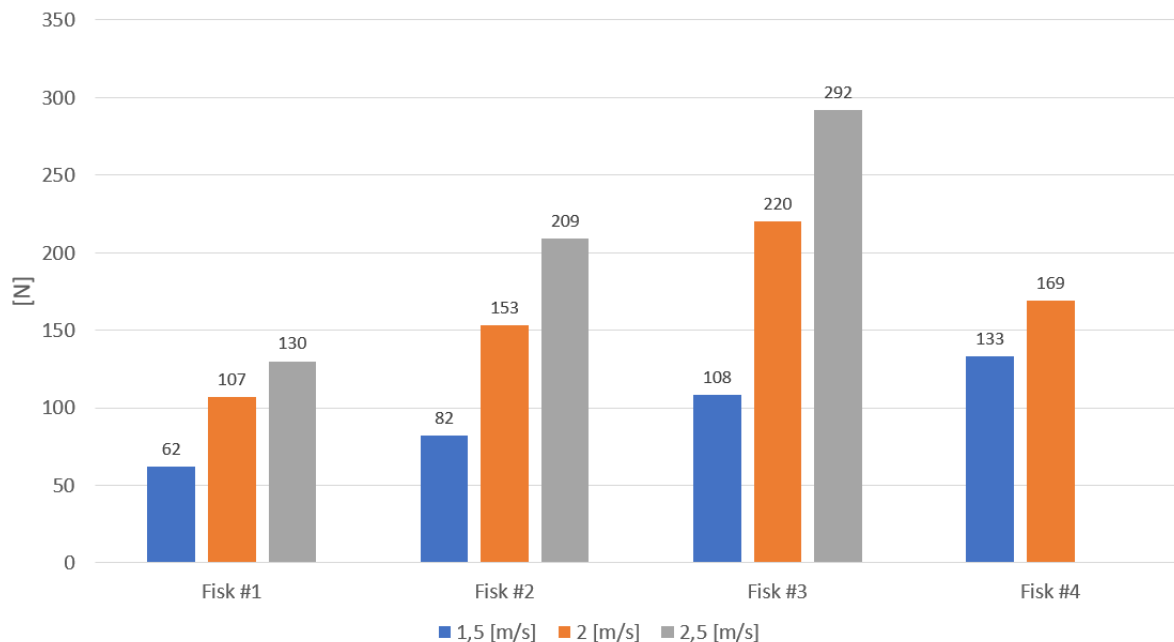
Tabell 5.5: Resultater for støtforsøket for fisk 4.

Bildene fra høyhastighetskameraet for fisk #2 med hastigheten $2,5 \frac{m}{s}$ er presentert i figur 5.12. Videre er også et utvalg av bilder for hver fisk presentert i vedlegg C.



Figur 5.12: Bilde fra høyhastighetskamera som viser støtet av laks #2 med $2,5 \frac{m}{s}$. Bilde 1 $t = 0 \text{ ms}$ etter støtet, Bilde 2 $t = 42 \text{ ms}$, Bilde 3 $t = 52,5 \text{ ms}$.

Ut ifra resultatene fra lastcellen ble det også beregnet både middelerdi og standardavvik, se figur 5.13 og tabell 5.6. Det er viktig å påpeke at disse verdiene er basert på tre resultatverdier.

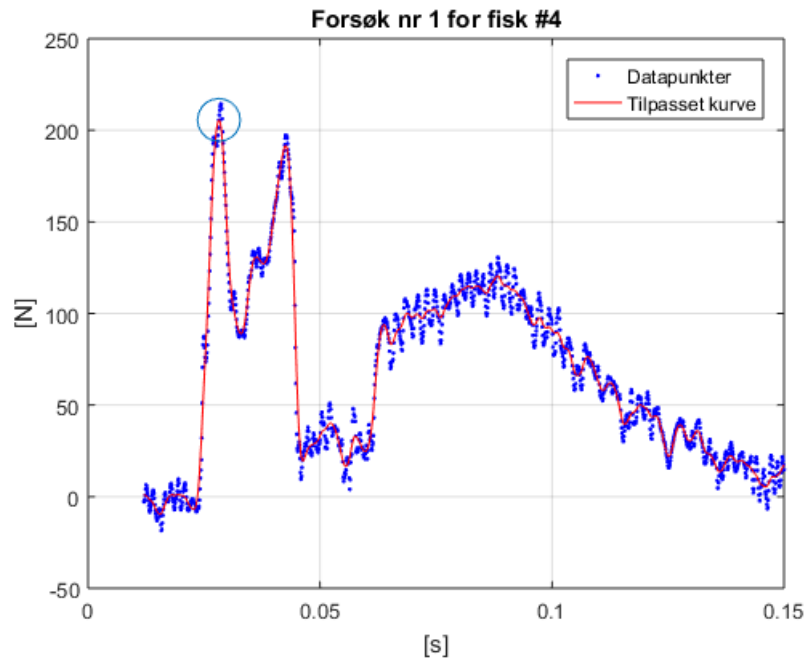


Figur 5.13: Middelerdi av resultatene fra lastcellen.

| | Fisk #1 | Fisk #2 | Fisk #3 | Fisk #4 |
|-------------------|---------|---------|---------|---------|
| 1,5 $\frac{m}{s}$ | 16,8 | 11 | 2,5 | 11,6 |
| 2 $\frac{m}{s}$ | 10,7 | 19,8 | 26,8 | 7,4 |
| 2,5 $\frac{m}{s}$ | 18,5 | 16,4 | 12,1 | - |

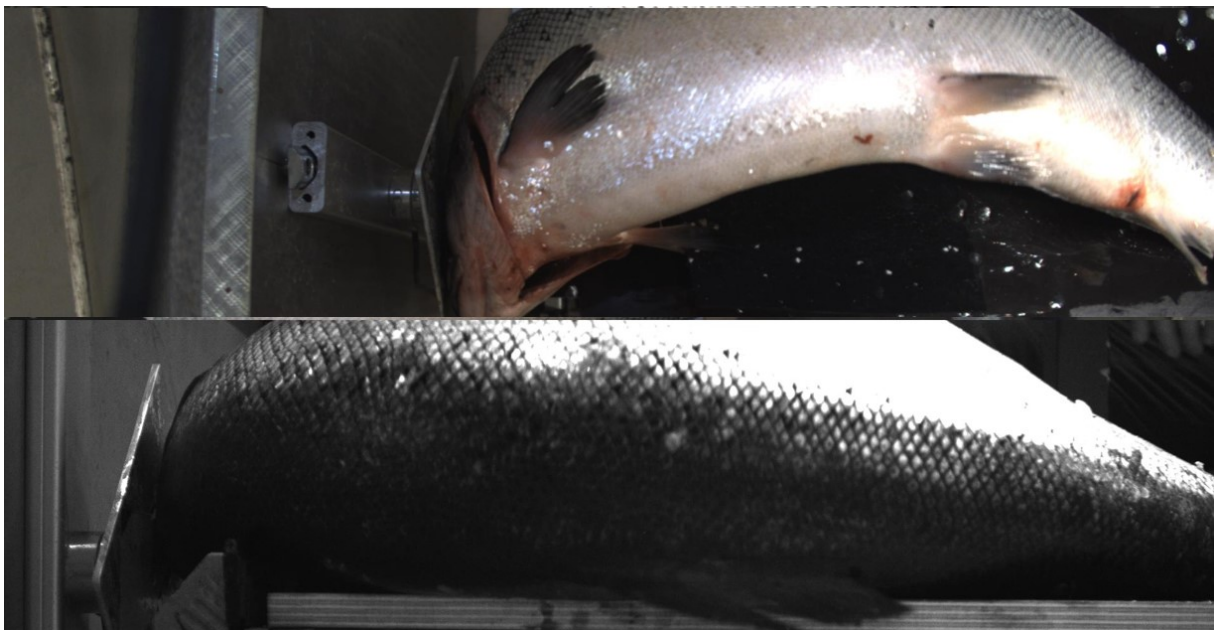
Tabell 5.6: Standardavvik av resultatene fra lastcellen.

Når forsøkene ble utført viste det seg at støttriggen ikke var dimensjonert for fisk over 4.2 kg med en hastighet på 2,5 $\frac{m}{s}$. Det oppsto både vridninger på fisken, og fisken sklei av platen under støtet. Dette resulterte i uklare resultater fra lastcellen, se figur 5.14.



Figur 5.14: Uklar måling grunnet vridninger på fisken. Fiskens hastighet: $2,65 \frac{m}{s}$.

Denne vridningen er illustrert i figur 5.15 ved hjelp av bildene fra høyhastighetskameraene.

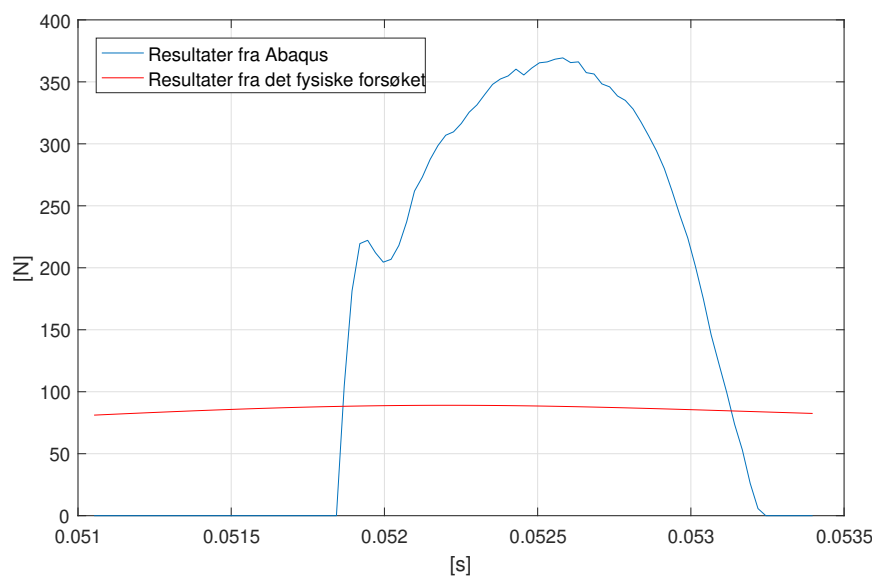


Figur 5.15: Bilder fra kamera som viser vridningen som oppstår med fisk #4 og $2,5 \frac{m}{s}$.

5.3 Sammenligning av resultater

For å kunne sammenligne resultatene fra analysen og det fysiske forsøket, må størrelsen og vekten til elementmodellen være relativt nær den ekte fisken. Dermed er sammenligningen av resultatene basert på fisk #2 som veier 2,43 kg og er 65 cm lang og elementmodellen som er 2,45 kg og 55 cm lang.

I figur 5.16 er resultatene for kontaktkraften fra Abaqus og det fysiske forsøket (fisk #2, 1,64 $\frac{m}{s}$) presentert. Merk at på grunn av at varigheten til støtet i Abaqus er kortere enn i det fysiske forsøket, blir kurven fra lastcellen tilnærmet en rett linje.



Figur 5.16: Sammenligning av resultater fra Abaqus (1,5 $\frac{m}{s}$) og det fysiske forsøket med fisk #2 (1,64 $\frac{m}{s}$).

Resultatene for fisk #2 og analysen av elementmodellen, sammen med et prosentvis avvik mellom disse er presentert i tabell 5.7.

| | 1,5 $\frac{m}{s}$ | 2 $\frac{m}{s}$ | 2,5 $\frac{m}{s}$ |
|---------------------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| Elementmodell [N] | 369 | 500 | 629 |
| Fysisk forsøk fisk #2 [N] | 82 | 153 | 209 |
| Avvik elementmodell [%] | 450 | 326 | 301 |

Tabell 5.7: Avvik i % mellom analysen med elementmodellen og det fysiske forsøket med fisk #2.

Kapittel 6

Diskusjon og konklusjon

I dette kapitlet diskuteres analysen (kapittel 6.2) og det fysiske forsøket (kapittel 6.3). I tillegg vil også utviklingen av en objektiv metode for dokumentasjon av fiskehelse og -velferd under håndteringoperasjoner bli diskutert. Feilkildene og usikkerhetsmomentene assosiert med dette blir gjennomgått i kapittel 6.4. Avslutningsvis vil det bli presentert en oppsummerende konklusjon (kapittel 6.5). Mulig videre arbeid blir foreslått i kapittel 6.6.

6.1 Generelle betraktninger

En objektiv metode for dokumentasjon av effekter på fiskehelse og -velferd er en relativ kompleks oppgave å løse siden den må ta hensyn til flere faktorer enn bare støt alene. Laks er en robust fisk som tåler mye, men problemene oppstår når den blir utsatt for flere ikke-optimale situasjoner. For å gi et eksempel på dette: en laks blir stresset på grunn av en trengingoperasjon, videre blir den avlust der den opplever flere støt og til slutt går tilbake til en merde med dårlig oksygentilførsel. Hver av disse faktorene er ikke nødvendigvis skadelig eller dødelig for fisken. Dersom derimot alle disse suboptimale hendelsene forekommer i løpet av et kort tidsrom, kan dette føre til dårlig velferd og i verste fall død. Det kan dermed argumenteres for et støt i seg selv ikke vil være direkte skadelig for fisken, men kombinasjonen av flere faktorer kan være det. Det er langt ifra nok å kun se på kreftene laksen opplever ved avlusning, sett i sammenheng med et mer helhetlig bilde av fiskevelferden. For å danne seg et helhetlig bilde, og virkeliggjøre en metode for dokumentering av fiskevelferd, må flere faktorer tas i betrakning. Støt er likvel en faktor blant flere som må kartlegges, og dermed en start på veien til en mer helhetlig metode.

