



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2022 30 stp
Fakultet for Realfag og teknologi

Utvikling av roterende 4-punkts bøyeutmattingsmaskin

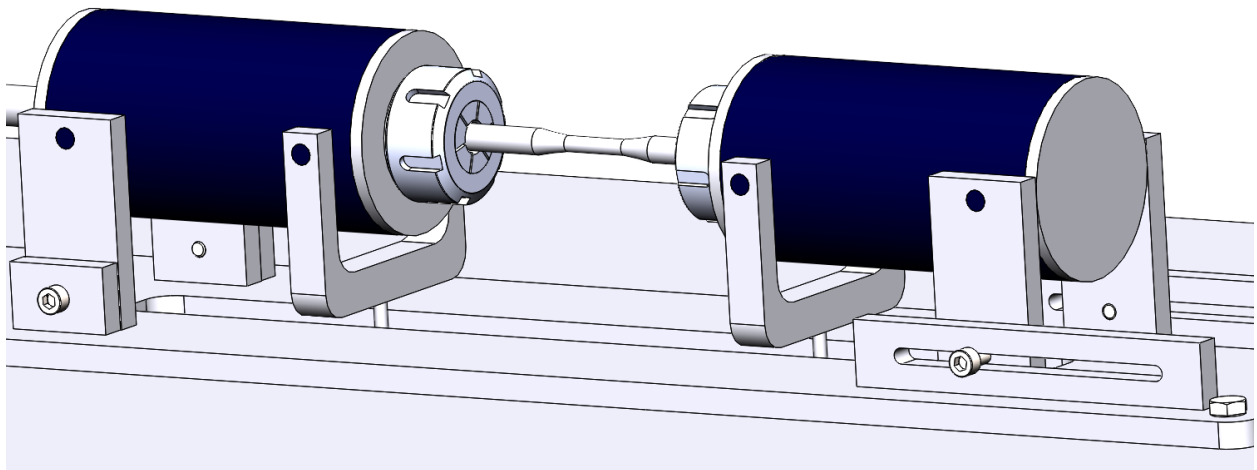
Development of rotating 4-point bending fatigue
machine

Torbjørn Pytte Nordli
Maskin, prosess- og produktutvikling

Utvikling av roterende 4-punkts bøyeutmatningsmaskin

av

Torbjørn Pytte Nordli



Masteroppgave i Maskin, prosess- og produktutvikling

Fakultet for realfag og teknologi, NMBU

Våren 2022

Forord

Dette er rapporten fra masterprosjektet mitt i studiet maskin, prosess- og produktutvikling ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet. Masteroppgaven ble gjennomført våren 2022 med arbeidsomfang på 30 studiepoeng (ECTS).

Motivasjonen bak oppgaven kommer fra egen interesse for konstruksjon og beregning, samt et ønske om å lære mer om emner knyttet til dynamiske situasjoner. For denne oppgaven gjelder dette spesielt med hensyn til å gå i dybde på prinsippene bak utmatting. Andre sentrale temaer er nøyaktighet og testing.

Prosjektoppgaven er utarbeidet etter eget ønske om å knytte arbeidet mest mulig mot praktiske problemstillinger. Dimensjoneringsarbeidet i denne oppgaven bygger opp under dette ved å arbeide mot en maskin som kan benyttes i praktisk laboratoriearbeid og utdanning.

Arbeidet i prosjektet er utformet som en produktutviklingsoppgave der produktet er en testmaskin for 4-punkts bøyeutmatting. Kunden er Fakultet for realfag og teknologi ved NMBU. Gjennom oppgaven arbeides det opp mot standarder for utmattingstesting. Sentralt for masterarbeidet er utvikling av spesialkunnskaper om utmatting, samt valg av løsninger og komponenter for å oppfylle krav fra gjeldende standarder og oppdragsgiver.

Gjennom arbeidet med oppdraget har det vært en motiverende faktor at grunnlaget som legges i denne oppgaven og utviklingsarbeidet som utføres kan resultere i en virkelig maskin i fremtiden. Dette har gjort prosessen spesielt lærerik og spennende.

Jeg ønsker å takke førsteamanuensis Geir Terjesen for et interessant oppgavetema og faglige innspill underveis og råd, og senioringeniør Øyvind Hansen for råd knyttet til produksjon. I tillegg en takk til førsteamanuensis Jan Kåre Bøe for solid veiledning og motiverende samtaler gjennom hele prosjektarbeidet.

Til slutt en spesiell takk til gode venner og familie som har motivert og støttet gjennom denne våren.

Ås den 14. mai

Torbjørn Pytte Nordli

Torbjørn Pytte Nordli

Sammendrag

Siden industrialiseringen og veksten av jernbanetransport på starten av 1800-tallet har det blitt observert flere uventede brudd i komponenter utsatt for vekslende belastning, selv om spenningene var langt under materialenes fasthetsverdier. På dette viset oppstod erkjennelsen og teorien om at materialer kan bli utmattet over tid. For å unngå alvorlige ulykker ble det viktig å forstå mekanismene bak utmattingsbrudd og danne et formelverk for dimensjonering av levetid.

Utmattingsberegninger er bygget på empiriske data for ulike materialtyper. En av de første til å bygge utmattingsmaskiner og utføre denne typen tester var jernbaneingeniør August Wöhler. Han oppdaget at det var en sammenheng mellom spenningsamplituden og hvor mange lastsykler en materialprøve kan utsettes for før det går til brudd. Disse oppdagelsene legger grunnlaget for utmattingsstesting og utmattingsberegninger den dag i dag.

Fordi forståelse for utmattingsproblematikk er viktig for mange industrier ønsker Fakultet for realfag og teknologi ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet en utmattingsmaskin som kan benyttes i sammenheng med laboratoriearbeid for studenter. Det er også et ønske om at maskinen skal kunne benyttes til fremtidig FoU-arbeid. Å ha en slik testmaskin tilgjengelig på universitetet vil samtidig være med på å styrke forståelsen for utmatting av materialer.

Med denne bakgrunnen er hovedmålet med mastergradsarbeidet derfor å klarlegge viktige trinn i utviklingen av denne typen maskiner, teknologisk status og viktige standarder, og bygge videre på dette for å kunne konstruere og designe en utmattingsprøvemaskin med 4-punkts bøying for testing av prøvestaver. Som en del av dette utviklingsarbeidet følger det også med en teoriutredning som gjør rede for materialtekniske mekanismer som står bak utmattingsbrudd, og hvordan initiering og vekst av sprekker foregår på mikroskopisk nivå.

For å bygge opp under hovedmålsettingene er det blitt definert delmål, som igjen er videreutviklet til en tidsplan som skal sikre at alle deler av arbeidet blir gjennomført i tide. God planlegging og fokus på kvalitet og kontinuerlig forbedring er sentralt i IPD/IPPD-tankegang (Integrert produkt- og prosessutvikling), og det blir gjort nærmere rede for denne metodikken. Andre sentrale utviklingsmetodikker som benyttes er Pughs metode, SCAMPER og modulisering, samt QFD, som samler mye av utviklingsmetodikken i det såkalte «kvalitetshuset».

Pughs metode er benyttet for å gjøre valg i på en objektiv måte ved å sette opp seleksjonsmatriser og veie ulike løsningsalternativer opp mot hverandre. SCAMPER ble benyttet mye i for å komme opp med løsninger og funksjoner, men også gjennomgående i arbeidet med rapportering. Modulisering er brukt til å se ulike måter elementer kan settes sammen og konstrueres, samt muligheten for å benytte eksisterende løsninger i konstruksjonen. Utredningsfasen er avsluttet med prosessdiagrammet, som også gjør rede for de tre følgende fasene: utviklingsfasen, konstruksjonsfasen og ferdigstillingsfasen.

I utviklingsfasen blir krav og spesifiseringer for produktet definert. Dette inkluderer grensespesifikasjoner for ytre mål og andre viktige dimensjoner som skal styre både aktuelle

Utvikling av roterende 4-punkts bøyeutmattingsmaskin

løsningsalternativer og arbeid i konstruksjonsfasen. Ved å gjennomføre en funksjonsanalyse er det kommet fram til hvilke funksjoner som er viktige og aktuelle løsninger som kan oppfylle disse funksjonene. Løsningsalternativene henter inspirasjon fra eksisterende utmattingsmaskiner og er spisset inn mot de målsettingene som er satt for prosjektet. Alle løsningsalternativer er skissert og screenet opp mot hverandre. Mot slutten av utviklingsfasen sitter man igjen med en fullstendig konseptløsning som skal videreutvikles i konstruksjonsfasen.

Konstruksjonsfasen består av grovberegninger som var med på å styre dimensjoneringen av ulike produkt detaljer. Hele maskinen ble så 3D-modellert i CAD-programvare, i tillegg til tekniske sammenstillingstegninger som viser maskinen i sin helhet og alle hovedkomponenter. Utvalgte viktige komponenter gikk gjennom FEM-analyser for å finne eventuelle svakheter i konstruksjonen og optimalisere arkitekturen. En kombinasjon av grovberegninger og FEM-analyse ga grunnlaget for materialvalg for komponentene.

Ferdigstillingsfasen er innledet med en gjennomgang av produksjonsmetoder og analyse av kostnader knyttet til produksjon av utmattingsmaskinen. Tegningsgrunnlaget fra konstruksjonsfasen gir grunnlag for renderinger i lab-miljø, samt anvisninger for en laboratorieøvelse i utmattingsstesting.

Bøyeutmattingsstestmaskinen er konstruert etter standard for utmattingsprøvemaskiner (ISO 1143) og for å påføre 4-punkts bøymoment på en prøvestav. Dette betyr at prøvestaven er innspent i 2 punkter og belastet i 2 punkter. Det oppnås vekslende spenning ved å rotere prøvestaven med en motor. Belastninger kommer fra et sett med lodd som henger fra belastningspunktene. Maskinen er stilt opp på et bord og er utstyrt med et målesystem som registrerer turtall, antall rotasjoner og tid før brudd.

Utvendige mål for selve maskinen er 800 mm x 150 mm x 117,5 mm. Bordet som benyttes for oppstilling har mål 1310 mm x 590 mm x 770 mm. Driftsspenningen til motoren er 230 V, og den har et turtall på 3000 r/min. Den totale kostnaden for produksjon av en prototype er 517.515 kr. Ekskluderer man eget utviklingsarbeid er prisen 22.515 kr.

Veien videre består av flere styrkeberegninger og FEM-analyser. Andre beregninger i form av utmattingsberegninger, levetidsanalyser og svingningsanalyser bør også gjennomføres. I tillegg må det gjøres design av elektrisk anlegg for motor, brytere, sensorer og databehandling. Som en del av videre arbeid burde det gjøres en endelig vurdering av produksjonsmetoder og kostnadene knyttet til dette.

Abstract

Since the industrialization and growth of rail transport at the beginning of the 19th century, several unexpected fractures of components subjected to varying loads have been observed, even though the stresses were far below the strength values of the materials. This led to the realization and theory that materials can become fatigued over time. To avoid serious accidents, it became important to understand the mechanisms behind fatigue failure and form a formula for dimensioning service life.

Fatigue calculations are based on empirical data for different material types. One of the first to build fatigue machines and perform this type of test was railway engineer August Wöhler. He discovered that there was a connection between the stress amplitude and how many load cycles a material sample can be subjected to before it breaks. These discoveries are still the foundation for fatigue testing and fatigue recovery to this day.

Because understanding fatigue problems is important for many industries, the Faculty of Science and Technology at the Norwegian University of Life Sciences wants a fatigue machine that can be used in connection with laboratory work for students. There is also a desire for the machine to be able to be used for future R&D work. Having such a test machine available at the university will at the same time help to strengthen the understanding of material fatigue.

With this background, the main goal of the master's degree project is therefore to clarify important steps in the development of this type of machine, technological status and important standards, and build on this to be able to construct and design a fatigue test machine with 4-point bending for test specimens. As part of this development work, a theory study is also included that explains the material technical mechanisms behind fatigue fractures, and how the initiation and growth of cracks takes place at the microscopic level.

To strengthen the main objectives, sub-objectives have been defined, which in turn have been further developed into a schedule that will ensure that all parts of the work are completed in time. Good planning and focus on quality and continuous improvement are central to IPD / IPPD thinking (Integrated product and process development), and this methodology is explained in more detail. Other key development methodologies used are Pugh's method, SCAMPER and modulation, as well as QFD, which brings together much of the development methodology in the so-called «House of Quality».

Pugh's method is used to make choices in an objective way by setting up selection matrices and weighing different solution alternatives against each other. SCAMPER was used a lot to come up with solutions and functions, but also throughout the work with reporting. Modulation is used to see different ways elements can be put together and constructed, as well as the possibility of using existing solutions in construction. The study phase is completed with the process diagram, which also explains the three following phases: the development phase, the construction phase, and the completion phase.

Utvikling av roterende 4-punkts bøyeutmattingsmaskin

In the development phase, requirements and specifications for the product were defined. This includes boundary specifications for external dimensions and other important dimensions that will guide potential solutions alternatives and work in the construction phase. By conducting a function analysis, it has been determined which functions are important and relevant solutions that can fulfill the functions. The solution alternatives draw inspiration from existing fatigue machines and are focused on the goals set for the project. All solution options were outlined and screened against each other. Towards the end of the development phase, you are left with a complete concept solution that will be further developed in the construction phase.

The construction phase consists of rough calculations that helped to control the dimensioning of various product details. The entire machine was then 3D modeled in CAD software, in addition to technical assembly drawings showing the machine in its entirety and all main components. Selected key components went through FEM analyzes to find any weaknesses in the construction and optimize the architecture. A combination of rough calculations and FEM analysis provided the basis for material selection of the components.

The completion phase began with a review of production methods and analysis of costs related to the production of the fatigue machine. The drawings from the construction phase provides a basis for renderings in a lab environment as well as instructions for a laboratory exercise in fatigue testing.