Både analysen i Abaqus og det fysiske støtforsøket var satt opp til å utføre et støt mot

en 90° vegg. Dette var idealisert og relativt lite realistisk med tanke på de rørsystemene som blir brukt i dagens havbruksnæring. Videre kan det antas at en laks vil prøve å styre unna rørveggen dersom det er mulig. Det kan dermed være mer hensiktsmessig å utføre en studie på et støt med en vinkel på for eksempel 0-45°. Det vil dog være vanskelig å utføre et repeterbart forsøk på denne måten. Forsøket med 90° er likevel en start og gir en bedre forståelse på hvordan kreftene i en støtsituasjon påvirker en laks. Med tanke på hvor tidlig i forskningsstadiet man er på dette område, er dermed dette 90°-støtet et startpunkt som eventuelt kan forskes på og videreutvikles.

Når de forskjellige avlusningssystemene pumper fisk gjennom rørsystemet, pumpes det også store mengder vann. Analysen i Abaqus og støtforsøket foregikk ikke i vann, og det vil være vanskelig å si hvor stor innvirkning vannet ville ha hatt på støtanalysen. Å inkludere vann i det fysiske forsøket ville ha vært krevende, men dersom en god elementmodell blir utarbeidet kan det inkluderes vann i støtanalysen i Abaqus. Det vil være rimelig å tro at vann vil ha en dempende effekt på støtet.

6.2 Elementmodell av laks

Ut fra analysen ble kontaktkraften mellom snuten til modellen og veggen hentet ut. Figurene 5.1, 5.2 og 5.3 viser at selve formen på kurven ikke endret seg mye med de forskjellige hastighetene. Videre viser figurene at kort tid etter at støtet inntreffer, økte ikke kontaktkraften. Derimot sank den i et kort tidsintervall (figur 5.1 ved $t = 1.02$). Ved å se på animasjonen av støtet i Abaqus kan dette forklares med at det oppsto en bølgeforplantning i den elastiske delen av modellen (muskler) under støtet. Dette førte til at kraften ble redusert i et kort tidsintervall. Det samme fenomenet kan observeres nært toppunktet av grafen ($t = 1.03$). Videre viser også disse resultatene at varigheten av støtet var relativt kort. Ut ifra animasjonen i Abaqus ser man at det oppstår lite deformasjoner på selve modellen. Deformasjoner og spenningene oppsto hovedsaklig i snuten, se figur 5.5. Dette førte til at modellen spratt rett tilbake fra veggen med lite demping og deformasjoner, noe som også forklarer hvorfor varigheten av støtet var relativt kort, se tabell 5.1.

Måten fisken ble modellert på ga modellen et relativt stort volum. Et slikt volum resulterte automatisk i en større stivhet, og det oppførte seg ikke som en fysisk fisk i en støtanalyse. Dette store volumet inneholdt dermed ikke komponenter av fisken som forflytter seg mellom hverandre uten å danne skjærspenninger. Kontaktkraften var relativt stor i forhold til det fysiske forsøket, se figur 5.6. Dette er også en av grunnene til materialeegenskapene brukt i modellering måtte settes betraktelig ned fra det som har blitt funnet i litteraturstudien.

Videre er det også relevant å nevne at modellering av muskler kan være utfordrende

på grunn av spente/ikke spente muskler. Verdiene som ble funnet i litteraturstudien var for ikke spente muskler, noe som også passet med det fysiske forsøket. Det kan derimot diskuteres om dette også vil stemme ved en avlusningsoperasjon. Mest sannsynlig vil musklene til laksen være spent dersom den treffer en vegg uavhengig av hvilken vinkel det er. I denne oppgaven vil antagelsen om ta i bruk materialegenskaper for ikke spente muskler stemme nokså godt, men det er viktig å ha kjennskap til at dette ikke vil stemme i en avlusnings situasjon.

Ut ifra analysene av elementmodellen viste det seg at det var krevende å se på en biologisk respons av et støt. For å kunne simulere et støt godt, må det tas mange faktorer i betraking, spesielt dersom det er interne responser som skal undersøkes. For å oppnå gode resultater må modelleringen ha et mye høyere detaljnivå enn hva denne oppgaven har presentert. Videre må materialegenskapene til hver enkel del være mer nøyaktig, og samspillet mellom de forskjellige delene i modellen må være god. Dette er ingen enkel oppgave siden det nærmest ikke har blitt forsket på dette område når det kommer til laks. Som tidligere nevnt, har analyser ved hjelp av elementmetoden blitt utført på mennesker når det gjelder støtsimuleringer i bilindustrien, men også for skadeforebygging med tanke på sykkel-/motorsykkelhjelmer. En slik analyse er dermed fullt mulig å utføre, men krever bedre kjennskap til materialegenskaper for laksen, samt mer kunnskap om samspillet mellom laksens deler i modelleringssammenheng.

6.3 Fysisk støtforsøk med laks

Dataen produsert fra lastcellen i støtforsøket var ikke alltid gode. Figurene 5.7 - 5.11 viser at formen på den tilpassende kurven varierte. Eksempelvis ser vi i figur 5.8 at stigningstallet på grafen i det støtet inntreffer er en god del høyere enn hva den er i figur 5.10. Det er utfordrende å finne årsaken til dette, men en mulig forklaring er at fisken ikke traff midtpunktet på lastcellen. Ut fra bildene var dette relativt vanskelig å tyde. Etter at forsøkene ble kjørt flere ganger ble det imidlertid klart at det var viktig at fisken treffer lastcellen midt på, ellers ble resultatene raskt uklare.

Kurvetilpasningen brukt i denne oppgaven viste seg å fungere nokså godt. Den fanget opp trendene i dataen selv om den inneholdt mye støy. Et fåtall av gangene var allikevel ikke kurvetilpasningen tilstrekkelig nok, se figur 5.7. Verdien av toppunktet på grafen kunne nok ha vært litt høyere hvis datapunktene ble tatt i betrakning. Dette kunne ha blitt løst med å øke nøyaktigheten på kurvetilpasningen ved hjelp av faktoren p som ble presentert i kapittel 4.4. Dette ville ha ført til at det hadde blitt tatt med mer støy i kurvetilpasningen, noe som ikke er ønskelig. Dermed vil kurvetilpasningen i dette tilfelle skape et vist avvik, men anses fortsatt å være på et akseptabelt nivå.

Bildene hentet fra kamerane fungerte som hjelpemidler for å forstå støtmeknikken hos laksen. Bildene presentert i denne oppgaven (figur 5.12 og vedlegg C) viser at ved den laveste hastigheten oppstår det små deformasjoner på fisken, mens høyre deformasjoner oppstår ved høyre fart, noe som er relativt intuitivt. Det som var interessant å observere var hvor mye fleksjon og ekstensjon som oppstår i fiskens ryggrad. Det kan antas at det fort kan oppstå skader i dette område, selv om dette er en antagelse som ikke kan bli bekreftet uten bruk av levende laks.

Middelverdiene og standardavviket av toppunktene fra resultatene som er presentert i figur 5.13, var bare basert på tre verdier for hver fisk for hver hastighet. Dette var et lite grunnlag for en nøyaktig middelværdi og standardavvik, og det burde ha blitt kjørt flere forsøk for å oppnå en middelværdi og standardavvik som er mer nøyaktig. Grunnen til at flere forsøk ikke ble utført, var at det oppsto skader hos laksen for hvert støt som den ble utsatt for. Siden det bare var fire fisk tilgjengelig kunne det ikke kjøres flere forsøk uten at resultatene ble uklare grunnet skader fra forgående forsøk. Likevel vises trendene nokså godt: jo større farten og størrelsen på fisken blir, jo større blir også kraften på lastcellen med unntak av fisk #4 med $2 \frac{m}{s}$.

Etter at noen forsøk hadde blitt kjørt ble det klart at støttriggen ikke er dimensjonert for fisk over 4,2 kg. Når fisk #4 ble kjørt med både 2 og $2,5 \frac{m}{s}$ oppsto det så store vridninger på fisken at den kunne skli av platen i støtet, spesielt ved $2,5 \frac{m}{s}$. Dette førte til uklare målinger, se figur 5.15. Dette er også grunnen til at resultatene for fisk #4 for $2,5 \frac{m}{s}$ ikke er tatt med og for at $2 \frac{m}{s}$ er lavere enn for fisk #3. For å kunne gjøre slike forsøk med fisk som er større, må støttriggen bli designet anderledes slik at disse vridningene ikke oppstår.

For å kunne validere elementmodellen mot det fysiske forsøket, ble kontaktkraften fra Abaqus og resultatene fra lastcellen for fisk #2 sammenlignet. Optimalt sett kunne også bildene fra kamerane og animasjonen fra Abaqus bli sammenlignet, men siden modellen i liten grad etterligner deformasjonene fra laksen i det fysiske forsøket kunne ikke dette utføres. Støtet utført i Abaqus hadde en mye lavere varighet enn støtet utførte i det fysiske forsøket, se figur 5.16. Dette skyldes flere grunner, men hovedsaklig at det oppsto mye større deformasjoner på fisken ved det fysiske forsøket enn hva det gjorde med modellen i analysen. Videre var det også store avvik på toppunktene til kontaktkraften fra Abaqus og det fysiske forsøket, se tabell 5.7. Dette viser igjen at modellen ikke er tilstrekkelig og ikke har gode nok materialeegenskaper til å kunne bli validert opp mot det fysiske støtforsøket. Dermed er det fortsatt en lang vei å gå før denne modellen kan bli brukt til en objektiv vurdering av effekter på fiskehelse og -velferd i rørsystem. Det positive er at denne modellen har et stort potensial, men den krever bedre modellering.

6.4 Feilkilder og usikkerhet

Det er flere feilkilder og usikkerhetsmomenter som er viktig å belyse, og disse vil bli presentert i dette delkapitlet.

Det er viktig å ta i betrakning at litteraturstudien kan inneholde en vis grad av feiltolking. Dette omhandler hovedsaklig materialeegenskapene som har blitt brukt i modelleringsdelen av oppgaven. Det skal riktignok sies at siden modellen ble såpass forenklet, og verdiene for materialeegenskapene måtte bli redusert, ville det ha blitt vanskelig å finne materialeegenskaper som skulle ha passet bedre, akkurat på grunn av disse forenklingene.

Lastcellen som har blitt brukt i det fysiske forsøket krevde at støtet fra laksen traff tilnærmet midt på. Dette er vanskelig å alltid skulle oppfylle. Lastcellen skal kompensere for dette med flere innebydde strekkklapper, men under forsøkene ble det lagt merke til at dersom laksen ikke traff godt nok ble resultatene uklare. Videre var lastcellen beregnet for å måle laster opptil 5000 *Newton*. Når denne da opererte på noen få hundre er det naturlig at det blir en del støy fordi signalet var svært forsterket. Det er også naturlig at det ble vibrasjoner på sensoren etter støtet siden det er litt spenst i aluminiumsplaten som sitter på sensoren, og denne kan stå og svinge litt etter treff.

Et annet usikkerhetsmoment omhandler forandringen av de mekaniske egenskapene til laks etter at den har blitt fryst og deretter tint opp igjen. Etter at laksen ble hentet hos slakteriet, ble den fryst ned, før den etter noen dager ble tint opp igjen og brukt i forsøk. Det er vanskelig å kunne si noe om dette hadde en innvirkning på de mekaniske egenskapene og dermed også kunne ha påvirket resultatene.

Hastighetsmåling ved hjelp av kamera ble utført på den bevegende platen og ikke på fisken. Slik fisken var plassert, skled den inn i lastcellen etter at den bevegende platen stanset. Avstanden som fisken sklidde var på rundt 10 *cm*. I dette tidsrommet før laksen traff lastcellen og platen stoppet opp, forekom det en hastighetsreduksjon. Dersom hastigheten hadde blitt målt på snuten av fisken kunne dette ha blitt unngått.

6.5 Konklusjon

Denne masteroppgaven presenterer et mulig startpunkt for en objektiv metode for dokumentasjon av hvilke effekter håndtering av fisk har på fiskehelse og -velferd. Metoden kan potensielt brukes under f.eks. konstruksjon av medikamentfrie avlusningsenheter eller hånderingsmetoder for oppdrettslaks.

Bruken av elementmetoden for å undersøke støtskader hos laks har i liten til ingen grad blitt forsket på tidligere. Denne tilnærmingen til problemstillingen har blitt utført med tanke på skader hos mennesker, dermed er det realistisk å si at dette også kan gi gode resultater hos laks. En elementmodell av en laks kan være med på å øke fiskevelferden til oppdrettslaks. Denne elementmodellen kan bli brukt tidlig i designfasen av utstyrleverandører til oppdrettsnæringen for å kunne kartlegge hvilken krefter laksen blir utsatt for. Dermed kan det i mye større grad unngås å utføre dyreforsøk med prototyper av systemene.

Elementmodellen og analysen som har blitt utarbeidet i denne oppgaven etterligner dessverre det fysiske støtet i liten grad. For å kunne løse oppgaven ble det foretatt mange idealiseringer som har påvirket resultatene. Det kreves både bedre materialeegenskaper/-parametere og utforming på et høyere detaljnivå for å kunne modellere et slikt støt på en bedre måte. Det er likevel et steg mot en objektiv metode som med videre utforming har et stort potensial.

6.6 Videre arbeid

Denne oppgaven presenterer et startpunkt for å utarbeide en metode for å etablere en objektiv metode for dokumentasjon av effekter på fiskehelse og -velferd. Dette tilsier at det er mange aspekt som må jobbes videre med for å kunne komme frem til en velfungerende og validert metode. I dette delkapitlet vil det bli presentert og diskutert noen av disse punktene.

Elementmodell

Elementmodellen krever et mye større detaljnivå for å kunne fungere godt. Dette innebærer at både geometrien til laksen, spesielt innvendig og materialeegenskapene, må modelleres bedre. Det første steget kan være å modellere rygggraden slik at den bare har en stivhet i aksial retning. Dette for at det lettere kan oppstå deformasjoner på modellen slik det gjorde i det fysiske forsøket. For å finne bedre materialeegenskaper så må det gjøres egne forsøk på å finne materialparameterne til biologisk materiale.

Etter at både geometrien er forbedret og nye materialeegenskaper har blitt funnet, kan det utføres en parameterstudie. Sammen med et fysisk forsøk kan dette forbedre materialparameterne i enda større grad. Dette vil føre til at mer enn bare kontaktkraften kan tas ut av modellen, blant annet akselerasjon, krefter og tøyninger på forskjellige deler av modellen.

Skalering av modellen vil også være et viktig punkt i det videre arbeidet. For å kunne validere modellen mot de fysiske forsøkene burde det lages flere modeller for forskjellige fiskestørrelser. På denne måten kan modellen bli tatt i bruk uansett hvilken størrelse av laks som skal gjennom et eventuelt rørsystem.

Fysiske støtforsøket

Støttriggen har et potensiale til forbedring både når det gjelder størrelse på fisk og vinkling av lastcellen. Det vil være viktig å kunne utføre forsøk på fisk som er større enn 4,2 kg slik at disse kan sammenlignes med elementmodellen. Dette kan utføres ved å designe støttriggen med en større bevegende plate slik at fisken ikke sklir av selv om det oppstår vridninger. Videre bør det gjøres forsøk hvor lastcellen står i vinkel. Dersom oppsettet designes slik at forsøket kan bli repeterbart, kan det på denne måten etableres eventuelle tålegrenser på hva som vil være en kritisk vinkel. Ved å finne en verdi på denne vinkelen, vil det være mye større klarhet i hvordan eventuelle fremtidige avlusnings-/rørsystem kan designes.

Bibliografi

- [1] Lovdata. Lov om dyrevelferd. <https://lovdata.no/dokument/NL/lov/2009-06-19-97>, 2009. (Avlest: 26.04.2021).
- [2] Eirik Svendsen Magnus O. Pedersen Merete Bjørgan Schrøder Maria N. Kristensen Leif Magne Sunde Sveinung J. Ohrem Walter Caharija, Birger Venås. Verktøy for kartlegging av forhold i enheter for føring, håndtering og behandling av laks (sensorfisk). 2019.
- [3] Nielsen K. Tørud B. Mejdell C. Gismervik K., Gåsnes S. Fiskehelse rapporten 2020. (1):184, 2020.
- [4] FHF. Teknologiske verktøy for objektiv dokumentasjon av velferd hos laksefisk ved håndteringsoperasjoner. <https://www.fhf.no/prosjekter/prosjektbasen/901594/>, 2020. (Avlest: 27.04.2021).
- [5] Scale AQ. Thermolicer. <https://scaleaq.no/produkt/thermolicer/>, 2021. (Avlest: 27.04.2021).
- [6] FLS. Fls caligus. <https://www.flis.no/produkter/flis-caligus-avluser>, 2021. (Avlest: 28.04.2021).
- [7] Astrid Buran Holan, Bjørn Roth, Mette Serine Wesmajervi Breiland, Jelena Kolarevic, Øyvind J Hansen, Audun Iversen, Øystein Hermansen, Bjarne Gjerde, Bjarne Hatlen, Atle Mortensen, et al. Beste praksis for medikamentfrie metoder for lakseluskontroll (medfri)-faglig sluttrapport. *Nofima rapportserie*, 2017.
- [8] Lovdata. Forskrift om drift av akvakulturanlegg (akvakulturdriftsforskriften). https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2008-06-17-822#KAPITTEL_3, 2008. (Avlest: 28.04.2021).
- [9] Harald Kryvi. *Fiskeanatomi*. Høyskoleforl., 1997.

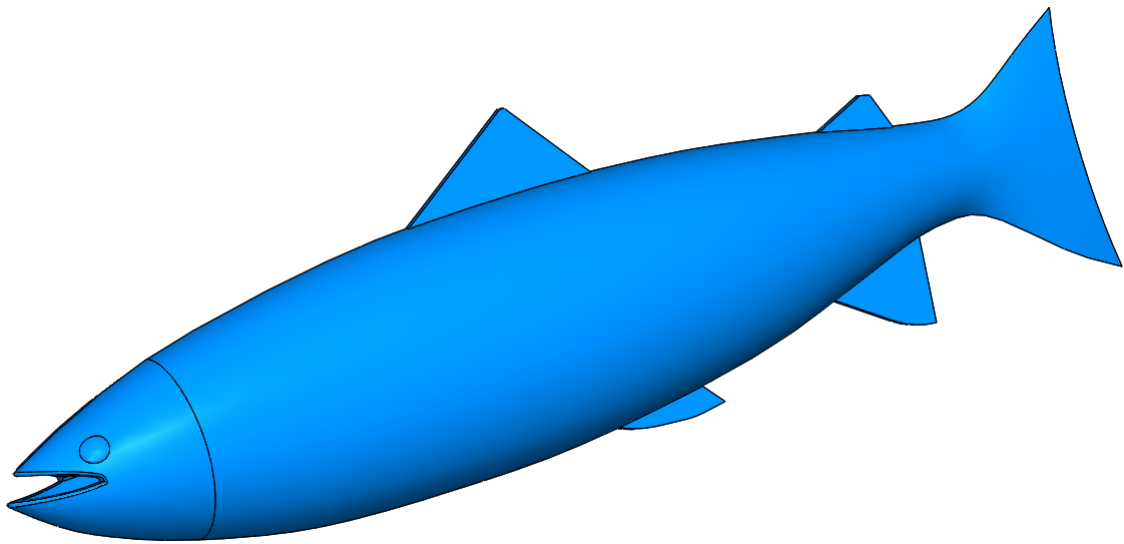
- [10] Rebecca L Kihlslinger and Gabrielle A Nevitt. Early rearing environment impacts cerebellar growth in juvenile salmon. *Journal of Experimental Biology*, 209(3):504–509, 2006.
- [11] King H Yang, Haojie Mao, Christina Wagner, Feng Zhu, Clifford C Chou, and Albert I King. Modeling of the brain for injury prevention. In *Neural tissue biomechanics*, pages 69–120. Springer, 2011.
- [12] Albert I King and Michele J Grimm. Herbert r. lissner: The father of impact biomechanics. *Journal of Biomechanical Engineering*, 142(3), 2020.
- [13] Daniel Marjoux, Daniel Baumgartner, Caroline Deck, and Rémy Willinger. Head injury prediction capability of the hic, hip, simon and ulp criteria. *Accident Analysis & Prevention*, 40(3):1135–1148, 2008.
- [14] Haojie Mao, Liying Zhang, King H Yang, and Albert I King. Application of a finite element model of the brain to study traumatic brain injury mechanisms in the rat. Technical report, SAE Technical Paper, 2006.
- [15] Barclay Morrison III, Benjamin S Elkin, Jean-Pierre Dollé, and Martin L Yarmush. In vitro models of traumatic brain injury. *Annual review of biomedical engineering*, 13:91–126, 2011.
- [16] Heather L Cater, Lars E Sundstrom, and Barclay Morrison III. Temporal development of hippocampal cell death is dependent on tissue strain but not strain rate. *Journal of biomechanics*, 39(15):2810–2818, 2006.
- [17] King-Hay Yang. *Basic finite element method as applied to injury biomechanics*. Academic Press, 2017.
- [18] Fiona Khor, Duane S Cronin, Brock Watson, Donata Gierczycka, and Skye Malcolm. Importance of asymmetry and anisotropy in predicting cortical bone response and fracture using human body model femur in three-point bending and axial rotation. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 87:213–229, 2018.
- [19] Joonas Sorvari and Jari Hämäläinen. Time integration in linear viscoelasticity—a comparative study. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 14(3):307–328, 2010.
- [20] Feng Zhu, Xin Jin, Fengjiao Guan, Liying Zhang, Haojie Mao, King H Yang, and Albert I King. Identifying the properties of ultra-soft materials using a new methodology of combined specimen-specific finite element model and optimization techniques. *Materials & Design*, 31(10):4704–4712, 2010.

- [21] Singiresu S Rao. *The finite element method in engineering*. Butterworth-heinemann, 2017.
- [22] Abaqus. Comparison of implicit and explicit procedures. <https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEGSARefMap/simagsa-m-AbsCompareImpvexp-sb.htm>, 2021. (Avlest: 18.05.2021).
- [23] Mattilsynet. Forsoksdyr. https://www.mattilsynet.no/dyr_og_dyrehold/dyrevelferd/forsoksdyr/, 2012. (Avlest: 30.04.2021).
- [24] Lynne U Sneddon. Pain in aquatic animals. *Journal of Experimental Biology*, 218(7):967–976, 2015.
- [25] SCANDLAS. Defenition. <http://www.scandlas.org/?page.id=151>, 2020. (Avlest:30.04.2021).
- [26] EUR-Lex. The protection of animals used for scientific purposes. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32010L0063>, 2010. (Avlest: 03.05.2021).
- [27] Lovdata. Forskrift om bruk av dyr i forsok. <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2015-06-18-761>, 2015. (Avlest: 30.10.2020).
- [28] EUR-Lex. Norge brukte flest forsøksdyr av alle land i europa. <https://dyrevern.no/dyreforsok/norge-brukte-flest-forsoksdyr-av-alle-land-i-europa/>, 2018. (Avlest: 03.05.2021).
- [29] Chris Noble, Jonatan Nilsson, Lars Helge Stien, Martin Haugmo Iversen, Jelena Kolarevic, and Kristine Gismervik. Velferdsindikatorer for oppdrettslaks: Hvordan vurdere og dokumentere fiskevelferd. 3. utgave. 2018.
- [30] P Hawkins, N Dennison, G Goodman, S Hetherington, S Llywelyn-Jones, K Ryder, and AJ Smith. Guidance on the severity classification of scientific procedures involving fish: report of a working group appointed by the norwegian consensus-platform for the replacement, reduction and refinement of animal experiments (norecopa). *Laboratory animals*, 45(4):219–224, 2011.
- [31] William Moy Stratton Russell and Rex Leonard Burch. *The principles of humane experimental technique*. Methuen, 1959.

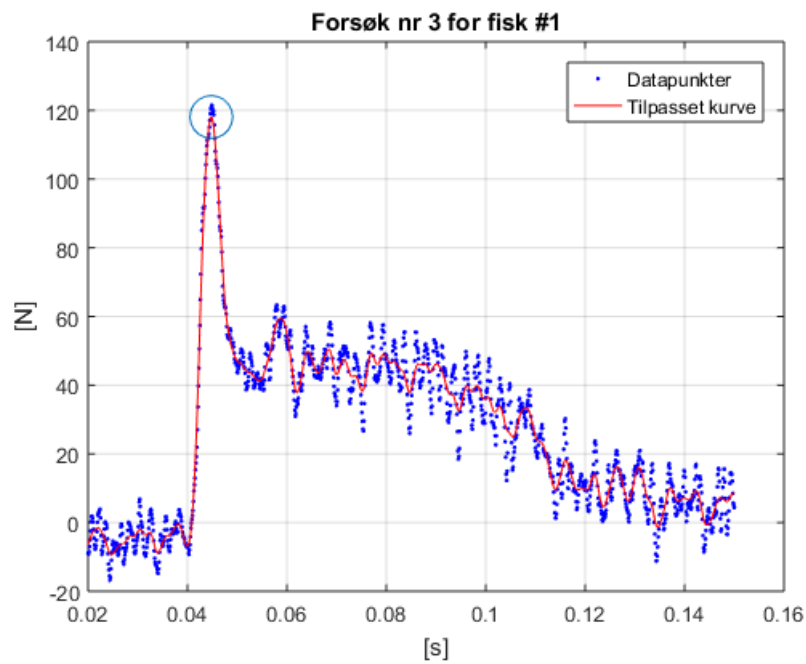
- [32] Coenraad FM Hendriksen and David Bradley Morton. Humane endpoints in animal experiments for biomedical research. In *International Conference on Humane Endpoints in Animal Experiments for Biomedical Research (1998: Zeist, Netherlands)*. Royal Society of Medicine Press, 1999.
- [33] Sagita Dewi, Tore Aune, John A Aasen Bunæs, Adrian J Smith, and Stig Larsen. The development of response surface pathway design to reduce animal numbers in toxicity studies. *BMC Pharmacology and Toxicology*, 15(1):1–11, 2014.
- [34] Rasmus Rørholt Theisen. Optimized industrial cooling of atlantic salmon. Master’s thesis, NTNU, 2019.
- [35] Abaqus. Selecting continuum elements. <https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEGSARefMap/simagsa-c-ctmselecting.htm>, 2021. (Avlest: 18.05.2021).
- [36] Green Line. Brushless dc motors. <https://www.greenline-intecno.com/en/catalog-element/brushless-motors/>, 2021. (Avlest: 10.05.2021).
- [37] HBM. U93 force transducer. <https://www.hbm.com/en/2411/u93-force-transducer-for-real-time-quality-control-in-production/#f104400s>, 2021. (Avlest: 18.05.2021).
- [38] Edmund. High performance usb 3.0 monochrome camera. <https://www.edmundoptics.com/p/gs3-u3-23s6m-c-112-grasshopper-usb-30-monochrome-camera/30859/>, 2021. (Avlest: 10.05.2021).
- [39] Sky McKinley and Megan Levine. Cubic spline interpolation. *College of the Redwoods*, 45(1):1049–1060, 1998.
- [40] ACR Newbery and Tylene S Garrett. Interpolation with minimized curvature. *Computers & Mathematics with Applications*, 22(1):37–43, 1991.
- [41] MathWorks. Smoothing splines. <https://www.mathworks.com/help/curvefit/smoothing-splines.html>, 2021. (Avlest: 03.05.2021).