The bending fatigue test machine is designed according to the standard for fatigue testing machines (ISO 1143) and for applying 4-point bending moment to a test rod. This means that the test rod is clamped in 2 points and loaded in 2 points. Alternating stress is obtained by rotating the test rod with a motor. Loads come from a set of weights hanging from the load points. The machine is set up on a table and is equipped with a measuring system that registers speed, number of rotations and time before fracture.

External dimensions of the machine itself are 800 mm x 150 mm x 117.5 mm. The table used for installation has dimensions 1310 mm x 590 mm x 770 mm. The operating voltage of the motor is 230 V, and it has a speed of 3000 r / min. The total cost for production of a prototype is NOK 517 515. If you exclude your own development work, the price is NOK 22 515.

Further work consists of further strength calculations and FEM analyzes. Other calculations in the form of fatigue calculations, lifetime analyzes, and oscillation analyzes should also be performed. In addition, electrical systems must be designed for motors, switches, sensors and data processing. As part of further work, a final assessment of production and costs related to this should be made.

Innhold

Forord.....	i
Sammendrag	ii
Abstract.....	iv
Innhold	vi
1. Innledning	1
1.1. Bakgrunn.....	1
1.2. Sentrale aktører	3
1.3. Tidligere arbeid på området.....	4
1.3.1. Standarder	4
1.3.2. Generelt om testing	5
1.4. Oppdragsbeskrivelse	6
1.5. Problemstillinger og flaskehalsar.....	6
1.5.1. Problemstillinger og fokuspunkter.....	6
1.5.2. Teknologiske flaskehalsar og utfordringer	7
2. Prosjektplanlegging.....	8
2.1. Prosjekt målsettinger.....	8
2.1.1. Hovedmål	8
2.1.2. Delmål.....	8
2.2. Tids- og arbeidsplan med milepælar.....	9
2.3. Tidlige begrensninger for arbeidet.....	10
3. Metodebeskrivelse	11
3.1. Terminologi og begreper.....	11
3.2. Metodebruk og løsningsverktøy	13
3.3. Kvalitetssikring	18
3.4. Prosesstrinn	18
4. Teori og teknologiutredning	20
4.1. Grunnlagsteori.....	20
4.2. Utmattingsstesting og spennings-levetidmetoden	27
4.3. Eksisterende teknologi	29

Utvikling av roterende 4-punkts bøyeutmattingsmaskin

5. Tidlige brukerinnspill.....	34
6. Spesifisering.....	35
6.1. Produktmålsetting	35
6.2. Rangering av viktige produkttegenskaper.....	36
6.3. Metriske grensespesifikasjoner	37
6.4. Metriske grovspefiseringer.....	38
6.5. Tidlige kostnadsvurderinger	40
7. Konseptutvikling.....	41
7.1. Funksjonsanalyse	41
7.2. Funksjonsalternativer.....	43
7.2.1. Belastningssystem.....	43
7.2.2. Opplagring	45
7.2.3. Festemekanisme.....	45
7.2.4. Overføre effekt/varierte hastighet	46
7.2.5. Motor.....	47
7.2.6. Registrering av brudd.....	48
7.2.7. Rotasjonsteller.....	49
7.2.8. Turteller.....	50
7.2.9. Oppstilling.....	51
7.3. Form- og estetikkalternativer	51
8. Konseptscreening og valg	52
8.1. Utvikling av seleksjonsmatrise	52
8.2. Egen konseptscreening.....	52
8.3. Foretrukne løsningsalternativer	58
9. Grovberegninger	61
9.1. Beregningsmålsettinger.....	61
9.2. Forutsetninger	62
9.3. Beregningstrinn.....	62
9.4. Materialer og tidlige styrkebetragtninger.....	65
10. Eksperttesting og eksterninput	66
10.1. Testmålsettinger	66
10.1.1. Hovedmål.....	66

Utvikling av roterende 4-punkts bøyeutmattingsmaskin

10.1.2. Delmål.....	66
10.2. Gjennomføring.....	66
10.3. Testpopulasjon.....	66
10.4. Resultater.....	67
11. Løsningsarkitektur.....	68
11.1. Helhetsoversikt.....	68
11.2. Basisrenderinger i 3D.....	69
11.4. Delkomponenter.....	73
11.5. Smådelar og standardkomponenter.....	75
12. Konstruksjonsoptimering og robusthet.....	77
12.1. FEM-analyse.....	77
12.2. Tiltak for robusthet og optimering.....	82
12.3. Sikkerhet.....	83
13. Produksjon og økonomi.....	84
13.1. Produksjonstrinn.....	84
13.2. Økonomi og kostnader.....	86
13.3. Serieproduksjon.....	88
14. Miljørendering og teknisk anvisning.....	89
14.1. Renderte framstillinger.....	89
14.2. Instruksjoner for øvelsesbruk.....	90
15. Prosessevaluering og diskusjon.....	93
15.1. Læring og kompetanseutvikling.....	93
15.2. Utredningsfasen.....	93
15.3. Utviklingsfasen.....	94
15.4. Konstruksjonsfasen.....	95
15.5. Ferdigstillingsfasen.....	95
16. Konklusjon.....	97
16.1. Resultater og anbefalinger.....	97
16.2. Videre arbeid.....	98
17. Kilder.....	99
17.1. Skriftlige kilder.....	99
17.2. Internettkilder.....	100

18. Vedlegg 103

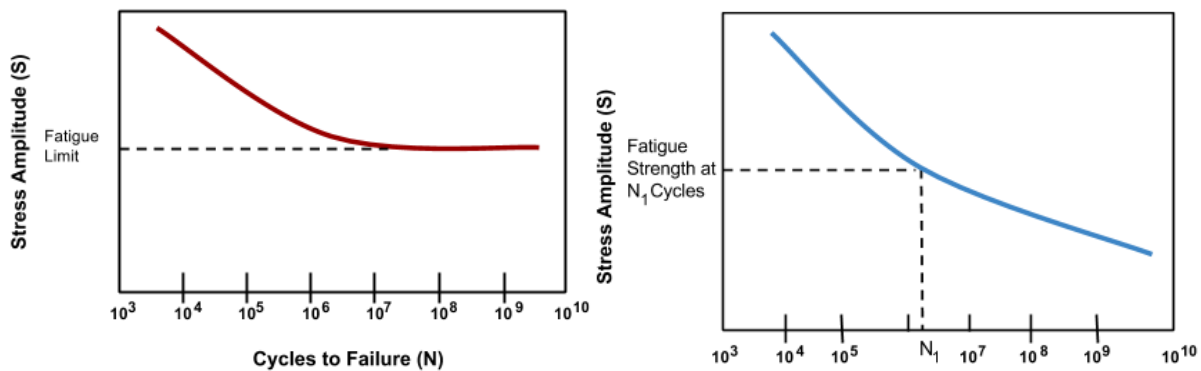
1. Innledning

I den første delen av denne rapporten settes rammene for arbeidet og oppgaven blir satt i et større perspektiv. Dette gjøres ved å se på tidligere arbeid på området og eksisterende løsninger på feltet. Videre blir det presentert en oppdragsbeskrivelse og potensielle problemstillinger som vil kunne oppstå.

1.1. Bakgrunn

Utmattingsbrudd er brudd i materialet som kan oppstå ved spenninger som er langt lavere enn materialets fasthetsverdier skulle tilsi. Dette skjer dersom en sprekke skulle initieres og deretter vokse over et stort antall belastningscykler. Når sprekken har vokst seg stor nok til at det resterende tverrsnittet ikke tåler spenningene vil man få et restbrudd.

Arbeidet med å forstå denne formen for brudd begynte på 1800-tallet, da flere oppdaget brudd i akslene på togvogner. Disse bruddene var vanskelige å forklare da de oppstod uten at det kunne observeres noen plastisk deformasjon, fordi spenningene var under flytegrensen. Jernbaingeniør August Wöhler bygger tidlig maskiner for testing av aksler med roterende bøye-påkjenninger, og konkluderer med at amplitudespenning og antall repetisjoner er avgjørende faktorer for når utmattingsbrudd vil oppstå. Han innførte også begrepet utmattingsgrense og arbeidet hans resulterte i Wöhler-kurven (S-N kurve).



Figur 1.1. Eksempel på S-N kurver. Til venstre for stål, til høyre for aluminium [1].

For å kunne unngå tilsvarende brudd i dynamisk belastede konstruksjoner må man teste ulike materialer og forstå levetiden ved ulike amplitudespenninger. Data fra utmattings testing kan plottes i en S-N kurve, slik som figurene ovenfor. Der plottes spenning (S) mot utmattingslevetid i antall spenningssyklus (N). Grafen til venstre viser en S-N-kurve for et materiale som flater ut ved det som kalles en utmattingsgrense. Denne oppførselen er typisk for blant annet jern og stål.

Andre materialer kan oppføre seg som vist i grafen til høyre der det ikke er noen tydelig utmattingsgrense. Dette gjelder for eksempel aluminiumslegeringer. S-N-diagrammene er nyttige

Utvikling av roterende 4-punkts bøyeutmattingsmaskin

verktøy når man dimensjonerer konstruksjoner som er utsatt for sykliske belastninger og kan brukes til å beregne forventet levetid.

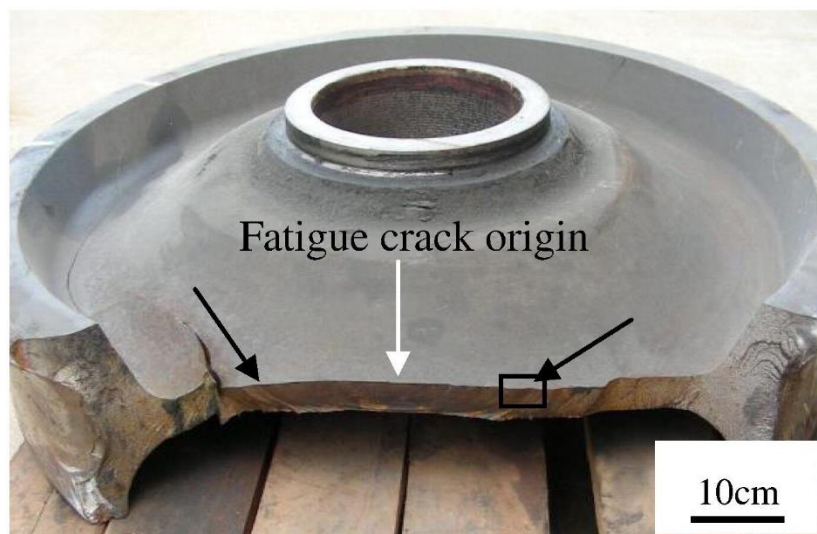
Fordi utmattingsbrudd kan starte i sprekker og materialfeil på mikroskopisk nivå er det en viss grad av tilfeldighet når det kommer til levetiden til en prøvestav ved materialtesting. Tilsynelatende identiske forsøk i godt kontrollerte omgivelser vil kunne gi ulike resultater og spredning i prøvedata. For å minimere faren for brudd benyttes en designkurve ved dimensjonering, der S-N-kurven er flyttet et visst antall standardavvik på konservativ side.

Utmattingsbrudd i konstruksjoner er fortsatt en stor problemstilling i dag. Opp mot 90% av brudd maskinkomponenter skyldes utmatting. Sprekkinitieringen kan starte på mikroskopisk nivå i kornstrukturen til materialet, eller på makroskopisk nivå i designelementer som gir spenningskonsentrasjoner. Sprekker kan også starte i overflateskader som riper og korrosjonsskader.

Jernbaneindustrien vært utsatt for mange ulykker forårsaket av utmattingsbrudd, helt fra 1800-tallet og fram til nyere tid. Både vognaksler og hjul er komponenter som på grunn av mange rotasjonssyklusler er utsatt for utmatting, noe man har sett eksempler på også i Norge på 2000-tallet. Havarikommisjonen mente at togulykken 1. oktober 2010 på Skotterud skyldtes utmattingsbrudd i et gammelt hjul. En delvis avsporing resulterte i 36 skadde, to av disse alvorlige [2].



Figur 1.2. Ulykke forårsaket av utmattingsbrudd i toghjul [3].



Figur 1.3. Viser sprekkvekst som resulterte i utmattingsbrudd i toghjul [4].

Interne komponenter i motorer, som veivaksler, er andre eksempler på komponenter som er utsatt for roterende utmatting. Veivaksler vil være påkjent både bøye- og torsjonsspenning.



Figur 1.4. Utmattingsbrudd i veivaksel. Bildet viser tydelige striasjoner som er resultat av vekslende belastning og sprekkvekst [5].

1.2. Sentrale aktører

I Norge finnes det flere aktører som tilbyr materialtesting. Dette inkluderer DNV, Kiwa Teknologiske Institutt og SINTEF. Å gjennomføre materialtesting kan være aktuelt for leverandører av råmaterialer og mekaniske deler for å kvalitetssikre produktet. Innkjøp eller produksjon av egne testmaskiner er kostbart, og det vil i de fleste tilfeller være kostbesparende å leie inn tjenester for materialtesting. Verifiserte testresultater fra troverdige aktører kan også fungere som et kvalitetsstempel på et produkt.

1.3. Tidligere arbeid på området

I 2021 gjennomførte Christian Rivas en masteroppgave på «Utvikling av en roterende bøyeutmattings-maskin». Designet fra dette arbeidet oppnådde ikke å få konstant bøyemoment over prøvestavens lengde. Denne konstruksjonen tilfredstilte derfor ikke kravene til oppdragsgiver ved NMBU.

1.3.1. Standarder

For å oppnå tilfredsstillende moment over hele prøvestaven vil det i denne oppgaven tas utgangspunkt i standarden ISO 1143 fra start. Denne standarden spesifiserer metoden for utmattningstesting av roterende staver utsatt for bøyemoment. Standarden gir råd om utforming av prøvestav og spesifiserer 1-punkts, 2-punkts og 4-punkts belastning.

Den mest brukte metoden for utmattningstesting er med konstant amplitude aksialkraft testing som beskrevet i ASTM E466 eller ISO 1099, og regnes som den mest anerkjente metoden. Problemet er at disse maskinene er svært kostbare og testene tar lang tid fordi frekvensen er begrenset til maks 10-25 Hz.