Vedlegg

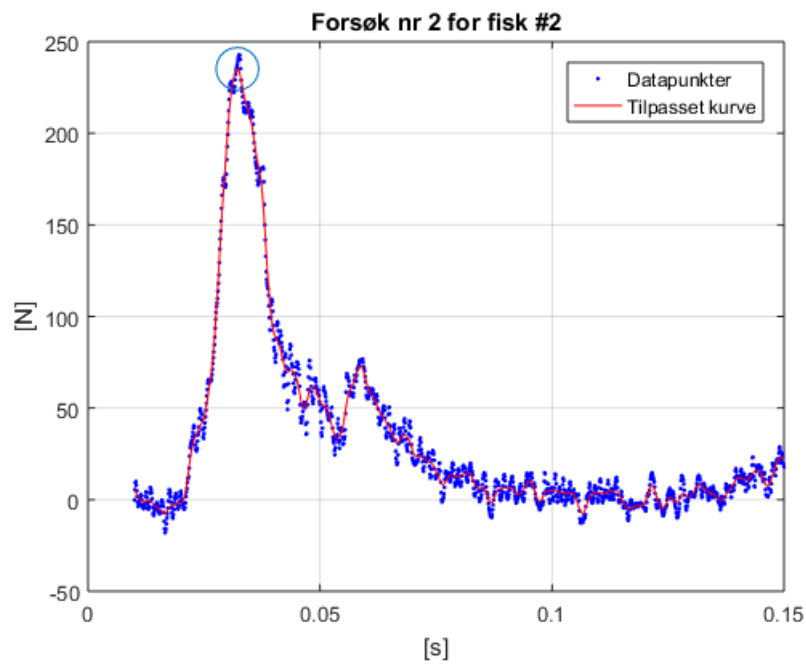
A Første utkast av modellen



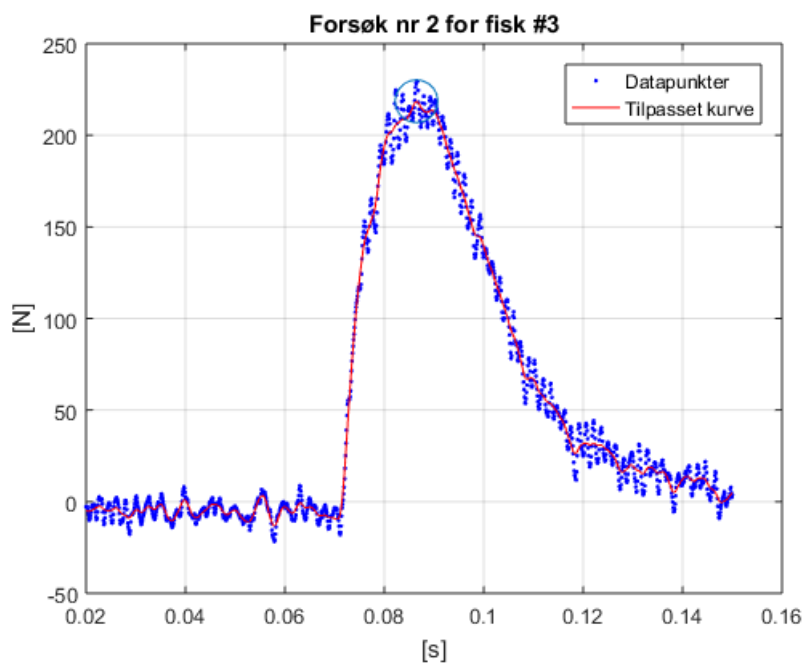
B Resultater fra lastcellen



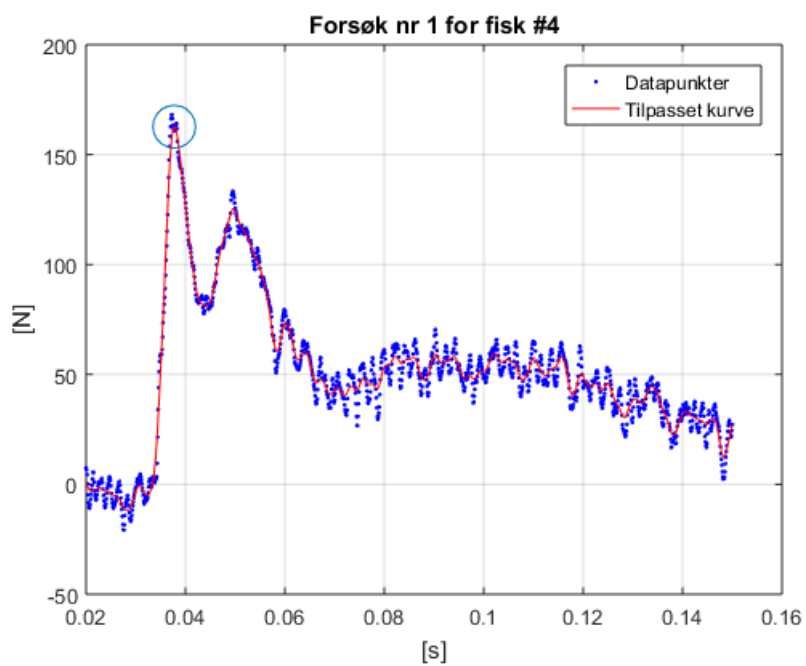
Fiskens hastighet: $2,06 \frac{m}{s}$



Fiskens hastighet: $2,59 \frac{m}{s}$

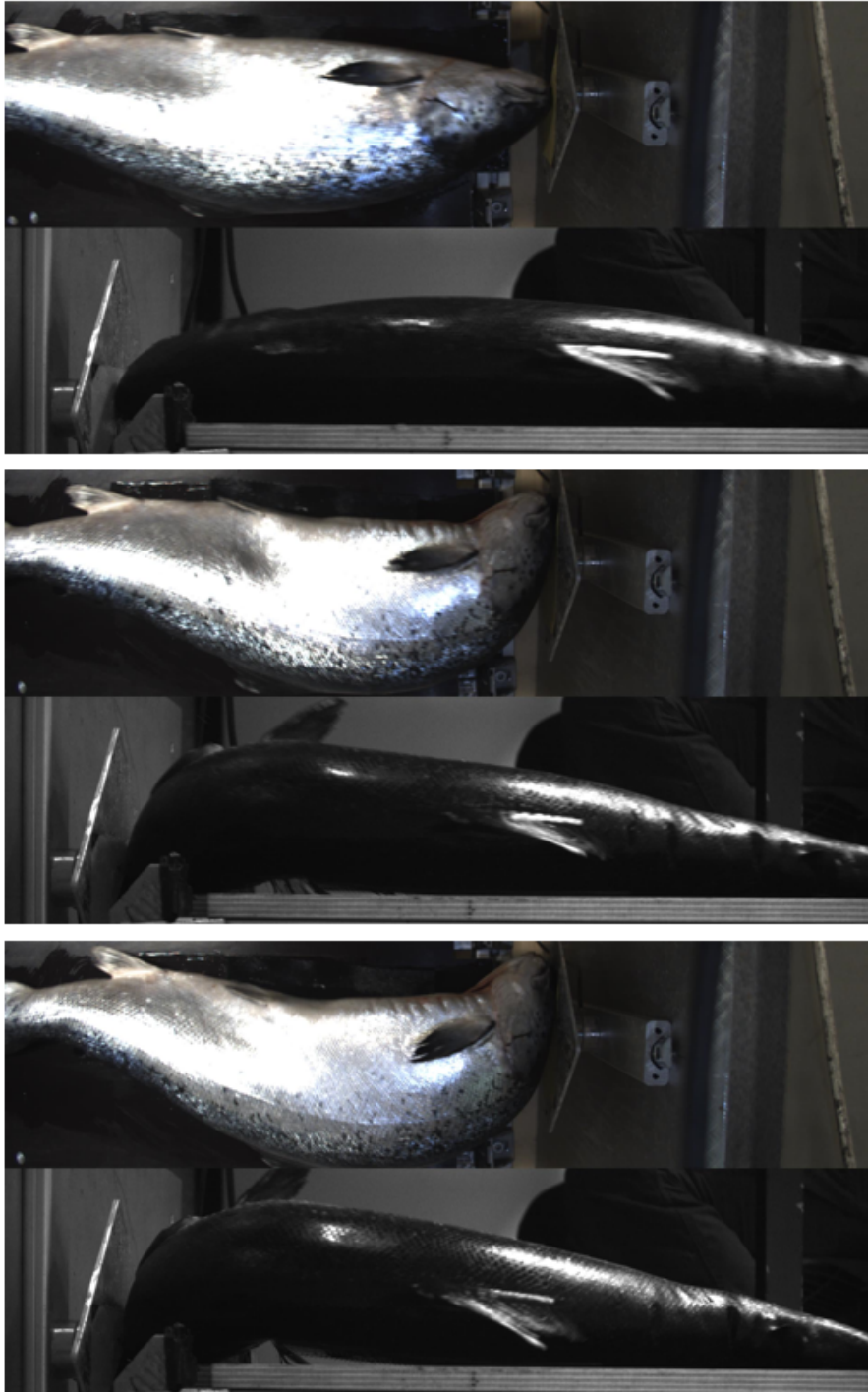


Fiskens hastighet: $2,08 \frac{m}{s}$

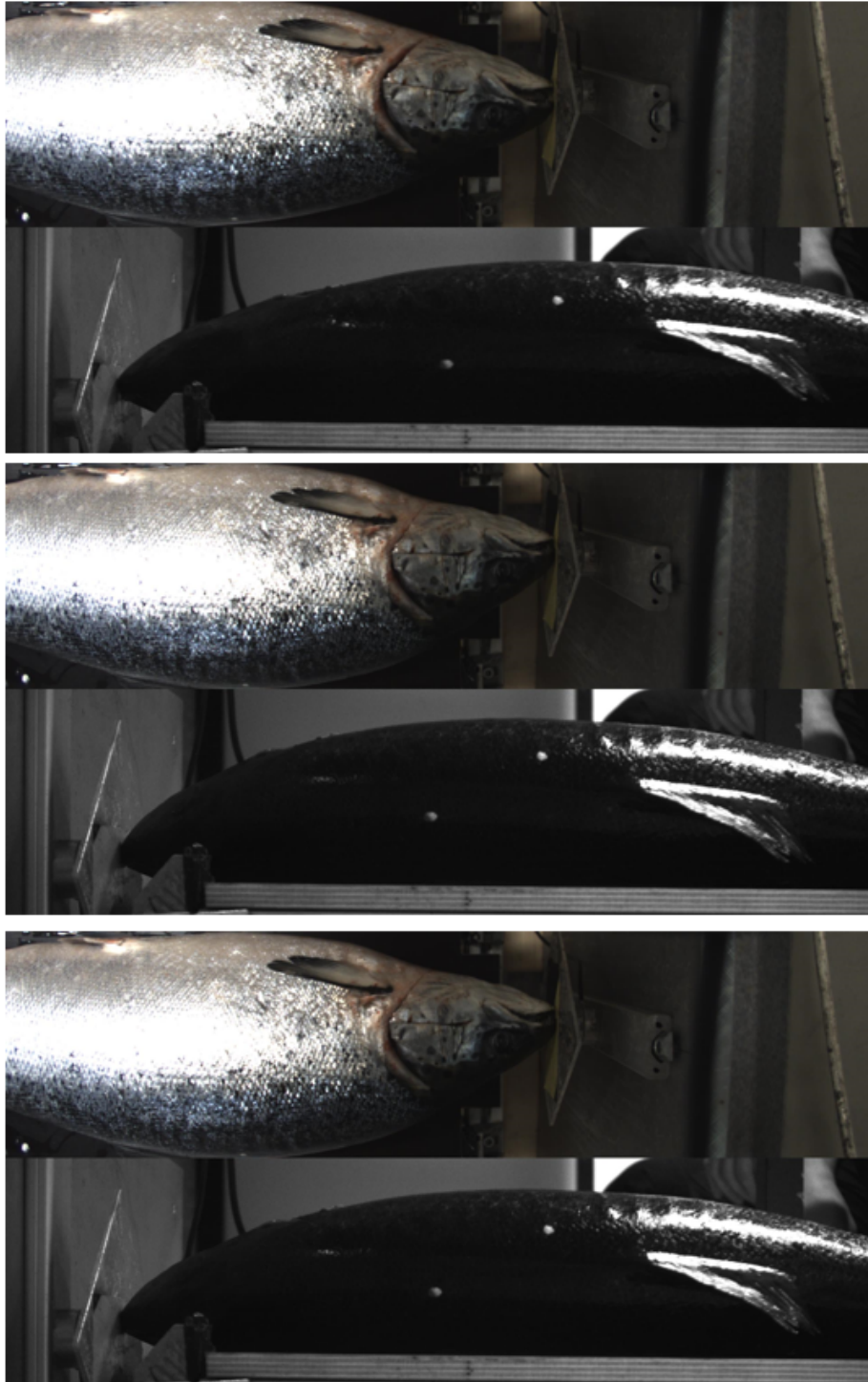


Fiskens hastighet: $1,98 \frac{m}{s}$

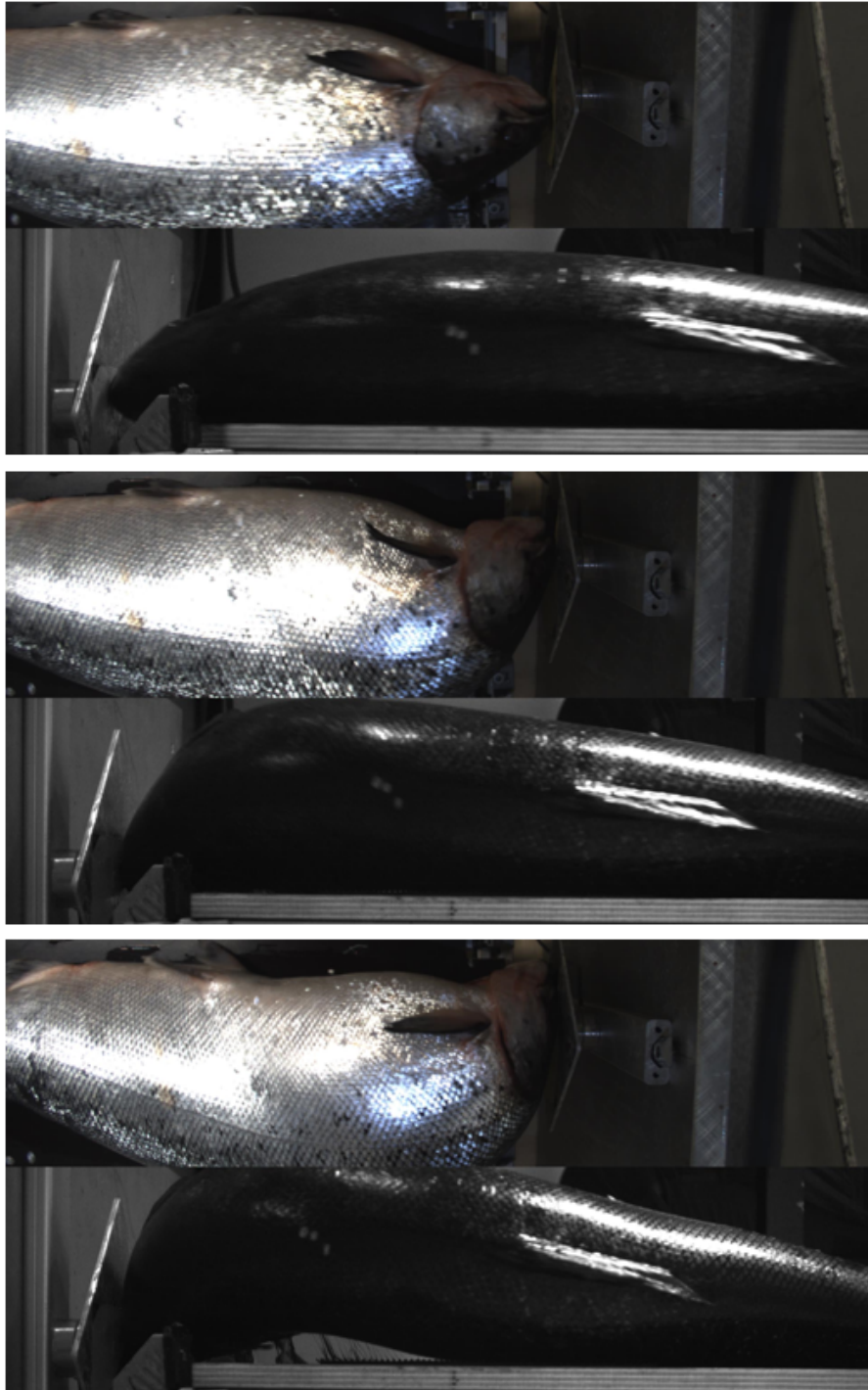
C Resultater fra høyhastighetskameraene



Bilde fra høyhastighetskamera som viser støtet av laks #1 med $2,5 \frac{m}{s}$. Bilde 1 $t = 0 \text{ ms}$ etter støtet, Bilde 2 $t = 49 \text{ ms}$, Bilde 3 $t = 73,5 \text{ ms}$



Bilde fra høyhastighetskamera som viser støtet av laks #3 med $1,5 \frac{m}{s}$. Bilde 1 $t = 0 \text{ ms}$ etter støtet, Bilde 2 $t = 52,5 \text{ ms}$, Bilde 3 $t = 157,5 \text{ ms}$



Bilde fra høyhastighetskamera som viser støtet av laks #4 med $2 \frac{m}{s}$. Bilde 1 $t = 0 \text{ ms}$ etter støtet, Bilde 2 $t = 42 \text{ ms}$, Bilde 3 $t = 94,5 \text{ ms}$

D Matlab kode

D.1 Kurvetilpasning

```
1 %Lese excel filen
2 rawTable = readtable('1-2,5.xlsx');
3 %Tar ut kolonnene
4 a = rawTable.time_(7:end);
5 x=str2double(a);
6 y = rawTable.Var4(7:end);
7 %Definerer område som skal kurvetilpasses
8 aa=120;
9 bb=1500;
10 g=rawTable(2,2);
11 %kurvetilpassning og plot
12 creatfit1(x(aa:bb),y(aa:bb));
```

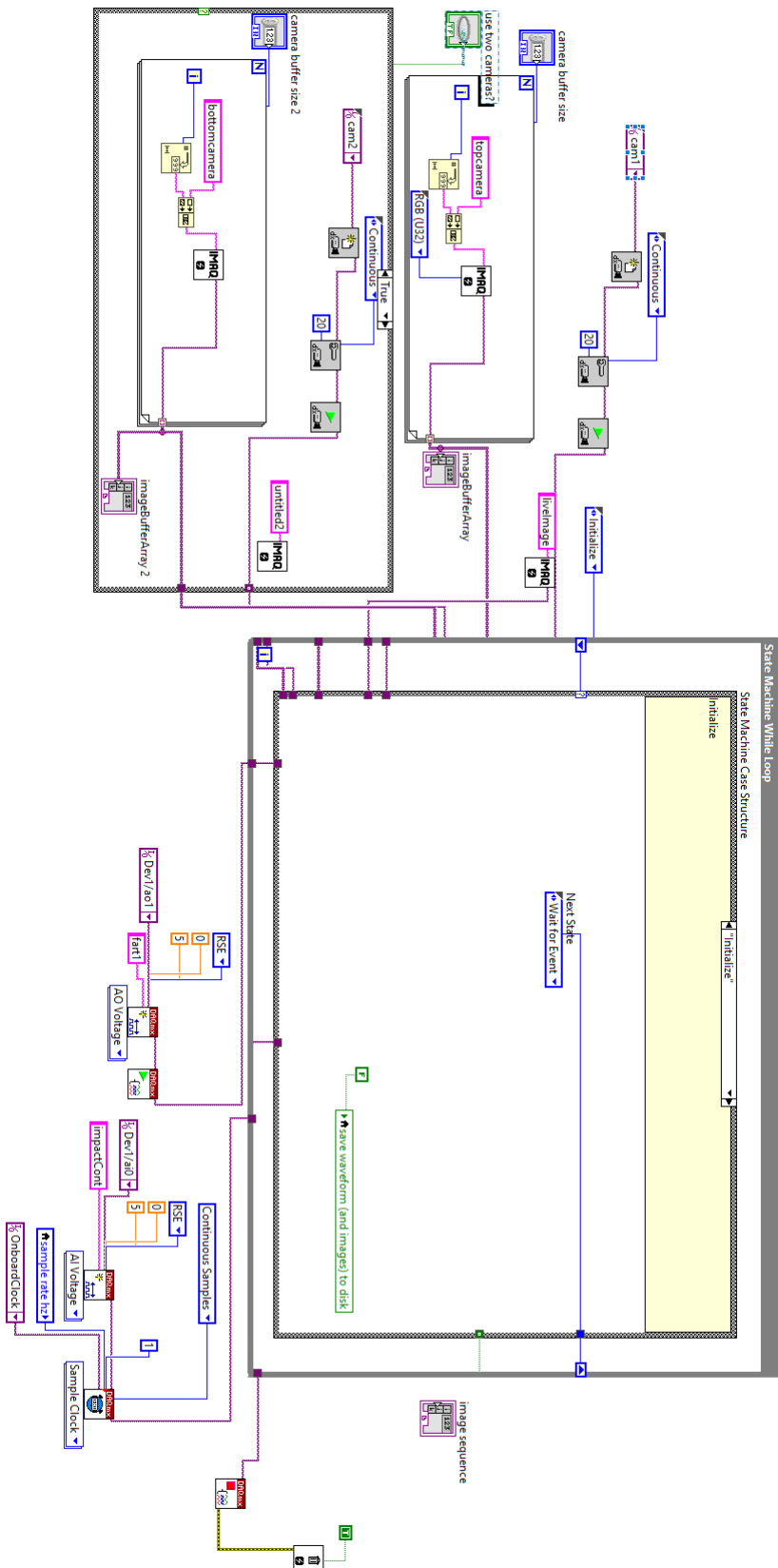
```
1 function [fitresult, gof] = creatfit1(x, y)
2 %Henter data
3 [xData, yData] = prepareCurveData( x, y );
4 % Setter opp fitttype og vektingsparameteren p
5 ft = fitttype( 'smoothingspline' );
6 opts = fitoptions( 'Method', 'SmoothingSpline' );
7 opts.SmoothingParam = 0.999999999;
8 % tilpasser modellen til data
9 [fitresult, gof] = fit( xData, yData, ft, opts );
10 %Finne toppunkt
11 x1=linspace(x(100),x(800),501);
12 y11 = feval(fitresult,x1);
13 [ymax,idx] = max(y11)
14 xmax=x1(idx);
15 % Plotter kurven sammen med data
16 figure( 'Name', 'Plot' );
17 h = plot( fitresult, xData, yData);
18 hold on
19 plot(xmax,ymax, '-o', 'MarkerSize', 20)
20 hold off
21 title('Forsøk nr 1 for fisk #4')
```