Figur 1.5. Eksempel på aksiell utmattingsmaskin [6].

Løsningen er derfor roterende utmattingsprøving, som detaljert i DIN 50113 og ISO 1143. Denne metoden har eksistert siden 1800-tallet og kalles også R.R. Moores metode. Med disse maskinene kan frekvensen komme opp mot 100 Hz og kostnaden er typisk på 20-25% av en aksiell maskin. Studier har også vist at med nøye håndtering av prøvestaver er det mulig å korrelere data fra de to metodene [7].

1.4. Oppdragsbeskrivelse

Oppdragsbeskrivelsen er basert på behov i tilknytning til material- og maskindellaboratoriene ved NMBU for en testmaskin for 4-punkts roterende bøyeutmattning. Behovene er knyttet både til undervisning på Master- og PhD-nivå, gradsoppgaver, samt fremtidige FoU-opdrag. Maskinen skal utvikles, konstrueres og designes etter foreskrevne standarder for testing av roterende bøyeutmattning, og den skal utvikles for å kunne gi konstant bøyemoment over prøvestaven.

Konstruksjonen skal inneholde motor, et innfestingssystem for prøvestaven og et belastningssystem. Turtallet bør være minst 3000 o/min og skal konstrueres for en standardstav. Maskinen må også ha et tellesystem som angir antall rotasjoner før staven går til brudd.

Øvrige momenter som inngår i dimensjoneringen og valg av komponenter:

- Valg av design og ytre mål for maskinen.
- Valg av motor.
- Valg av innfestingsforbindelser.
- Valg av tellesystem.
- Kartlegge hvilke standarder som gjelder.
- Styrkeberegninger av maskinen.

I tillegg skal det gjøres rede for materialvalg for hovedkomponenter og en kostnadsanalyse skal gjennomføres. Til slutt skal det også utformes en praktisk bruks- og øvelsesbeskrivelse for utmattingsrigger med laboratorieoppgave for studenter som skal kunne benyttes i kurssammenheng, samt for demonstrering og opplæring i maskinens virkemåte.

Alle fasene av masterprosjektarbeidet skal dokumenteres i en rapport og resultatene skal presenteres muntlig.

1.5. Problemstillinger og flaskehals

Dette delkapittelet gjør rede for de sentrale problemstillinger som skal løses, samt de teknologiske flaskehals og utfordringer som vil oppstå i løpet av arbeidet.

1.5.1. Problemstillinger og fokuspunkter

Følgende punkter er problemstillinger og fokuspunkter:

- Få oversikt over tidligere arbeid og eksisterende løsninger for å identifisere viktige design-elementer og mulige forenklinger.
- Finne ut hvilke standarder som er aktuelle for prosjektet og tiltak for å sikre tilstrekkelig nøyaktighet for resultater.
- Utarbeide spesifikasjoner for konstruksjonen og sentrale funksjoner, og hvilke komponenter som skal kjøpes inn og produseres.

Utvikling av roterende 4-punkts bøyeutmattingsmaskin

- Løsning for lastpåføring som bygger opp under viktige egenskaper for konstruksjonen og oppfyller tekniske krav.
- Sørge for god brukervennlighet, samtidig som nødvendige sikkerhetstiltak blir innført.

1.5.2. Teknologiske flaskehalsar og utfordringer

Følgende punkter anses som utfordringer og flaskehalsar for prosjektet:

- Å få oversikt over aktuelle standarder kan være en utfordring da det er mange som vil kunne være aktuelle for prosjektet. Standardene er også ofte utformet og formulert svært teknisk og kan være vanskelig å forstå eller tolke.
- Velge ut elektriske komponenter som gir nøyaktighet og brukervennlighet, slik at man kan få repeterbare og robuste resultater.
- Oppdragsbeskrivelsen og ISO 1143 krever ren bøyespenning i prøvestaven, men dette vil være en utfordring å oppnå i praksis. Deformasjoner i ulike deler vil kunne gi skjær- og normalspenninger, og friksjon i lagre kan gi torsjonsspenninger.
- Det må designes en løsning som sørger for sikkerheten til brukere og «publikum», samtidig som maskinens funksjon er synlig og oversiktlig av utdanningshensyn.
- Kostnader for innkjøp og produksjon må være tilstrekkelig lav for at maskinen skal kunne produseres ved NMBU.

2. Prosjektplanlegging

Prosjektplanleggingen gjennomføres for å forutse trinn i arbeidet og sette tidsmessige rammer. Klare mål og delmål er viktig for å god framgang med masterarbeidet og gir grunnlaget for en arbeidsplan og milepæltabell med datoer. Nødvendige avgrensninger for oppgaven blir også satt for å gjøre det mulig å gjennomføre oppgaven innenfor gitte tidsrammer.

2.1. Prosjekt målsettinger

Tydelige mål settes tidlig i masterprosjekt for å kunne styre arbeidet i riktig retning fra start. Konkrete målsettinger er kritisk for å kunne sette opp en god tidsplan og måle framgangen underveis.

2.1.1. Hovedmål

Følgende hovedmålsetting er formulert for dette mastergradsprosjektet:

Å utvikle, konstruere og designe en maskin for laboratorietesting for 4-punkts bøyeutmattingsmaskin. Konstruksjonen skal kunne gi konstant bøyemoment over en standard prøvestav. Alle trinn i utviklings-, dimensjonerings- og konstruksjonsarbeidet skal rapporteres med tilhørende tegninger og tekniske anvisninger.

2.1.2. Delmål

For å sikre god fremgang i prosjektet er det konkretisert 7 mindre delmålsaktiviteter som bygger opp under oppfylning av hovedmålet.

1. Legge rammer rundt oppgaven og planlegge prosjektet med mål, arbeidsplan og begrensninger.
2. Gjøre rede for relevant metodikk og grunnlagsteori, samt eksisterende teknologi.
3. Gjennomføre produktspesifisering og identifisere viktige produkttegenskaper, og deretter finne ulike løsningsalternativer. Gjennomføre screening av løsningsalternativer og konseptvalg.
4. Beregne og dimensjonerer valgt løsning og grunnberegninger. Designe helhetsarkitektur i 3D, med maskinens hovedkomponenter, samt innkjøpte komponenter.
5. Gjøre rede for materialvalg og verifisering av beregninger med FEM-analyse og eksterntesting.
6. Bestemme produksjonsmetode og utvikle en kostnadsanalyse for produksjon.
7. Gjennomføre prosessevaluering av prosjektarbeidet og ferdigstille rapport. Forberede presentasjon av rapporten.

2.2. Tids- og arbeidsplan med milepæler

Tabellen viser arbeidsplanen for når det er planlagt å jobbe med de ulike delene av prosjektet. Viktige milepæler er markert med X i den uka de skal være gjennomført. Tidsplanen skal brukes gjennom arbeidet for å disponere tiden riktig og sørge god framgang av de ulike fasene av prosjektet.

Tabell 2.1. Arbeidsplan med oversikt over aktiviteter i prosjektarbeidet og når disse skal arbeides med. Milepæler er markert med X når disse skal være gjennomført.

	Uke																		
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
1. Innledende			X																
Bakgrunnsutredning																			
Prosjektplanlegging																			
2. Metodikk og teori							X												
Metodebeskrivelse																			
Grunnlagsteori																			
Teknologiutredning																			
3. Konsept											X								
Produktspesifisering																			
Konseptgenerering																			
Konseptvalg																			
4. Beregning														X					
Dimensjonering																			
Konstruksjon																			
5. Verifisering																			
Materialvalg																			
FEM-analyse																			
Eksterntesting																			
6. Produksjon																			
Produksjonsmetoder																			
Kostnadsanalyse																			
7. Avsluttende																			X
Prosessevaluering																			
Ferdigstilling																			

Markert i gult er uke 15, som er planlagt påskefri. Arbeidsplanen er et foreløpig anslag på hvor lang tid ulike deler av arbeidet vil kunne ta, og det vil derfor gjøres løpende justeringer og tilpasninger underveis.

Milepælanvisningen på neste side er basert på de samme milepæler som tabellen ovenfor og inkluderer de datoene hver milepæl skal være nådd. Dette setter en spesifikk dato for hver av milepælene og er med på å sette egne tidsfrister for de ulike aspektene av utviklingsarbeidet og rapporteringen av dette.

Tabell 2.2. Milepæloversikt med dato for nådde milepæler.

Milepæl	Dato
1. Bakgrunn for prosjektet er gjennomgått og prosjektplanlegging er gjennomført	02.02.2022
2. Metodikk og grunnlagsteori er gjort rede for og eksisterende teknologi gjennomgått	25.02.2022
3. Viktige egenskaper og spesifikasjon av produkt er gjennomgått. Ulike løsningsalternativer er presentert og screenet. Konsept er valgt	25.03.2022
4. Grunnberginger og dimensjonering er gjort samt modellering i 3D.	08.04.2022
5. Materialvalg og FEM-analyse er gjennomført.	25.04.2022
6. Det er gjort rede for produksjonsmetoder og kostnadsanalyse for produksjon.	02.05.2022
7. Prosessevaluering er gjort og rapporten er ferdigstilt.	13.05.2022

2.3. Tidlige begrensninger for arbeidet

På grunn av de tidsrammene man har rundt en masteroppgave blir der satt tidlige begrensninger for arbeidet for å sikre at oppgaven kan bli ferdigstilt i tide. En masteroppgave med omfang på 30 studiepoeng har en forventet arbeidsmengde på mellom 750 og 900 bruttotimer.

Derfor settes følgende begrensninger for arbeidet:

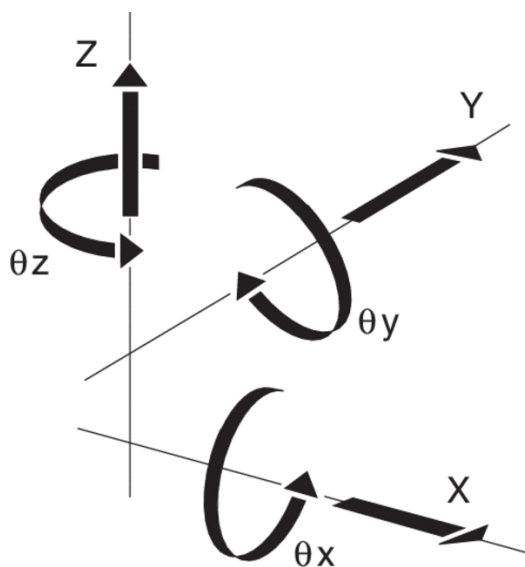
- Elektronikk og utstyr til databehandling vil bare bli behandlet som systemlayout og ikke utviklet i dybden.
- Nøyaktig utforming av sikkerhetsskjerming vil ikke bli gjennomført.
- Sveis- og skrueforbindelser vil ikke bli dimensjonert eller kontrollert.
- Ingen utmattingsberegninger eller levetidsanalyser for konstruksjonen vil bli gjennomført.
- I utvikling av løsningsarkitekturen vil det fokuseres på utformingen av hovedkomponenter og sammenstillingen av disse.
- Det vil ikke gjennomføres prototyping av produktet.
- Ingen detaljert bruksmanual vil utformes.

3. Metodebeskrivelse

Begreper metodikk betyr ordnet arbeidsmåte eller prosedyre. Metodekapittelet skal gi oversikt over begreper, symboler og formler som brukes i rapporten. I tillegg blir det kartlagt de metoder og løsningsverktøy som blir brukt både for å komme fram til gode løsninger og rapportere arbeidet med prosjektet.

3.1. Terminologi og begreper

Figuren under definerer positiv akseretning og rotasjonsretning som er brukt i beregninger senere i rapporten.



Figur 3.1. Definisjon på positiv retning og rotasjon i aksesystem [8].

Tabell 3.1. Betydning av begreper benyttet i oppgaven.

Begrep	Forklaring
SI	Système International d'unités, det internasjonale enhetssystemet
CAD	Computer Aided Design, dataassistert design
CAE	Computer Aided Engineering, dataassistert konstruksjon
CAM	Computer Aided Manufacturing, dataassistert produksjon
FEM/FEA	Finite Element Method/Analysis, elementmetoden
Mesh	Nettverk av elementer benyttet i FEM-analyser
AC	Alternating Current, vekselstrøm
DC	Direct Current, likestrøm
HMS	Helse, miljø, sikkerhet
CNC	Computer Numerical Control, datastyrt maskinering

Utvikling av roterende 4-punkts bøyeutmattingsmaskin

Tabell 3.2. Hovedsymboler som vil benyttes og tilhørende SI-enhet.

Symbol	Beskrivelse	SI-enhet
l	Lengde	mm
b	Bredde	mm
h	Høyde	mm
A	Areal	mm^2
D/d	Diameter	mm
R/r	Radius	mm
m	Masse	kg
F	Kraft	N
M	Moment	Nm
M_b	Bøyemoment	Nm
M_v	Vridemoment	Nm
σ	Spenning	MPa
σ_b	Bøyespenning	MPa
σ_{jf}	Jevnførende spenning	MPa
σ_{till}	Tillatt spenning	MPa
τ	Skjærspenning	MPa
τ_t	Torsjonsspenning	MPa
W_b	Motstandsmoment ved bøyning	mm^3
W_p	Polar motstandsmodul	mm^3
R_e	Flytegrense	MPa
R_m	Strekkefasthet	MPa
n_e	Sikkerhetsfaktor mot flyt	-
n_b	Sikkerhetsfaktor mot brudd	-
N	Antall lastvekslinger	-

Tabell 3.3. Hovedformler som blir brukt til beregninger.

Beskrivelse	Formel	Indeks
Spenning, strekk/trykk	$\sigma = \frac{F}{A}$	3.1
Bøyemoment	$M_b = F \cdot l$	3.2
Bøyespenning	$\sigma_b = \frac{M_b}{W_b}$	3.3
Skjærspenning	$\tau = \frac{F}{A}$	3.4
Torsjonsspenning	$\tau_t = \frac{M_v}{W_p}$	3.5
Jevnføringsspenning, von Mises	$\sigma_{jf} = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2}$	3.6
Tillatt spenning	$\sigma_{till} = \frac{R_m}{n_b}$	3.7

3.2. Metodebruk og løsningsverktøy

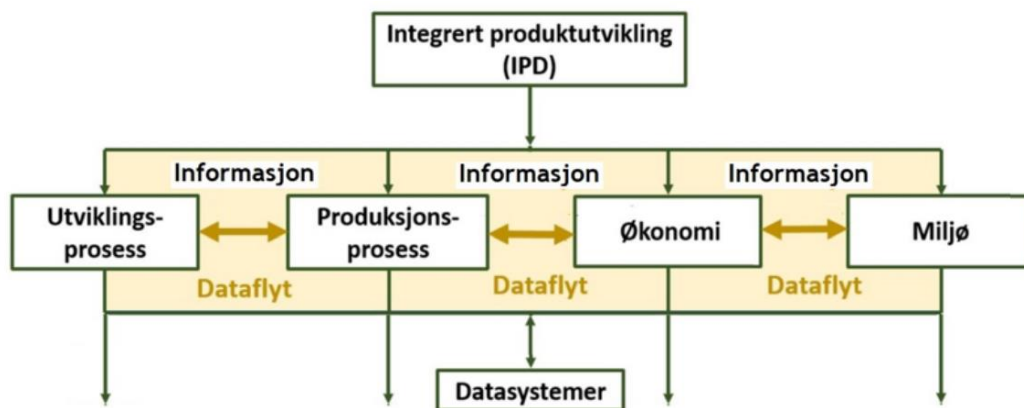
I dette delkapittelet gjennomgås de metoder og løsningsverktøy som benyttes gjennom masterprosjektet. Hjelpemidlene bidrar til systematisk og effektivt arbeid og at det er gjennomgående god kvalitet på arbeidet.

IPD [9, 10]

Integrert produktutvikling (Integrated Product Development) er en utviklingsmetode som benyttes i konseptutvikling og produktrealisering. Hensikten er å sikre at utviklingsprosessen gjennomføres på en strukturert måte, med fokus på tverrfaglighet og god kommunikasjon. Det skiller seg fra tradisjonell ingeniørtilnærming ved å fokusere på økonomi og markedsaspekter tidlig i prosessen, samtidig som kontinuerlig læring og forbedring er til stede i alle trinn. IPD kan sees på som en bruksanvisning der de tradisjonelle IPD-trinnene kan oppsummeres i 11 punkter:

1. Kartlegging av kundens krav og behov i markedet.
2. Planlegging og styring av produktutviklingsprosessen.
3. Bruk av produktutviklingsgrupper og teamarbeid.
4. Integrasjon av prosessdesign.
5. Styring av prosjektkostnadene fra starten.
6. Involvering av leverandører og underleverandører tidlig i prosessen.
7. Utvikling av robuste design.
8. Integrasjon av CAE, CAD, CAM og relevante dataverktøy i utviklingsprosessene.
9. Datasimulering av produktets egenskaper og framstillingsprosessen.
10. Generering av en mest mulig effektiv tilnærming til utviklingsarbeidet.
11. Kontinuerlig forbedring av utviklingsprosessene.

Fakultet for realfag og teknologi ved NMBU (Realtex) har tatt i bruk en forenklet modell med et ekstra hensyn til HMS, sammen med de tre tradisjonelle IPD-hovedelementene.



Figur 3.2. Oversikt over IPD-prosessen fra NMBU [11].

IPPD [12, 13]

Integrert produkt- og prosessutvikling (Integrated Product and Process Development) er en videreutvikling av IPD med mer vekt på prosess og kunde. For å oppnå høyest mulig kvalitet og effektivitet benyttes tverrfaglige grupper (IPT, Integrated Product Teams). IPPD kan oppsummeres i 8 hovedprinsipper:

1. **Kundefokus:** Hovedfokuset er å identifisere kundens behov og oppfylle disse.
2. **Parallell utvikling av produkt og prosess:** Ved å utvikle produkt og prosess samtidig vil disse kunne påvirke hverandre og utfordringer vil oppdages tidligere. Dette vil spare tid og kostnad i utviklingsprosessen.
3. **Tidlig og kontinuerlig planlegging av livssyklus:** Planlegging for produktets levetid bør begynne tidlig i utviklingen og fortsette gjennom hele prosessen.
4. **Maksimal fleksibilitet for å optimalisere bruk av leverandører:** Maksimere fleksibilitet for å legge til rette for hurtige endringer og integrering av IPPD-prinsipper i alle ledd.
5. **Robust design og fleksible prosesser:** Robust design sørger for god kvalitet i produktet som er lite sensitiv for variasjon i produksjonsprosessene. Prosessene bør alltid være i kontinuerlig forbedring og benytte seg av smidige konsepter.
6. **Tverrfaglig samarbeid:** Tverrfaglig samarbeid er kritisk for å kunne integrere produkt- og prosessutviklingen. Team-medlemmer må forstå sin rolle i teamet og begrensinger til andre medlemmer for å kunne støtte opp om disse.
7. **Integrert styring og beslutningstaking:** Beslutninger bør fattes på lavest mulig nivå for å styrke de individuelle gruppene og fordele ansvar.
8. **Proaktiv identifisering og håndtering av risiko:** Ved å forutse risiko og eventuelle utfordringer tidlig vil man kunne planlegge for kostnader knyttet til disse.

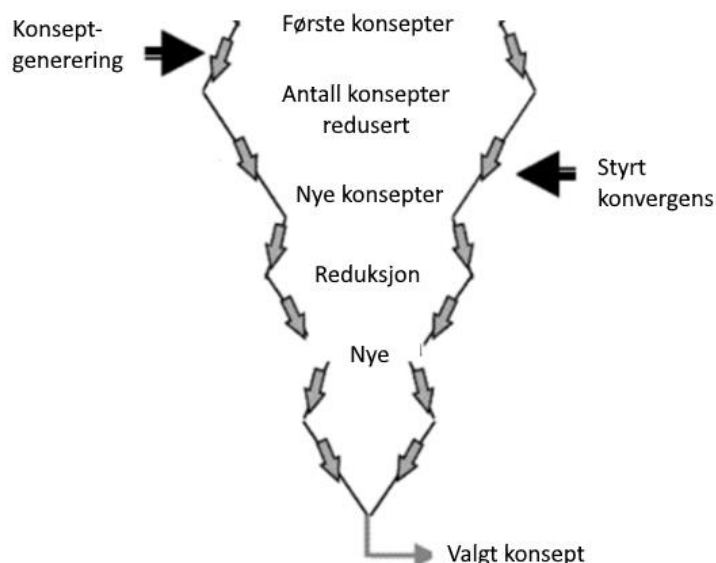
Pughs metode [14]

Pughs utviklingsmetodikk er utviklet av Stuart Pugh, som han selv kalte «Total design». Hensikten med metoden er å sørge for gode avgjørelser gjennom ulike deler av en utviklingsprosess. Metoden brukes i produktutviklingen for å gjøre idé- og konseptvalg, og består av 3 hoveddeler:

1. Designkjernen – Kartlegging av kundens behov og markedsbetraktning.
2. Produktspesifisering – Utvikling av metriske spesifikasjoner for produktet.
3. Konseptvalg – Konseptvalg gjennom styrt konvergens.

Konseptvalget skal gjennomføres på en mest mulig objektiv og kvalitativ måte hvor potensielle løsninger sammenlignes i evalueringsmatriser. Ulike kriterier blir vektet ut fra viktighet og hvert konsept blir gitt en karakter i hvert kriterium. Dårlige løsninger kan på denne måten bli plukket ut, samtidig som nye løsningsforslag blir introdusert. Til slutt sitter man igjen med det som mest sannsynlig er den objektivt beste løsningen. Dette er prosessen som kalles styrt konvergens.

Utvikling av roterende 4-punkts bøyeutmatningsmaskin



Figur 3.3. Visualisering av styrt konvergens ifølge Pughs metodikk. Omarbeidet fra [9].

QFD [15]

Quality Function Deployment (QFD) er et utviklingsverktøy som fokuserer på å oppnå høyere kvalitet basert på brukerkrav og tekniske spesifikasjoner. Fokuset på kundens behov er sentralt i QFD-metoden. Den kan fordeles inn i fire trinn som brukes i utviklingsprosessen:

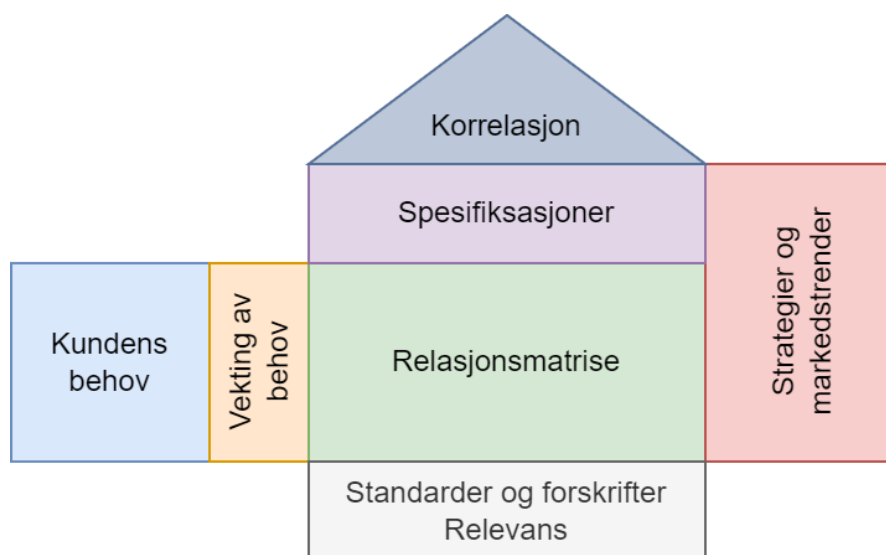
1. Produktdesign
2. Identifikasjon av kritiske komponenter og funksjoner.
3. Prosessdesign.
4. Prosess- og kvalitetskontroll.

Kvalitetshuset (House of Quality) er en systematisk samling av QFD i matriseform. Dette ble først utviklet av japanske Mitsubishi, og danner et verktøy som gjør det lettere å benytte seg av QFD i praksis. Ved bruk av matrisen er målet å utvikle et produkt som best tilfredsstillende behov fra kunder og oppdragsgiver, samtidig som det oppfyller tekniske krav fra standarder.

Etter Mitsubishis suksess med å oppfylle kundebehov ved bruk av QFD spredte metoden seg videre til Toyota og andre bilprodusenter. Senere ble QFD benyttet i andre industrier der høyteknologiske løsninger utgjør en viktig del av industrien. Fordi kvalitetshuset er utviklet for å løse ingeniørbaserte utfordringer for å møte kundenes behov og forventninger har det gitt gode markedsfordeler for de bedriftene som har tatt metoden i bruk.

Utvikling av roterende 4-punkts bøyeutmattingsmaskin

Figuren nedenfor viser en grafisk utforming av kvalitetshuset der de ulike aspektene er bygd opp som ulike rom i et hus. Det viktigste rommet i huset er i midten, der de ulike behovene og kravene veies opp i en relasjonsmatrise.



Figur 3.4. Delene av kvalitetshuset visualisert i matriseform.

SCAMPER [16]

SCAMPER er en kreativ metode som kan benyttes for å finne fram til nye løsningsalternativer. Metoden kan anses som er liste med punkter man kan jobbe seg gjennom, og dermed kunne se problemet fra nye perspektiv. SCAMPER er spesielt nyttig dersom man opplever å ha kjørt seg fast kreativt. Da kan metoden være med på å starte prosessen med å komme fram til nye ideer. Tankesettet kan benyttes i utviklingsprosessen til nye produkter, nye funksjoner til eksisterende tjenester eller nye forretningsmodeller.

Tabell 3.4. Bokstavene i SCAMPER står for:

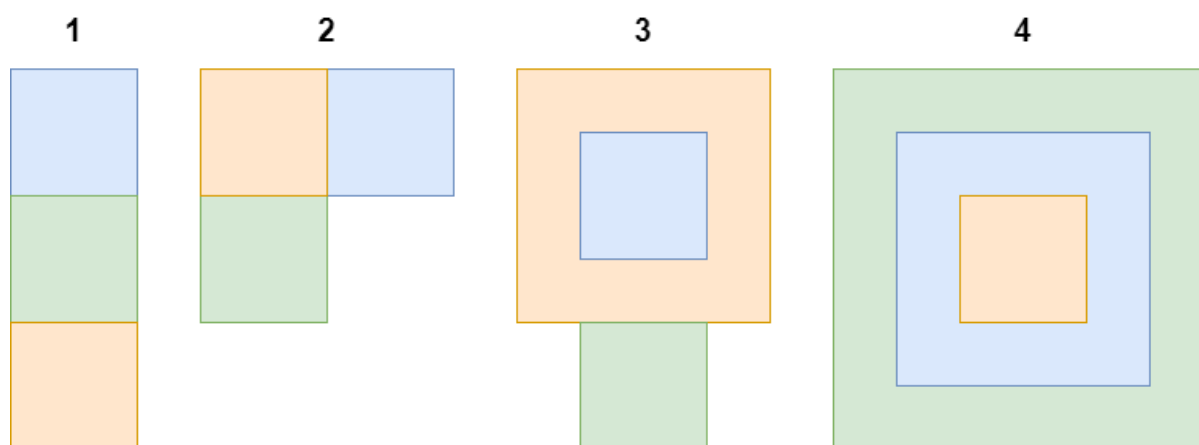
S ubstitute	Erstatte	Bytte ut elementer, materialer eller bruksområde.
C ombine	Kombinere	Kombinere med et annet produkt eller konsept.
A dapt	Tilpasse	Tilpasse produktet til et annet bruksområde
M odify	Modifisere	Endre form og utseende, fremheve enkelte kvaliteter
P ut to other uses	Bruke til noe annet	Benyttet produktet i nye settinger eller industrier.
E liminate	Eliminere	Fjerne unødvendigheter, forenkle
R everse	Reversere	Reversere prosessen, vurdere motsetninger

Etter å ha jobbet seg gjennom SCAMPER-listen er målet at man sitter igjen med gode løsninger slik at kvaliteten på sluttproduktet blir så god som mulig.