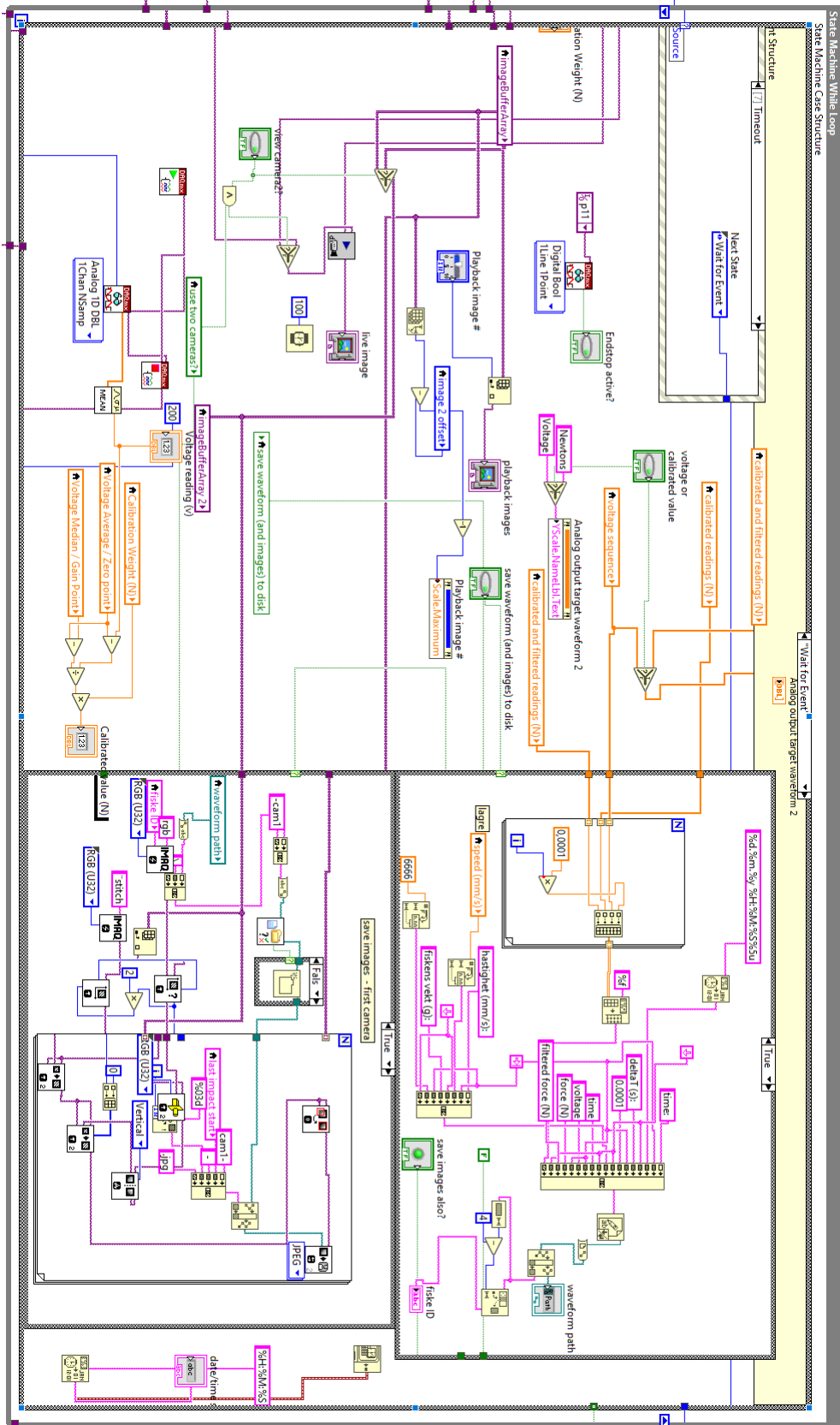
```
22 legend( h, 'Datapunkter', 'Tilpasset kurve', 'Location', '  
    NorthEast' );  
23 % Aksene  
24 xlabel [s]  
25 ylabel [N]  
26 grid on
```

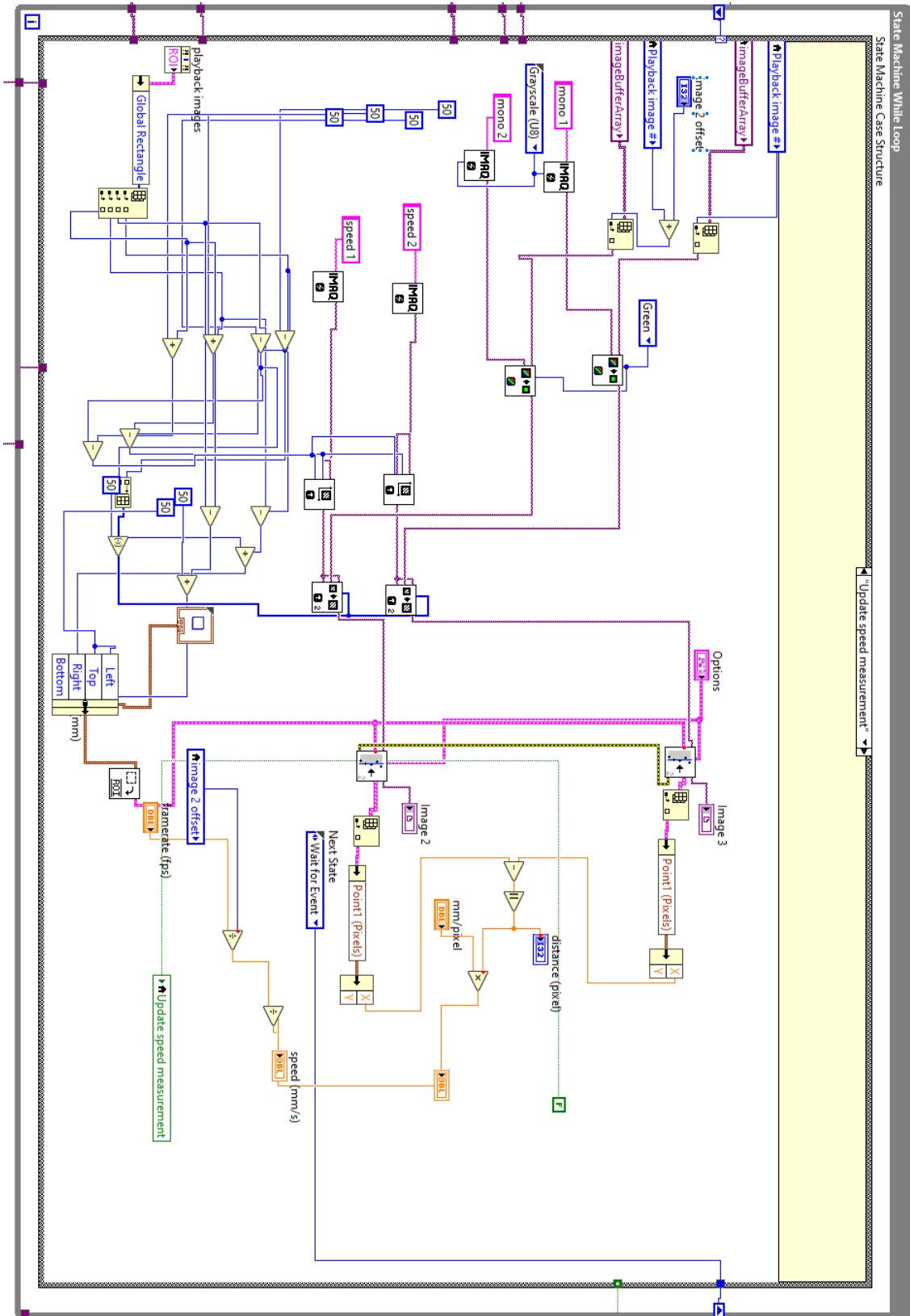
D.2 Resultat plot fra Abaqus

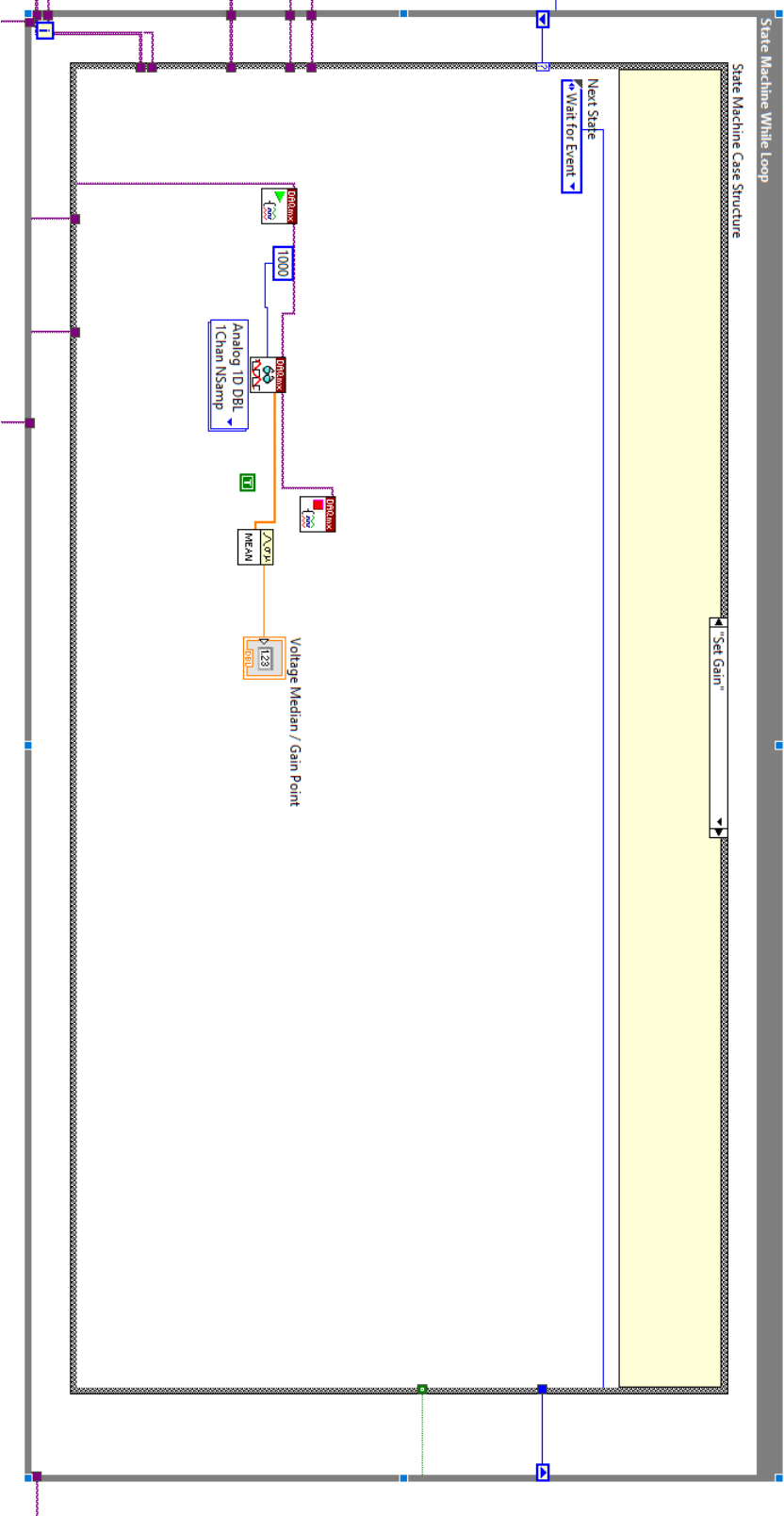
```
1 %henter data  
2 [numbers] = xlsread('aba.1_5.xlsx');  
3 % lager x og y vektorer  
4 x = numbers(400:495,1);  
5 y = numbers(400:495,2)  
6 %finner toppunkt  
7 [ymax,idx] = max(y);  
8 xmax=x(idx);  
9 %lager plot  
10 plot(x,y)  
11 hold on  
12 plot(xmax,ymax,'-o','MarkerSize',20)  
13 hold off  
14 xlabel [s]  
15 ylabel [N]
```

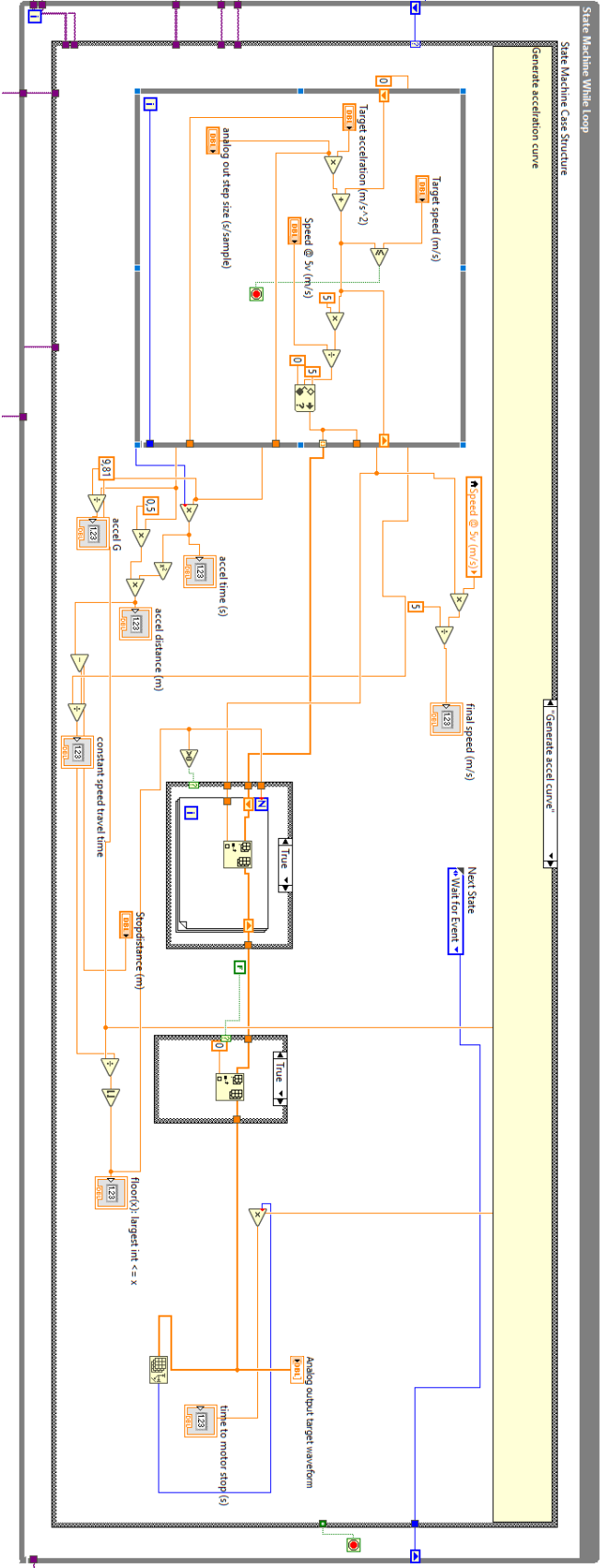
E Blokkdiagram i LabView

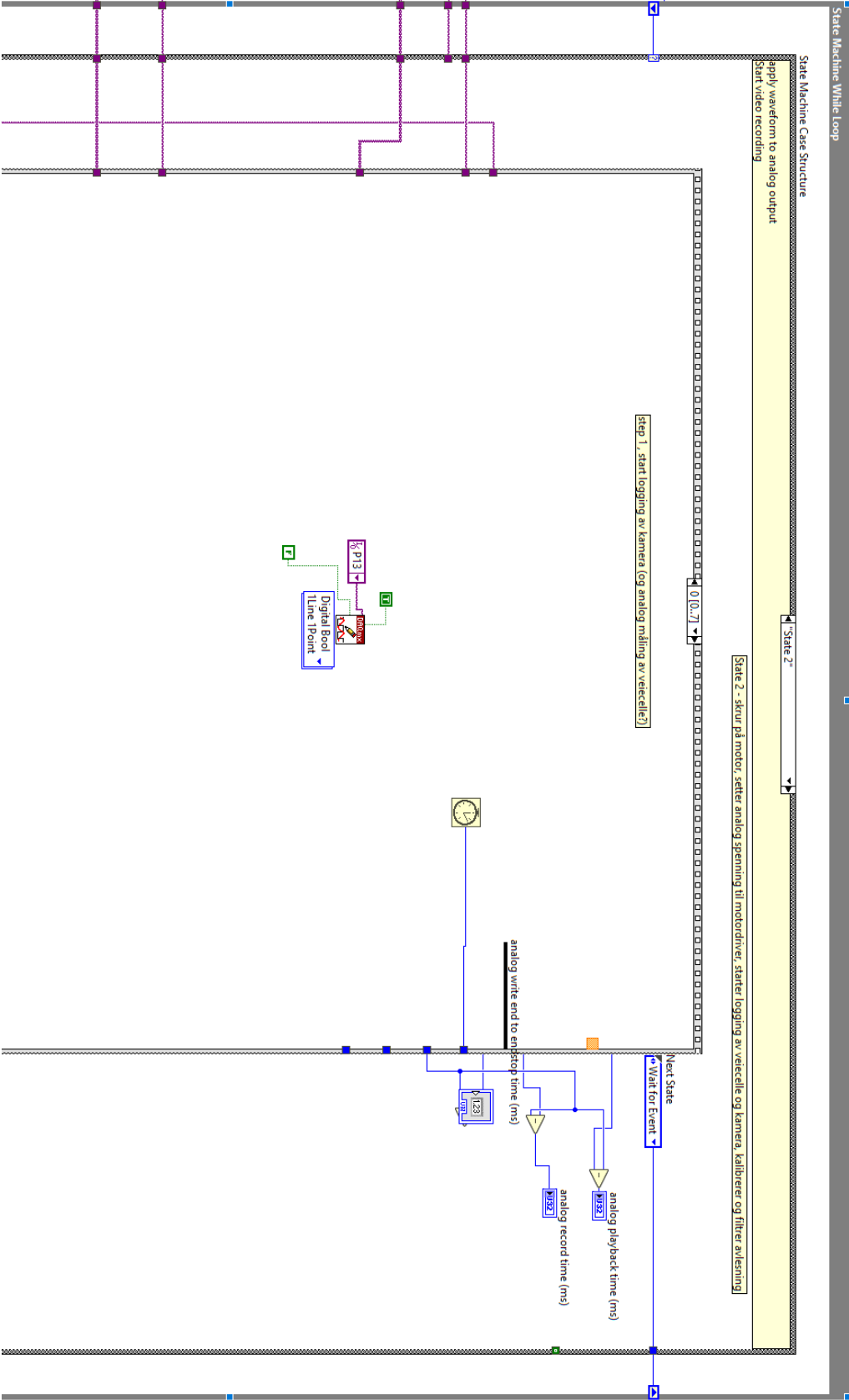


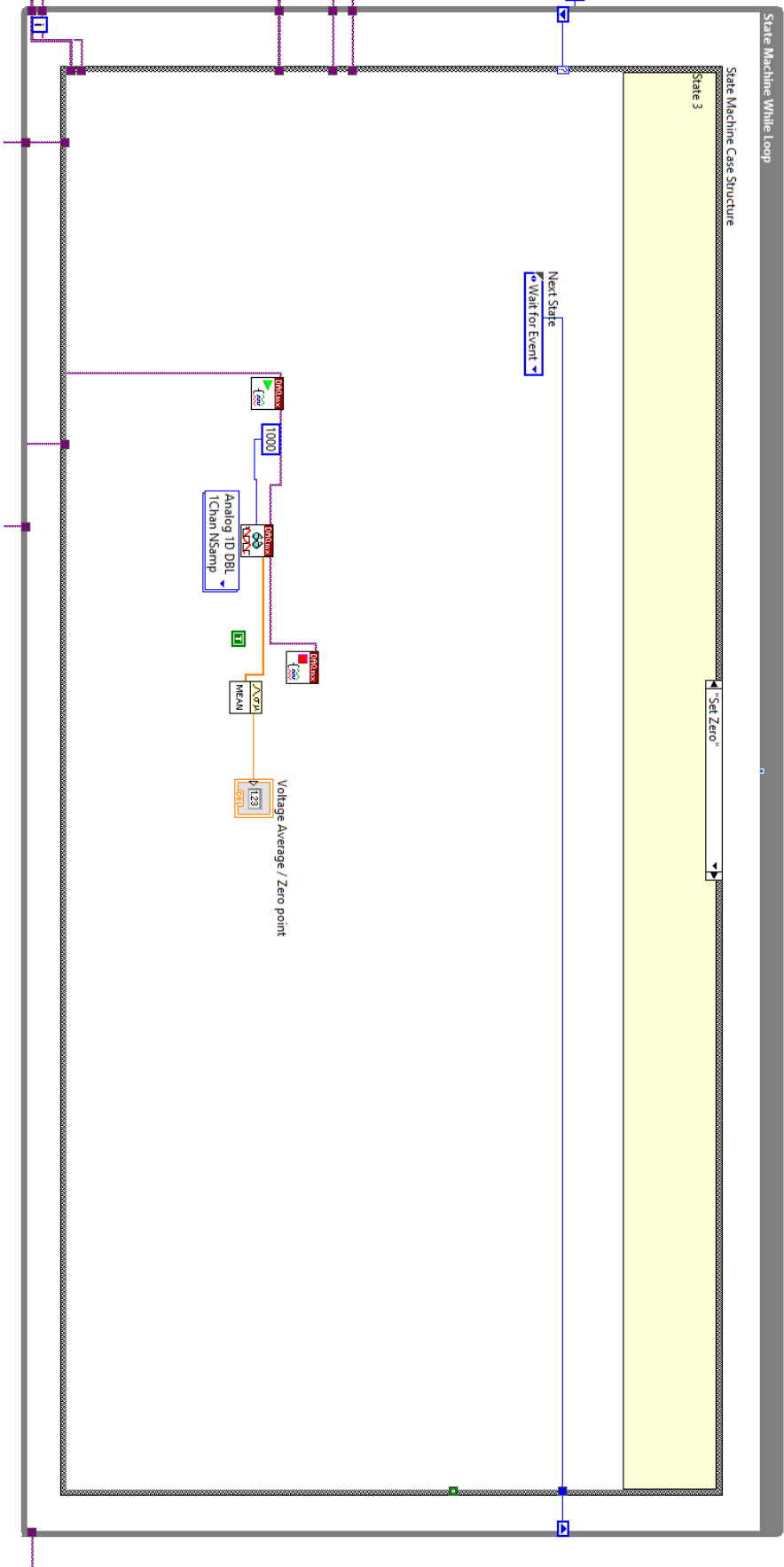


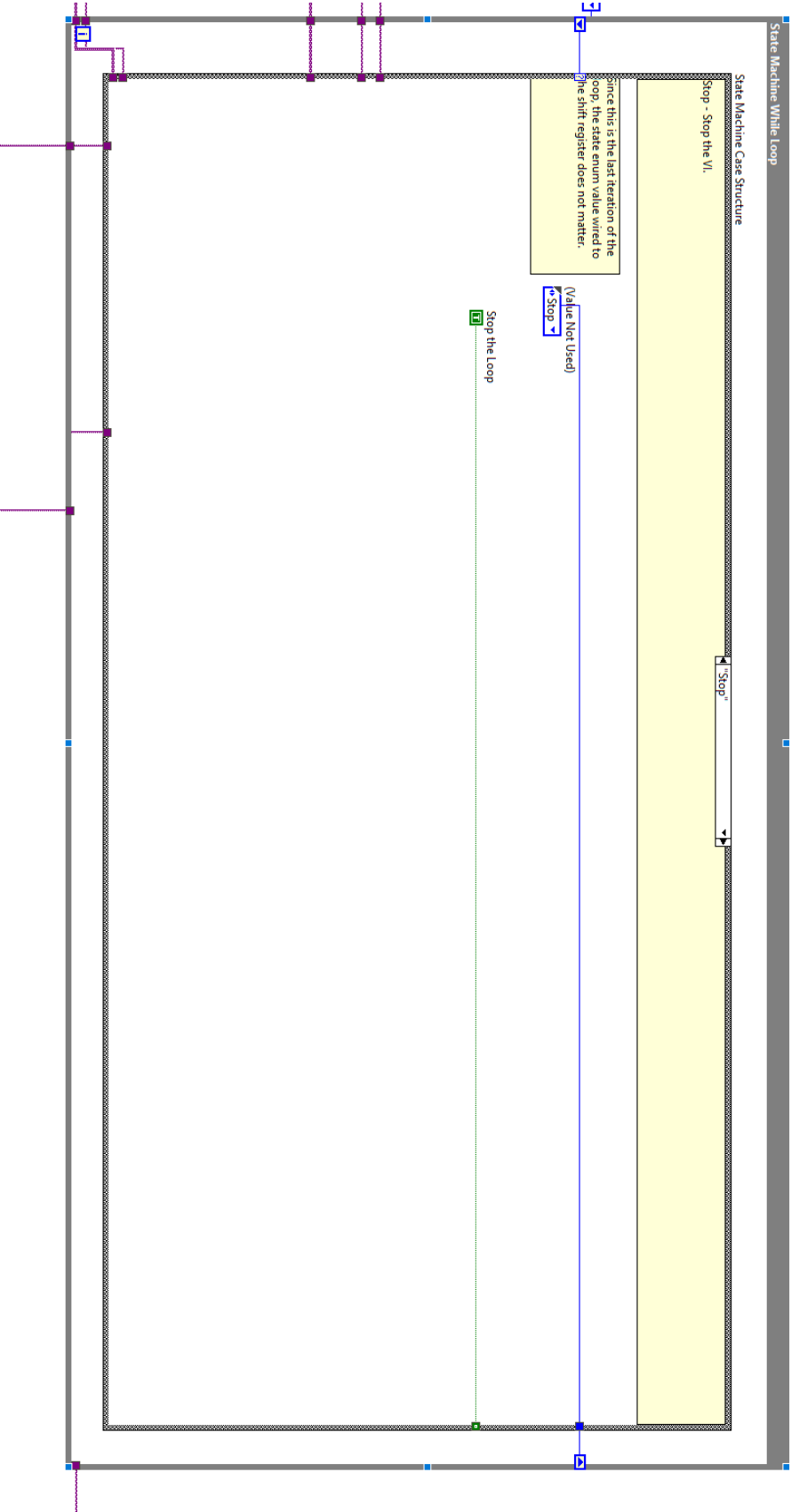




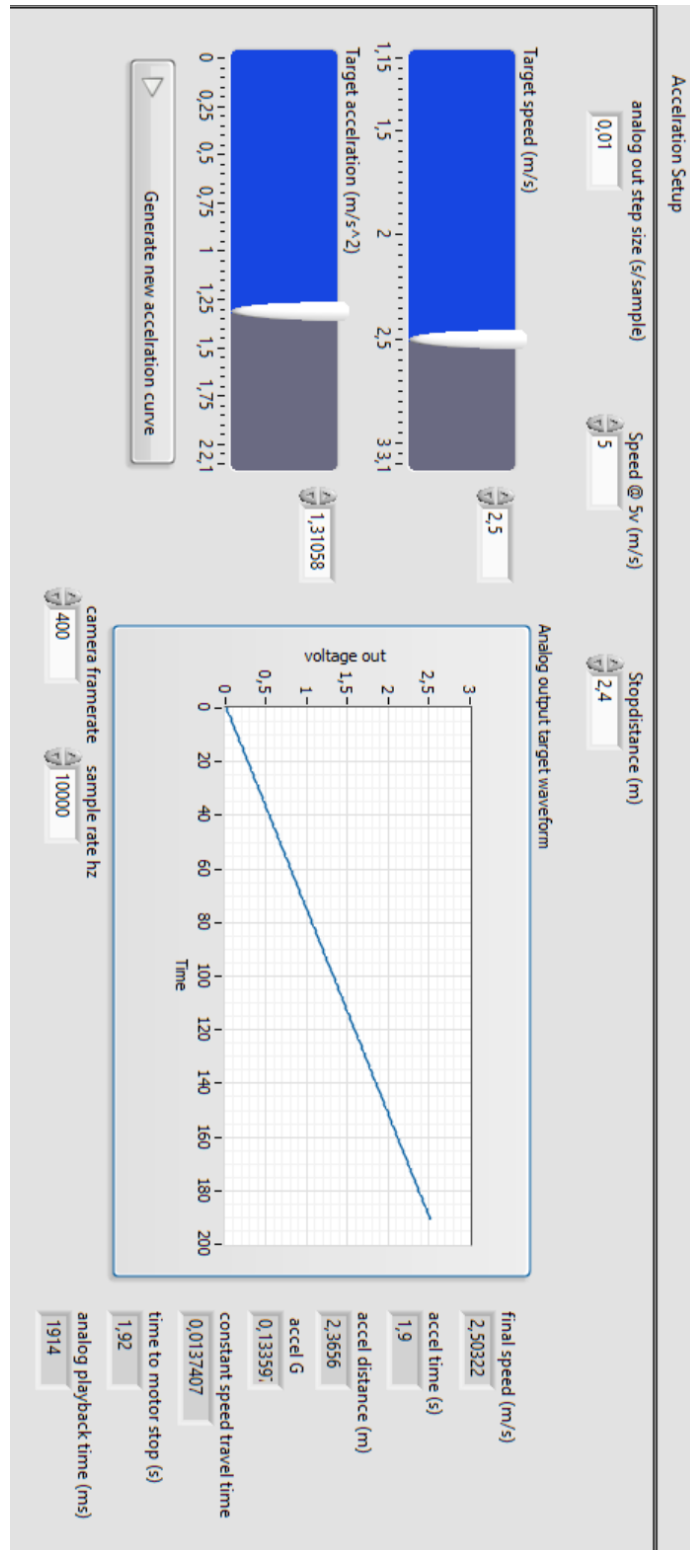




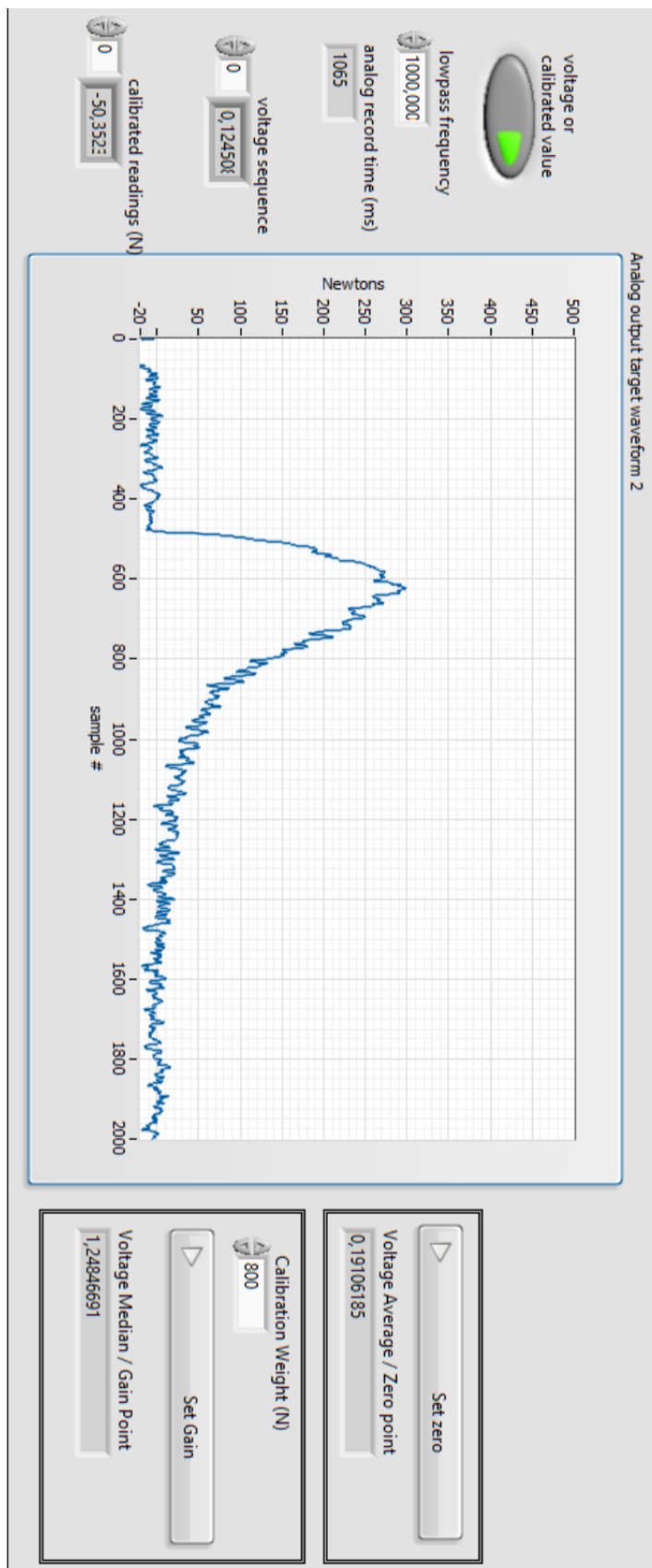