Modularisering [17]

Modularisering brukes for å undersøke ulike sammensetninger av ulike elementer og komponenter i et produkt. Ved å utnytte symmetri og standardiserte deler kan man forenkle produksjon, vedlikehold og logistikk. Det vil også åpne for videreutvikling ved at komponenter kan benyttes i andre produkter, og på denne måten danne en produktlinje med felles egenskaper.

Ved å bruke modularisering ser man på sammensetningen av produktelementer og deres orientering i rommet i forhold til hverandre. Dette vil også si at man ser på muligheter ved å kjøpe inn enkelte komponenter fra andre leverandører, og hvilke komponenter man skal produsere. Man kan sette sammen moduler lineært, perpendikulært, delvis integrert og helt integrert, slik som vist på figuren nedenfor.



Figur 3.5. Modularisering illustrert: 1) Lineær modulsammensetning, 2) perpendikulær sammensetning, 3) delvis integrert sammensetning, 4) helt integrert sammensetning.

Programvare

Tabell 3.5. Oversikt over programvare som er benyttet i arbeidet med masteroppgaven og utviklingsprosessen.

Program	Versjon	Bruksområde
Microsoft Word	2201	Tekstbehandling
EndNote 20	20.2.1	Kildehenvisning
draw.io	16.5.1	Figurer og diagrammer
paint.net	4.3.10	Omarbeiding av figurer
SolidWorks	2020	3D-modellering og CAD
ANSYS Workbench R2	2020	FEM-analyse

3.3. Kvalitetssikring

Litteratur og kilder

Det vil bli lagt vekt på bruk av fagbøker og vitenskapelig publisering med kvalitetssikring gjennom forlag eller fagfellevurdering (Peer Review). Nettkilder vil bli ettergått med hensyn til kildekvalitet så langt dette er mulig. Illustrasjoner som ikke er utstyrt med kildereferanser vil være egenproduserte.

Rapporten vil bli kontrollert og språkvasket. Referanser, tabellnummerering, figurnummer, formelnummer, sidetall og beregninger blir egen-kontrollert og av eksternt part.

Standarder

NS/EN/ISO9000 og spesielt tankegangen i NS/EN/ISO9001 (Kapittel 7 (2000-versjon) og Kapittel 8 (2015-versjon)) skal benyttes i prosessplanlegging og prosessevaluering.

Tekniske tegninger vil bli utført i SolidWorks og følger dermed i prinsippet tilrådingene i NS/EN/ISO128.

NS/EN/ISO1143 vil bli benyttet som grunnlag for å forstå hvordan man oppnår ønskelig bøyemomentfordeling over prøvestaven under roterende bøyeutmattingsstesting.

NS/EN/ISO12107 vil legge grunnlaget for statistisk planlegging og databehandling for utmattingsforsøk.

Forskrifter

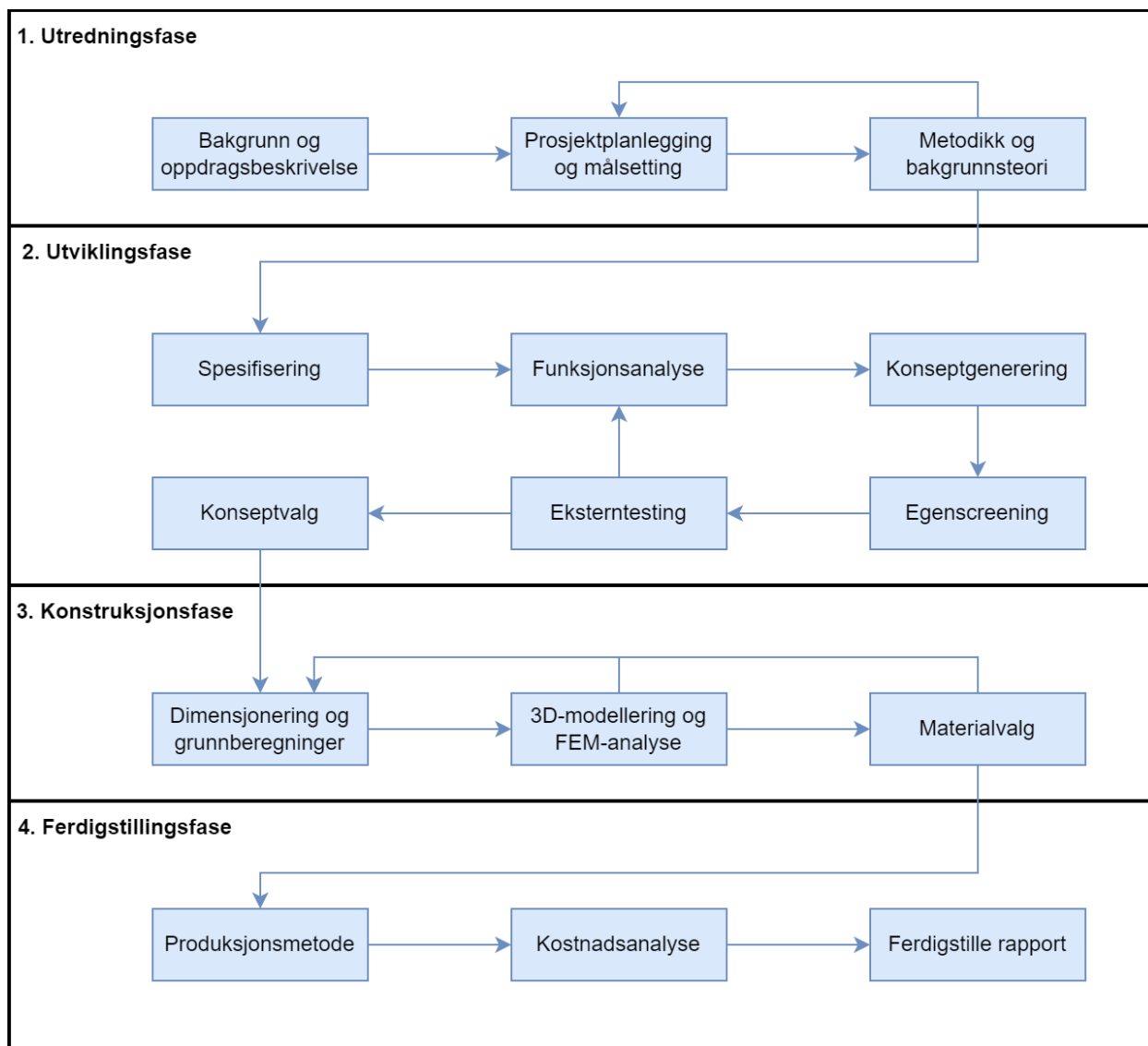
Forskrift for maskiner (Maskinforskriften) gjelder ved konstruksjon, bygging og omsetning av maskiner og lignende produkter [18]. Den gjelder derimot ikke for maskiner konstruert og bygd spesielt til forskningsformål beregnet for midlertidig bruk i laboratorier.

Fordi universitetet vil være ansvarlig for studenter og ansattes sikkerhet ved bruk av maskinen vil det være et behov for å følge maskinforskriften. Dette vil si at det må integreres sikkerhetstiltak som nødstop, skjerming av roterende elementer og annen generell teknisk sikkerhet.

3.4 Prosesstrinn

Prosesdiagrammet på neste side viser de ulike fasene i prosjektarbeidet. Hensikten er å bli bevisst på utviklingstrinnene og hvordan disse er avgrenset. Piler som er lagt inn viser hvordan ulike elementer i prosessen påvirker hverandre og at enkelte aktiviteter har tilbakevirkende effekt for å sikre forbedring i tidligere arbeid. De tilbakevirkende pilene er med på å illustrere hvordan kontinuerlig forbedring er en del av prosessen.

Utvikling av roterende 4-punkts bøyeutmatningsmaskin



Figur 3.6. Prosessdiagrammet viser trinnene i utviklingsprosessen. Arbeidsmetoden baseres på tankegang fra NS/EN/ISO9001 og IPD der man alltid søker kontinuerlig forbedring av utviklingsprosessene, noe som illustreres av de tilbakevendende pilene.

4. Teori og teknologiutredning

I teoridelen gjøres det rede for utmatting som fenomen og annen relevant teori som gir grunnlag for den utviklingen som utføres senere i prosjektet. Gjennom en teknologiutredning vil det bli gitt en oversikt over teknologi som er relevant i konstruksjonen av en utmattingsmaskin, samt en gjennomgang av mekanismer og prinsipper benyttet av eksisterende maskiner.

4.1. Grunnlagsteori

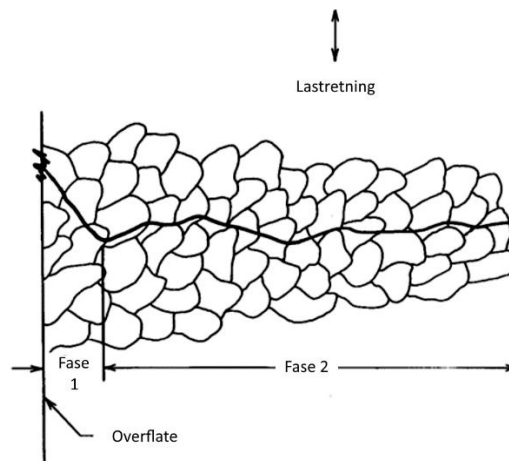
Utmatting er initiering og vekst av sprekker i et materiale som skyldes periodisk vekslende spenning. Dersom spenningen materialet utsettes for er av tilstrekkelig størrelse vil sprekken fortsette å vokse inntil det blir totalt brudd. Spenningene som gir utmattingsbrudd er likevel ikke over materialets strekkfasthet, og ofte også lavere enn flytegrensen.

Mekanismene bak utmattingsbrudd kan deles inn i tre steg:

- Sprekkinitering
- Sprekkvekst (fase 1 og fase 2)
- Restbrudd

Ved sprekkiniteringen begynner det med dannelse av sprekker, ofte ved spenningskonsentrasjoner ved kjerver. I begynnelsen vokser sprekken sakte langs glideplan i kornstrukturen. Sprekkene vil følge det glideplanet der det er størst skjærspenning, som i tilfeller ved en akset strekk vil være 45 grader på påført strekkspenning.

Når sprekken vokser seg stor nok vil den begynne å fungere som en kjerv som gir spenningskonsentrasjon, og da går sprekkveksten over i fase 2. Her vokster sprekken normalt på strekkspenningen. I fase 2 vokster sprekken raskere. Når det resterende tverrsnittet er for lite til å tåle den påførte kraften vil man få ustabil brudd. Figuren nedenfor illustrerer sprekkveksten i fase 1 og fase 2.



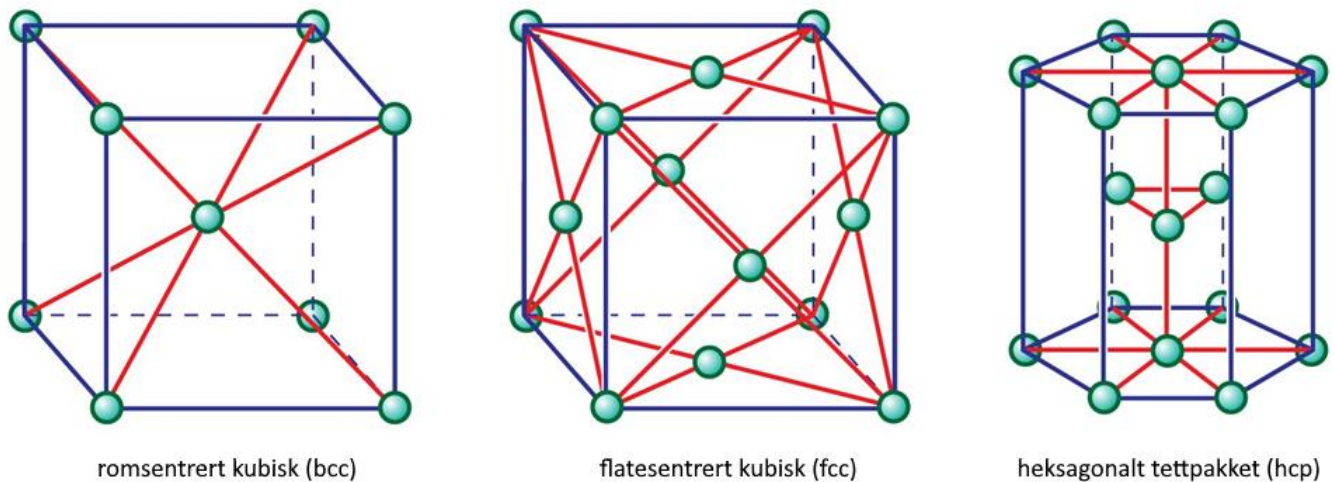
Figur 4.1. Viser sprekkvekst i kornstrukturen til materialet og overgangen fra sprekkvekst fase 1 og fase 2. Omarbeidet fra [19].

Krystallstruktur

Både metaller og andre materialer er bygget opp av atomstrukturer av repeterende mønster. Atomene i disse krystallstrukturene kan være både ioniske og kovalente. I denne rapporten fokuseres det på ioniske bånd som bygger opp metaller, fordi det ofte er metaller som er utsatt for utmattingsbrudd og fordi metoder for beregning av utmattingslevetid er basert på metaller.

Krystallstrukturen i metaller følger nesten alltid en av tre repeterende mønstre, eller enhetsceller. Disse er BCC (Body Centered Cubic, romsentrert kubisk), FCC (Face Centered Cubic, flatesentrert kubisk) og HCP (Hexagonal Close Packed, heksagonalt tettpakket). Enhetscellene er tredimensjonale gittermønstre, og de fører til varierende materialegenskaper i forskjellige retninger.

Eksempler på metaller i hver av enhetscellene er: jern (BCC), aluminium (FCC) og titan (HCP).