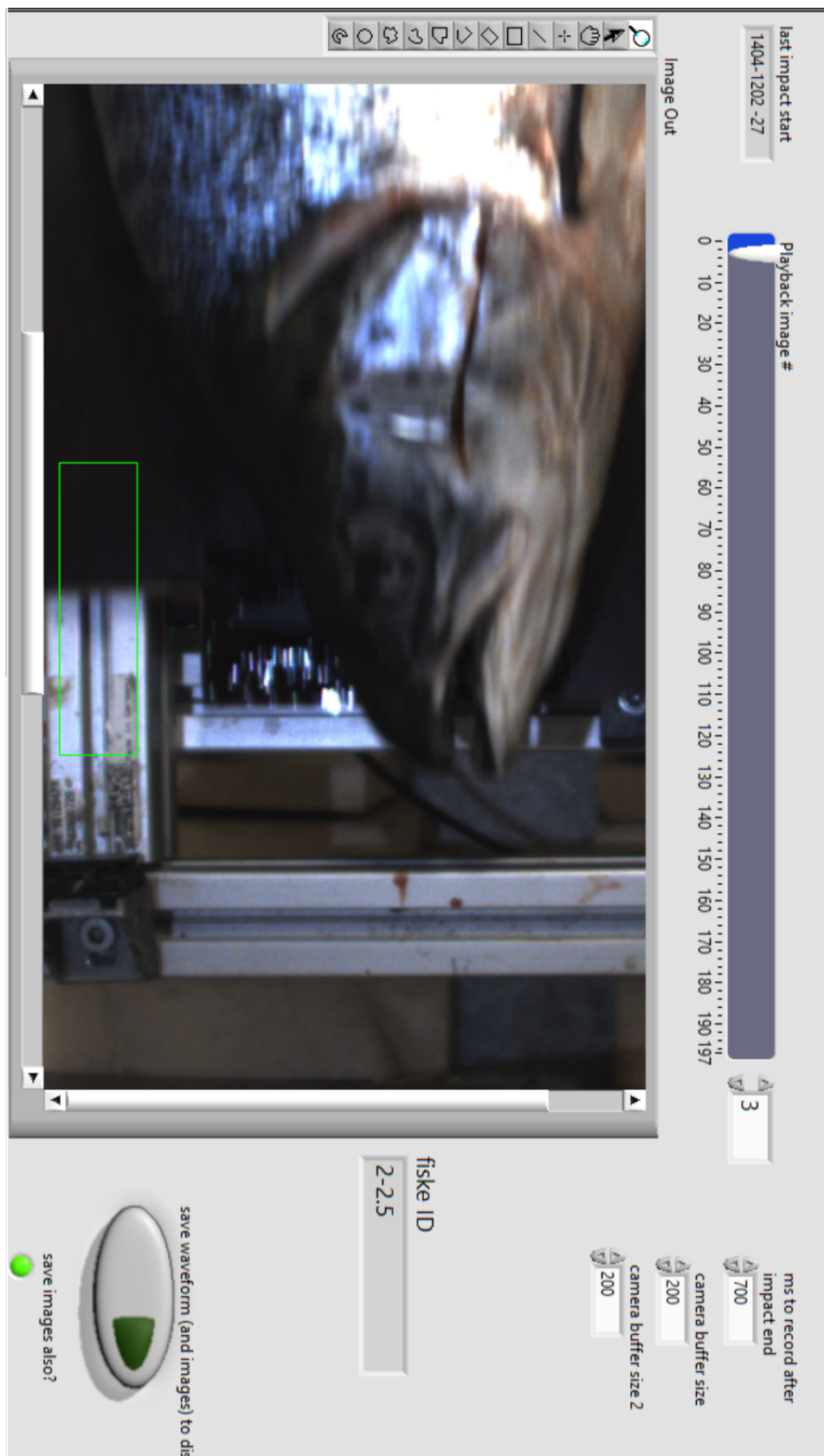
F Frontpanelet i LabView



Frontpanel for akserlasjonsinnstillinger

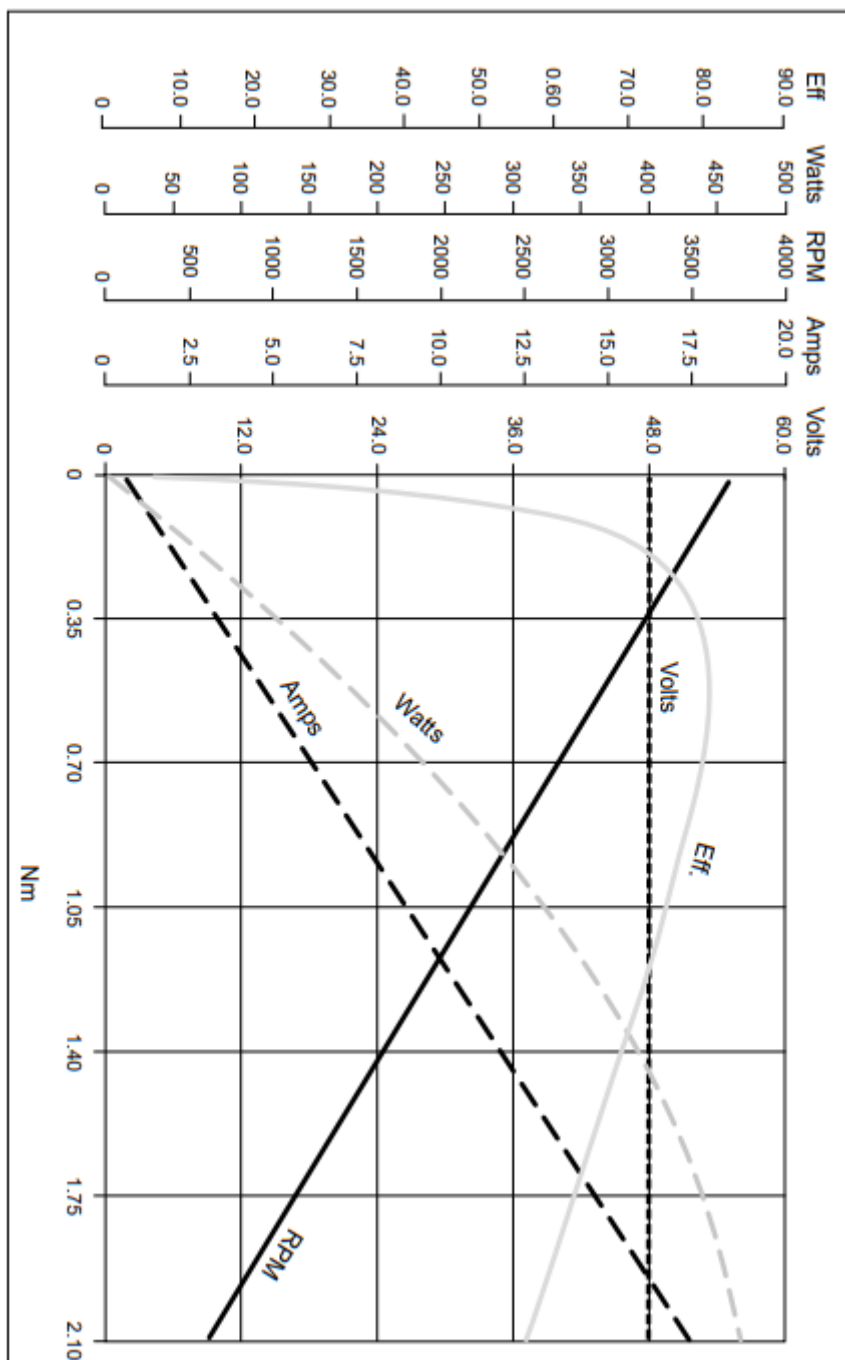


Frontpanel for lastcelle-resultat



Frontpanel for hastighetsmåling

G Elektrisk motor



Motorens ytelse [36]