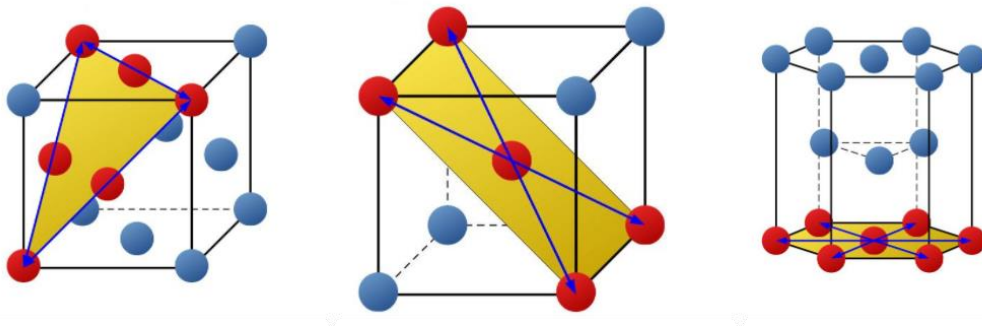


Figur 4.2. Skisser over de tre vanligste enhetscellene for metaller. Omarbeidet fra [20].

Glideplan

På grunn av lokale stresskonsentrasjoner i materialet vil små ujevnheter begynne å oppstå, kanskje bare noen atomer om gangen. Dette medfører at atomer vil gli langs sine foretrukne glideplan. Med glideplan menes et plan der dislokasjon kan skje ved at nærliggende atomer forskyves i forhold til hverandre. Hvilken enhetscelle metallet er bygget opp av påvirker i hvilken retning glidning enklest kan foregå. Glidning i krystallstrukturen vil medføre plastisk deformasjon i materialet.

Hver av de 3 formene for enhetsceller har flere aktuelle glideplan hver. Figuren på neste side viser ett eksempel på mulig glideplan for enhetscellene.

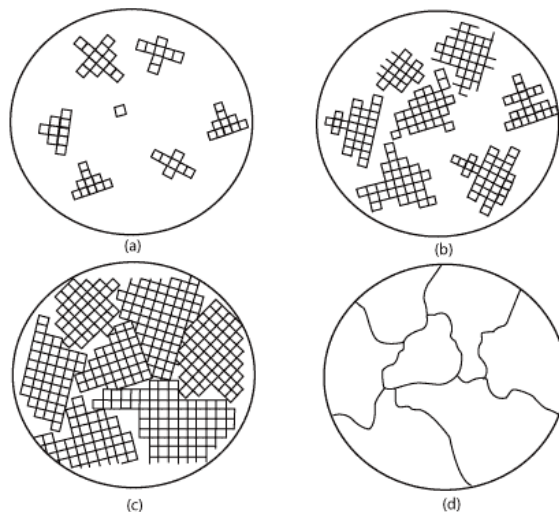


Figur 4.3. Eksempler på mulige glideplan i ulike enhetsceller: BCC (til venstre), FCC (i midten) og HCP (til høyre) [21].

Det er disse ujevnheterne på mikroskopisk nivå som gir opphav til sprekker, som igjen kan føre til utmattingsbrudd. Det er altså spenningskonsentrasjoner som opptrer langs disse foretrukne glideplanene som gir plastisk deformasjon, og påvirker hvordan materialet i en komponent reagerer på ytre belastninger.

Kornstruktur

Selv om metaller er krystallinske er de ikke bygget opp av en enkelt krystall som strekker seg gjennom hele materialet. Metaller er som oftest polykrystallinske, som betyr at det består av mange krystallkorn. Når metaller størkner vil det oppstå individuelle krystaller på ulike steder i materialet til samme tid. Da dannes det flere krystaller eller korn som vil fortsette å vokse fra tilstøtende atomer som er i væskeform. De ulike kornene vil ha tilfeldige og ulike retninger i sin interne krystallstruktur, og når disse vokser vil de etter hvert komme i kontakt med hverandre. I området mellom to korn dannes det grenser i materialet som kalles korngrenser.

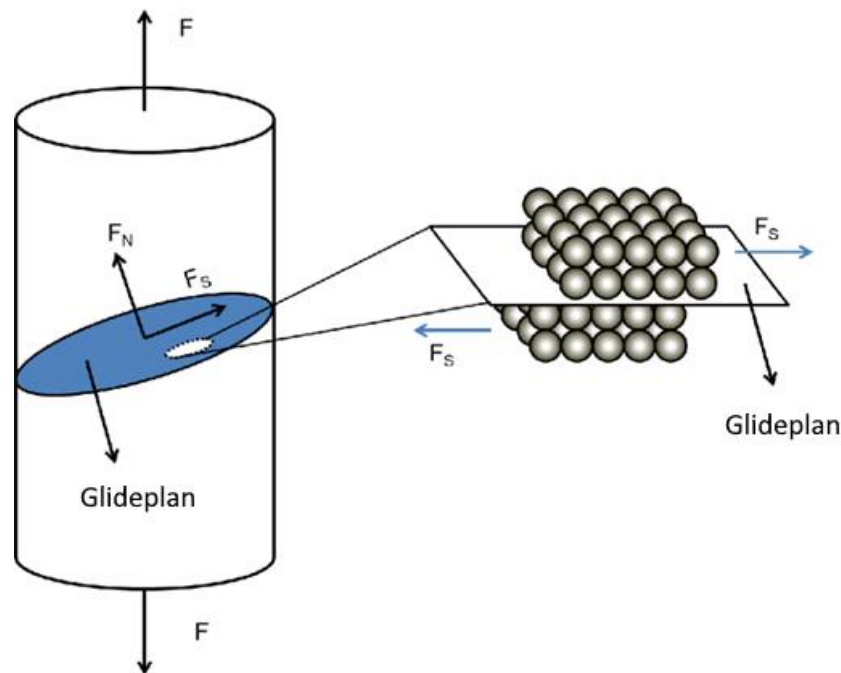


Figur 4.4. Tidsforløp i størkning av metaller og dannelse av korngrenser på mikroskopisk nivå. a) Dannelse av krystaller, b) krystallvekst, c) ujevne korn oppstår når korn vokser sammen, d) resulterende korn som synlig i mikroskop [22].

Sprekkinitiering

Sprekkinitiering vil alltid starte i overflaten til et krystallkorn fordi atomene der er lettere å forskyve når det ikke er omringet av atomer i samme krystallstruktur. I tillegg vil sprekke vanligvis initieres i overflatekornene som ikke er avstivet av nabokorn. Overflatekornene vil også oftere være utsatt for irregulareteter som riss fra mekaniske prosesser eller groper fra blant annet rustangrep.

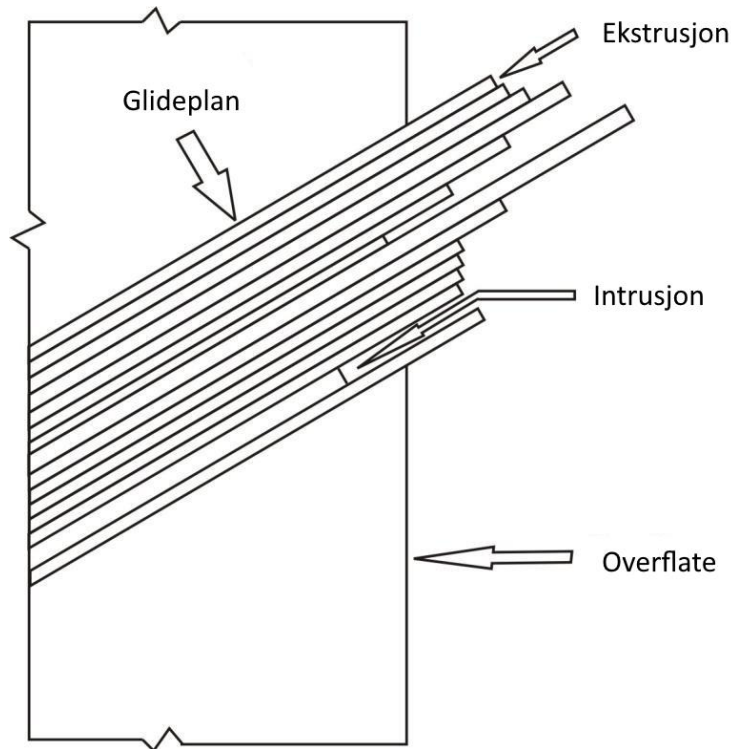
Glidning i materialet skjer først i overflatekorn i områder der det er kjerver som gir en spenningsøkning. Dette inkluderer kjerver som skruegjenger, kilesport, hulkiler, sveiser, tverrsnittoverganger, maskinerte hull og spor, gjengepartier og overgangen mellom bolt og hode.



Figur 4.5. Glideplan på makroskopisk og mikroskopisk nivå. Omarbeidet fra [23].

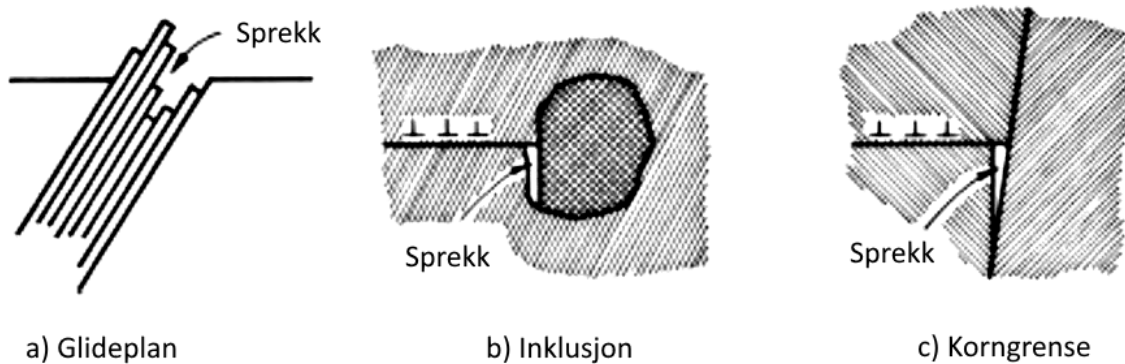
Ved syklisk belastning vil parallelle glideplan bevege seg i forhold til hverandre og man vil få en rekke ekstrusjoner og intrusjoner på overflaten. De fleste av dislokasjonene er ikke veldig dype og kan elimineres ved å fjerne noen få mikrometer med materiale på overflaten. Andre glideplan vil derimot være mer permanente og kalles Persistent Slip Bands (PSB). Mye tyder på at utmattingssprekker vil begynne å vokse fra PSB fordi de gir opphav til ytterligere spenningskonsentrasjoner. Denne antagelsen støttes av at forsøk viser at levetiden kan utvides mot uendelig ved periodisk sykling og elektropolering [19]. Deformasjonene fra PSB kan vises på makroskopisk nivå og er synlig ved at overflaten blir mattere enn vanlig.

Utvikling av roterende 4-punkts bøyeutmatningsmaskin



Figur 4.6. Dislokasjoner i glideplan resulterer i PSB (Persistent Slip Bands) [24].

Nå har det blitt beskrevet hvordan sprekkinitering kan oppstå på materialets overflate. Sprekker kan også initieres under overflaten og skyldes oftest indre materialfeil. De vanligste er inklusjon, der en bit av et fremmed materiale er støpt inn, og hulrom som har oppstått mellom korn. Inklusjoner skyldes ofte urenheter introdusert gjennom produksjonsprosesser, som for eksempel støpning eller ved varmebehandling. Det kan også forårsakes av oksidasjon og korrosjon. Hulrom i korn grensene er ofte et resultat av ujevn nedkjøling av metall eller andre varmepåvirkninger.



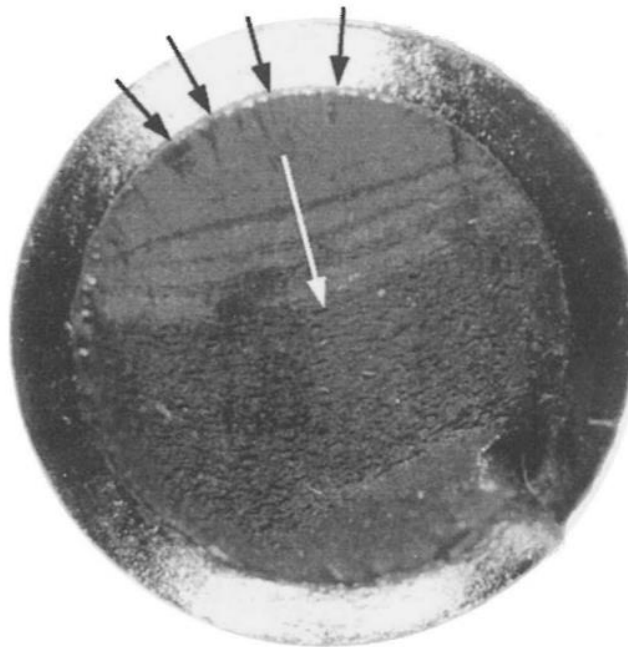
Figur 4.7. Typiske kilder til initiering av mikrosprekker [25].

Sprekkvekst

Størrelsen på korn påvirker veksten til mikrosprekker fordi korn grensene fungerer som barrierer for sprekkvekst. Dersom et nabokorn har et glidplan som ligger i tilnærmet samme retning vil sprekk fortsette å vokse raskere. Etter å ha vokst seg gjennom noen korn vil man se overgangen til fase 2 i sprekkveksten. Vanligvis vokster sprekker gjennom glideplan inne i enkelte korn og gjennom korn grensene til det neste (transkrystallinsk), men i noen tilfeller foregår sprekkveksten langs med korn grensene (interkrystallinsk).

Når sprekk har fått en viss størrelse vil den ikke lenger regnes som en mikrosprekk og den vil vokse hver gang spenningen overstiger den lokale materialstyrken. Ved syklisk belastning kan dette bety ved hver pålastning. Da dannes striasjoner, som kan være synlig som bølgelignende linjer gjennom et elektronmikroskop. Hver linje viser sprekkveksten for hver belastningsyklus. Mikroskoper med forstørrelse mellom 1000 og 50.000 er nødvendig for å kunne oppdage striasjoner. Likevel er det ofte vanskelig på grunn av gnidning og banking gjennom gjentagende belastninger som vasker ut striasjonene.

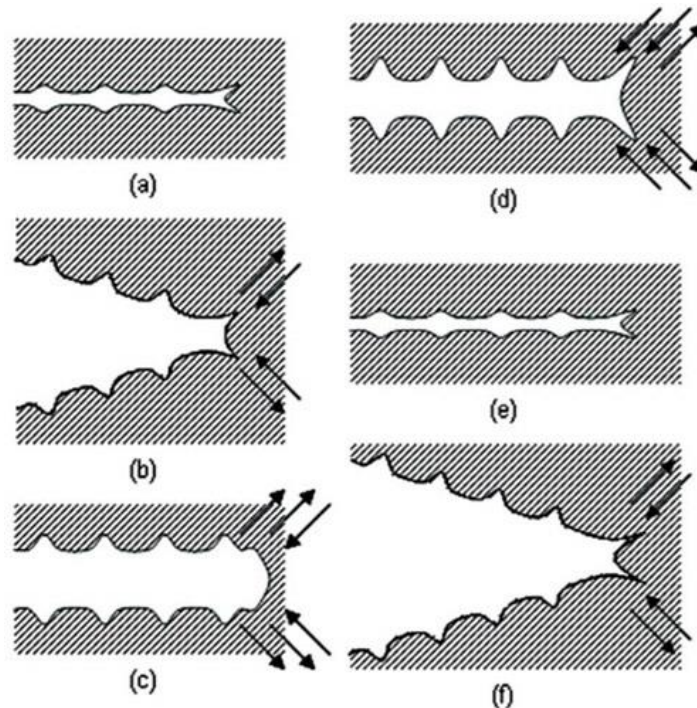
Sprekkveksten kan også observeres ved rastlinjer, som er synlige uten forstørrelse. Rastlinjene representerer ofte start og stopp i bruk av en komponent, eller endring i belastning. Endring i belastningsstyrke gjør at de ulike rastlinjene opplever ulik mengde gnidning og friksjon. Ved stopp i korrosive miljøer er rastlinjene utsatt for korrosjon og rust av varierende styrke. Hver av rastlinjene kan inneholde flere tusen striasjoner.



Figur 4.8. Bilde av en bolt fra sykkelsete. Svarte piler viser sted for sprekkinitiering, hvit pil går på tvers av rastlinjer. Under hvit pil er område for restbrudd [19].

Atomplanglidning

Den mest vanlige teorien for hvordan selve sprekkveksten foregår er vist i figuren nedenfor. Sprekkspissen vil gi en høy spenningskonsentrasjonsfaktor som gir lokal plastisk deformasjon. Atomplanglidning foregår på grunn av skjærspenning og gir en utviding av sprekken under strekk. Dette resulterer også en sprekkforlengelse. Ved avlastning eller trykk blir sprekkspissen igjen skarp. Denne sprekkforlengelsen er irreversibel, som betyr at ved neste lastsykel vil sprekken igjen åpnes opp og vokse. En slik sykel vil typisk gi en sprekkvekst på 10^{-7} - 10^{-3} . En av disse utvidelsene er en striasjon og er synlig på figuren som «bølger».



Figur 4.9. Stegvis vekst av sprekkspissen inn i materialet[26].

Restbrudd

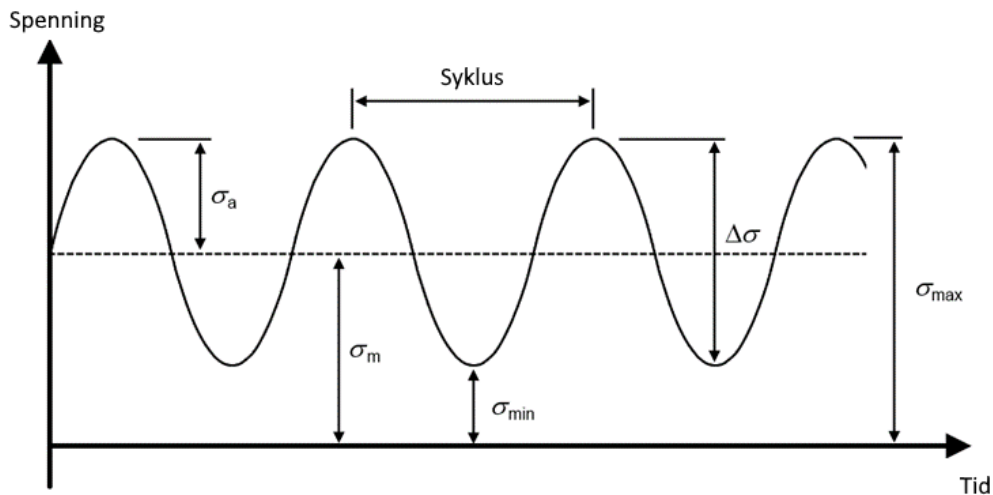
Restbrudd inntreffer når sprekken har vokst seg så stor at gjenværende tverrsnitt ikke tåler belastningen. De typiske stadiene ved utmattingsbrudd kan oppsummeres: Glidning oppstår først, som resulterer i mikrosprekker som kun er synlig med mikroskop. Disse vil fortsette å vokse ved vekslende belastning og vil etter hvert bli synlig med det blotte øye. Sprekkene har en tendens til å vokse sammen inntil det bare er noen få større sprekker som gjenstår. Videre vokser sprekkene fram til et plutselig brudd. Denne prosessen vil foregå raskere ved høyere amplitudespenning.

Restbrudd ved utmatting kjennetegnes ved at det er ukontrollert og at utmattelsesprosessen i praksis har kommet så langt at bruddet er umulig å unngå. Uavhengig av materialets duktilitet vil bruddet kunne betegnes som ustabil og plastisiteten er ikke veldig relevant.

4.2. Utmattingstesting og spennings-levetidmetoden

Definisjoner

Figuren nedenfor viser noen viktige størrelser på en kurve over spenningsyklus med konstant amplitude, plottet mot tid.



Figur 4.10. Skisse viser ulike størrelser for syklisk vekslende spenning. Omarbeidet fra [27].

Videre følger disse algebraiske sammenhenger:

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$$

$$\sigma_{max} = \sigma_m + \sigma_a$$

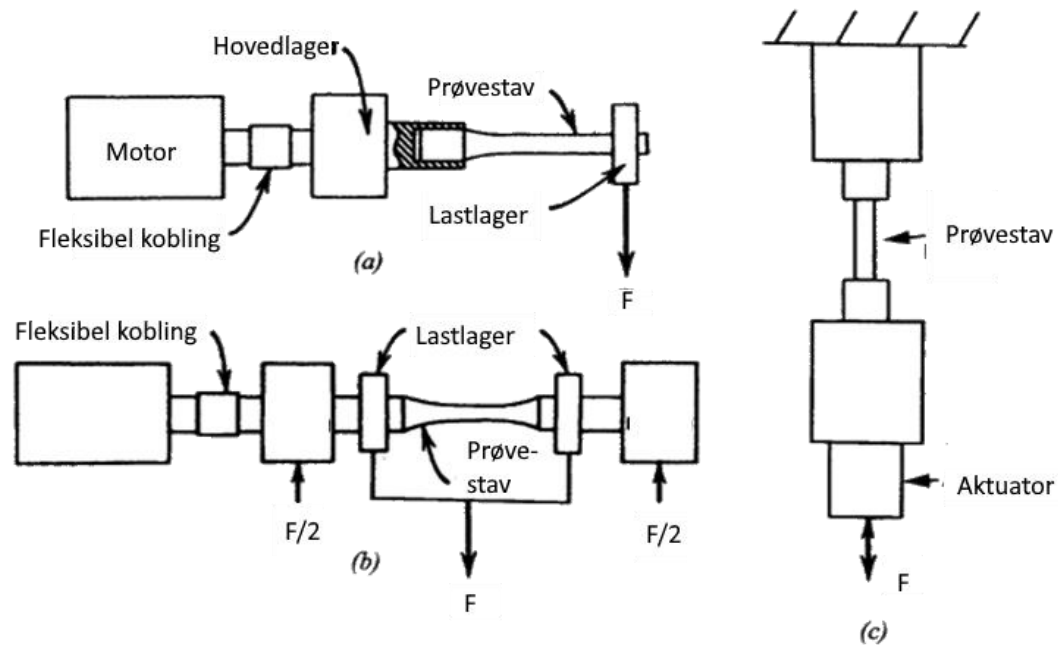
$$\sigma_{min} = \sigma_m - \sigma_a$$

Utmattingstesting

Utmattingstesting med konstant amplitude har blitt gjennomført helt siden Wöhlers forsøk på jernbaneaksler på 1800-tallet. Det er utviklet mang typer utmattingsmaskiner for gjennomføring av testing. Den enkleste av disse, vist i figur 4.11 har en roterende aksel som fungerer som en utkragerbjelke. Denne blir utsatt for bøyemoment og når akselen roterer vil spenningen vekse mellom strekk og trykk. I denne maskinen vil bøyemomentet variere over prøvestavens lengde og være størst der staven er innspent til motoren.

Utvikling av roterende 4-punkts bøyeutmatningsmaskin

Er maskinen utformet slik som figur 4.11b vil prøvestaven utsettes for samme bøyemoment over hele sin lengde. Andre maskiner kan teste aksial strekk og trykk eller kombinert torsjon og bøyning, som kan være aktuelt for drevne aksler og veivaksler.



Figur 4.11. Utvalgte metoder for utmatningstesting og utforming av maskiner. a) 2-punkts roterende bøyeutmatting, b) 4-punkts roterende bøyeutmatting, c) aksial utmatting. Omarbeidet fra [19].

Spenning-levetid (S-N) metoden

Den mest brukte metoden for dimensjonering av maskinelementer mot utmatting ved spenninger i det elastiske området. S-N-kurven lages ved å plote utmatningslevetiden i antall spenningscykler mot den påførte spenningsamplituden.

Databehandling

For gjennomføring av utmatningstesting og behandling av innhentet data kan det lønne seg å følge føringene gitt i ISO 1207 (Metallic materials — Fatigue testing — Statistical planning and analysis of data).

ISO 12107 presenterer metoder for planlegging av utmattelsestesting og statistisk analyse av resulterende data. Hensikten er å bestemme utmattelsesegenskapene til metalliske materialer med både høy grad av sikkerhet og et praktisk antall prøvestaver.

4.3. Eksisterende teknologi

Her gis en gjennomgang av roterende bøyemattingsmaskiner på markedet som benytter 4-punktbelastning på prøvestaven. Spesifikasjonene og mekanismer for lastpåføring vil undersøkes og brukes videre i utvikling av egne konsepter og spesifikasjoner.

Walter+bai [28, 29]

Walter+bai leverer bøyemattingsmaskiner med ulik kapasitet for påført bøyemoment, fra 10 Nm på den minste modellen til 500 Nm. Rotasjonshastigheten kan variere fra 100 til 12.000 r/min.

For lastpåføring benyttes to sett med vekter på festet til to armer via vaier og trinse. Denne mekanismen øker hvor mye bøyemoment som kan påføres med et relativt lite sett med vekter.

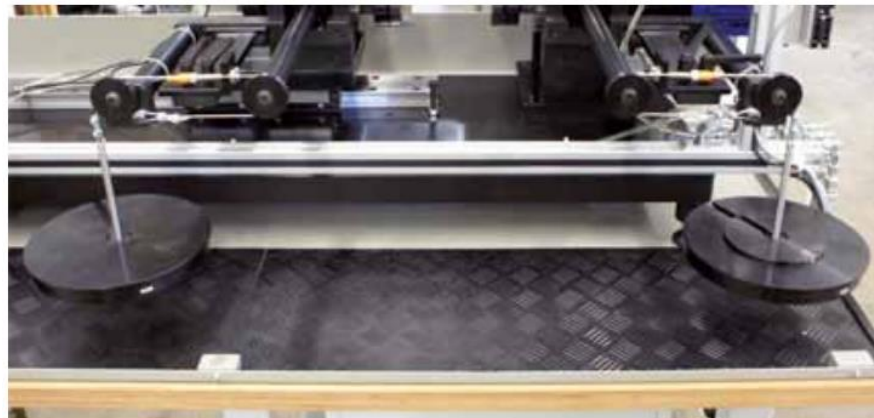
Motoren som benyttes er en 3-fase 400V AC-motor på de største modellene, men de mindre bruker 230V 1-fase AC-motor.

Maskinen er designet for å utføre testing på prøvestaver med konstant bøyemoment i henhold til standarder ISO 1143, DIN 50113 og BS 3518-2.

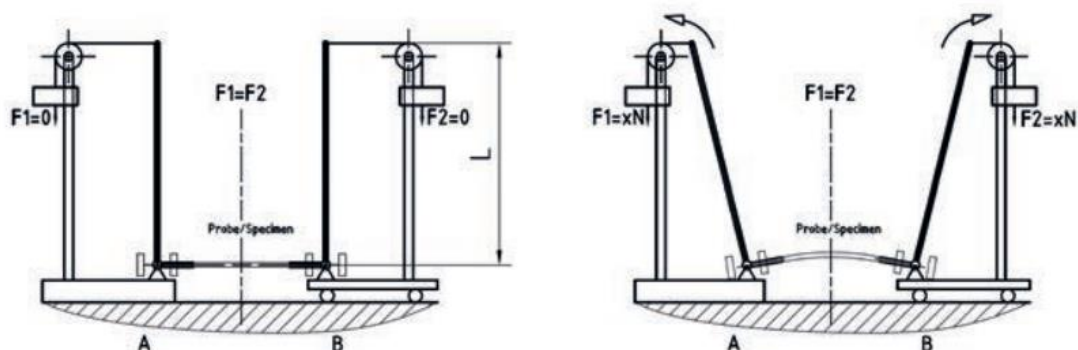


Figur 4.12. Oversiktsbilde av maskin fra walter+bai [28].

Utvikling av roterende 4-punkts bøyeutmattingsmaskin



Figur 4.13. Bilde av vekter og vaier/trinsesystem for lastpåføring [29].



Figur 4.14. Skisser av lastpåføringsmekanisme og dens virkemåte. Vekter trekker vektarmene via trinser som gir et bøyemoment i prøvestaven [28].

Zwick/Roell [30]

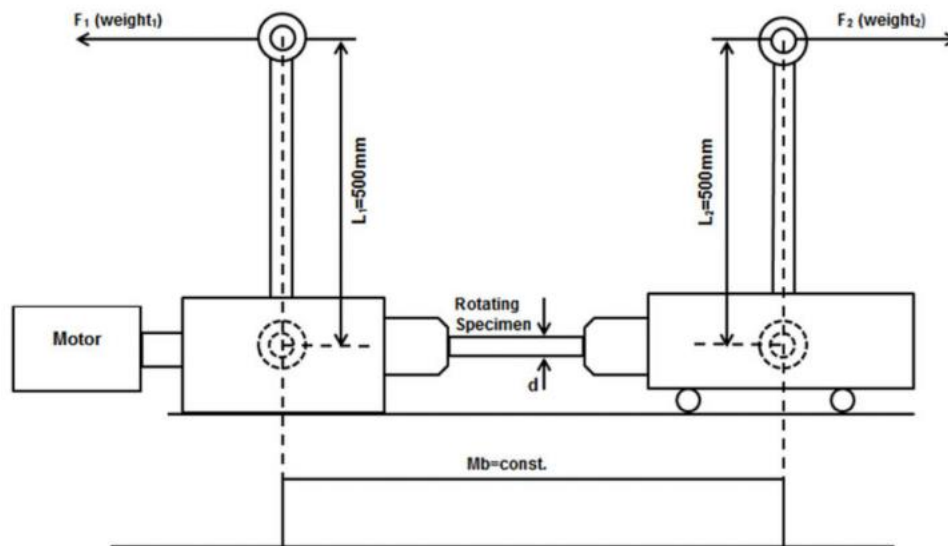
Swick/Roell benytter seg av samme prinsipp for lastpåføring som maskinene fra walter+bai. Bøyemoment i prøvestaven kan variere fra 2,5 Nm til 120 Nm.

Motoren som benyttes er en 3-fase 400V AC-motor, der rotasjonshastigheten kan variere fra 500 r/min til 5000 r/min. I tillegg kan maskinen utstyres med oppvarming av prøvestav.

Utvikling av roterende 4-punkts bøyeutmattingsmaskin

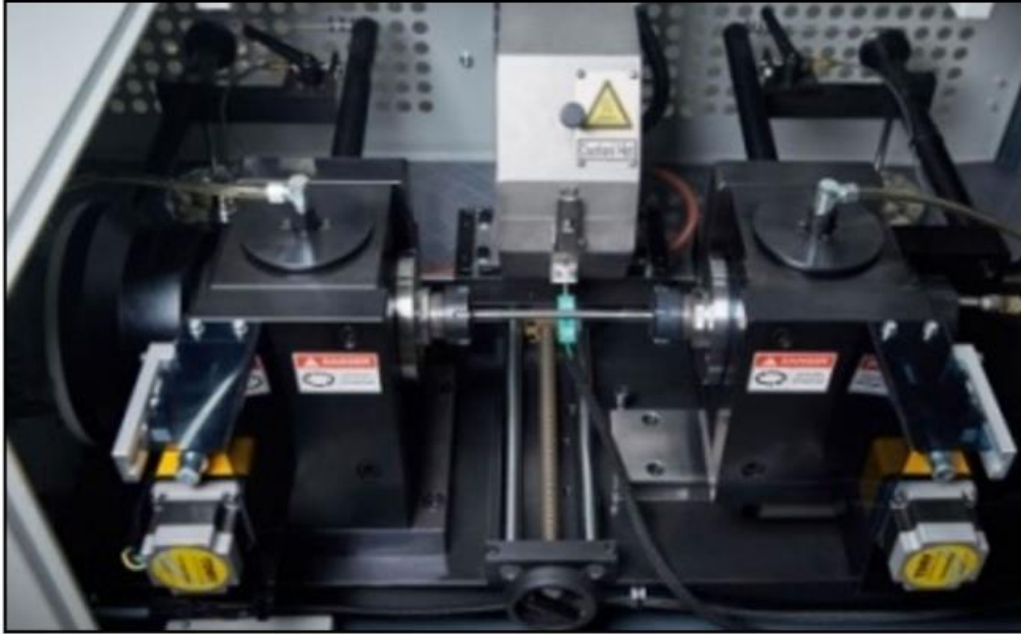


Figur 4.15. Oversiktsbilde av maskin fra Zwick/Roell [30].



Figur 4.16. Skisse over lastp foringsmekanisme [30].

Utvikling av roterende 4-punkts bøyeutmattingsmaskin



Figur 4.17. Innvendig bilde av Zwick/Roell-maskin som viser vektarmene og trinser, samt lodd i bakgrunnen [30].

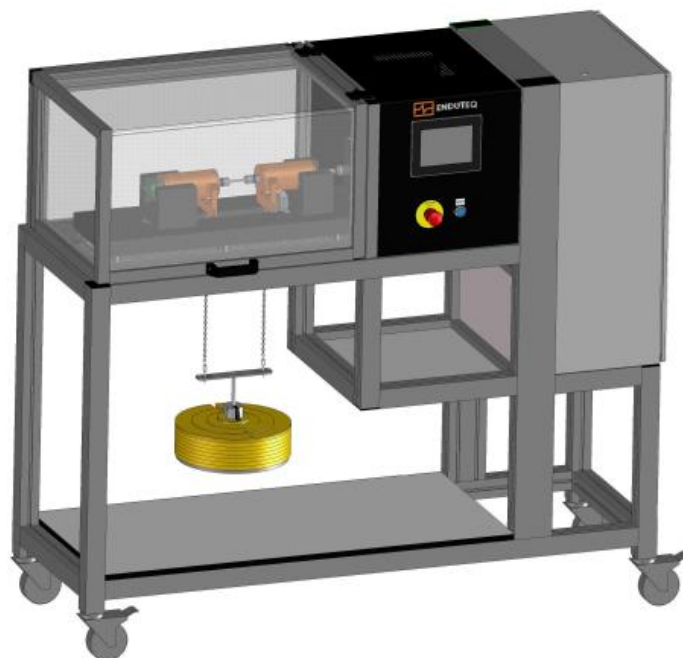


Figur 4.18. Bilde fra bakside av maskin der vektarmene og trinser på høyre og venstre side er synlige.

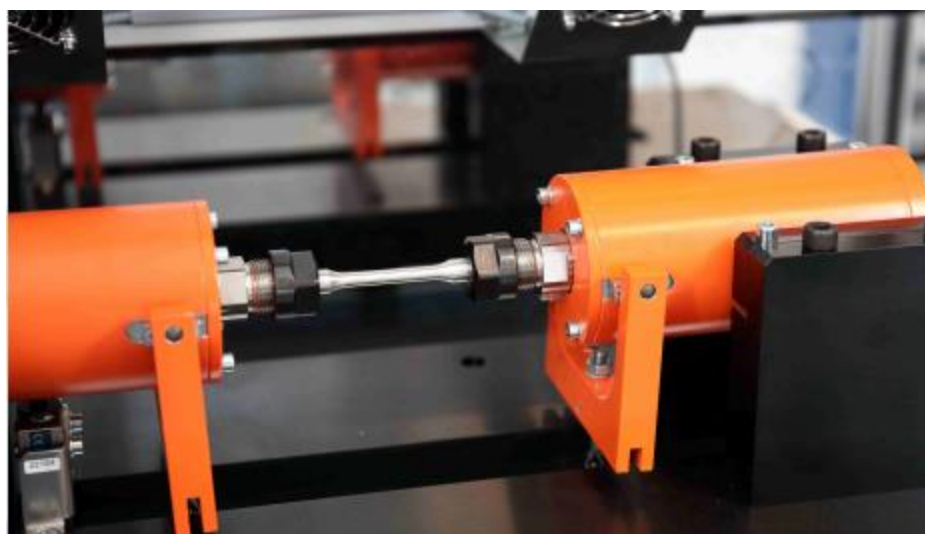
Enduteq [31]

Maskinen fra Enduteq benytter seg av en enklere lastmekanisme der vekten overfører lasten mer direkte uten bruk av en vektstang/arm. Dette gir et lavere maksimalt bøyemoment på 25 Nm.

Motoren er 3-fase 400V med variabel rotasjonshastighet fra 500 r/min til 10.000 r/min.



Figur 4.19. Helhetlig tegning av maskin [31].



Figur 4.20. Nærbilde av innspent prøvestav [31].

5. Tidlige brukerinnspill

For å sikre at tidlige målsettinger og prioriteringer stemmer overens med forventningene til kunden gjennomføres det en samtale med førstemanuensis Geir Terjesen ved Institutt for maskinteknikk og teknologiledelse.

Målet med denne tidlige samtalen var å få innspill om retningen som er satt tidlig i oppgaven og eventuelle tips for utførelsen av utmattingsmaskinen. En oppsummering av de viktigste punktene som kom opp i løpet av samtalen er presentert nedenfor.

- Bøyespenning i en prøvestav vil resultere i nedbøying, som igjen gir strekk i staven. Dette vil kunne være med på å akselerere sprekkveksten i staven. For å motvirke dette kan det være aktuelt å sørge for at en av innspenningene til prøvestaven kan bevege seg friksjonsfritt og fungere som fritt opplagret. Terjesen argumenterer med at man i realiteten kan se bort ifra denne effekten, og viser til James M. Gere og Stephen P. Timoshenko [32]. I en utledning kommer det fram at for stålbjelker vil nedbøying i midten av bjelken være veldig liten i forhold til lengden på bjelken. Derfor vil det i praksis være fornuftig å anta at en ende av bjelken er fritt opplagret.
- Den viktigste hensikten er læringsutbytte for studenter. Det betyr at man ikke ønsker for avanserte funksjoner og ferdige grafer fra maskinen. Enkelte leverandører av komplette løsninger fra markedet reklamerer med mange avanserte funksjoner. For dette oppdraget er det fornuftig at mye skal gjøres av studenter. Trenger kun antall lastvekslinger før brudd og påført spenning.
- Det kan være lurt med en klokke i tilfelle teller ikke registrerer. Da kan man estimere antall lastvekslinger fra turtall og tid før brudd.
- Viktig at det er lett for studenter å forstå hvordan maskinen fungerer og å gjøre nødvendige beregninger for laboppgave.
- Det er et mål i seg selv å få ned tiden før brudd. Når laboppgaver skal utføres av studenter kan det være knapt om tiden og det bør ikke ta for lang tid før maskinen gir utmattingsbrudd i staven. Derfor viktig med 3000 r/min. Et annet tiltak for å få ned tiden er å få ned tverrsnitt til prøvestav for å oppnå høyere spenninger og å bevisst maskinere stygg overflate for å hoppe over sprekkinitieringsfasen og gå rett på sprekkvekst. ‘
- Man bør ha lav toleranse for testing av ulike aksler for eventuelle eksterne kunder. Ingen krav til overflatebehandling og fine prøvestaver. Terjesen påpeker et ønske om å kunne teste «alt».

6. Spesifisering

I dette kapitlet gjennomføres produktspesifisering for å definere produktmålsetting og hvilke produktegenskaper som blir viktigst å fokusere på i det videre utviklingsarbeidet. Samtidig legges tekniske rammer, andre fysiske spesifikasjoner samt pris blir satt for å styre videre utvikling basert på kundens og brukernes behov.

6.1. Produktmålsetting

Produktmålene blir satt for å kunne styre utviklingen basert på kundens behov. Hovedmålet for produktet inneholder nøkkelegenskapene og hovedkravene. Det legger også grunnlaget for flere delmål som gir mer spesifikke produktegenskaper.

Hovedmål

Maskinen skal utvikles, konstrueres og designes etter foreskrevne standarder for testing av roterende bøyeutmattning under laboratoriebetingelser og den skal utvikles for å kunne gi konstant bøyemoment over prøvestaven ved rotasjon. Samtidig skal det legges vekt på at den skal være enkel å bruke og demonstrere for utdanningsformål.

Delmål

- **Teknisk mål:** Maskinen skal oppfylle krav for roterende bøyeutmattningstesting etter ISO1143. Det er også et mål å kunne redusere tidsbruk før brudd, for eksempel ved høyt turtall. Løsningen bør kunne gi repeterbare resultater.
- **Bruksmål:** Maskinens utforming skal være slik at det skal være lett å forstå virkemåten og tilhørende funksjoner for å gi tilstrekkelig læringsutbytte for studenter ved laboratorieoppgaver. Viktige funksjoner og komponenter bør være synlig for brukere/tilskuere.
- **Produksjonsmål:** Maskinens komponenter må kunne produseres av verkstedet ved NMBU og ikke være unødvendig komplekse i funksjon og geometri. Eventuelle komponenter som kjøpes inn bør være lett tilgjengelige dersom det skulle bli behov for å erstatte disse. Montering av ferdig maskin bør ikke kreve unødvendig høy presisjon/nøyaktighet.
- **Sikkerhetsmål:** På grunn av fare for skade på brukeren ved brudd bør roterende elementer være tildekket. Det er også behov for nødstop (maskinforskriften?).
- **Økonomisk mål:** Det er et mål å være kostnadsbesparende der dette ikke går utover grunnleggende funksjonalitet.

6.2. Rangering av viktige egenskaper

Her rangeres egenskaper for maskinen etter viktighet og hver av egenskapene vektet på en skala fra 1 til 5. Ingen egenskaper vil bli vektet 1, ikke viktig, fordi kun egenskaper med en viss viktighet vil vurderes. Vektingen skal brukes senere i rapporten for å gjøre valg av konseptløsninger ved hjelp av Pughs metodikk.



Figur 6.1. Skala for rangering av viktige egenskaper.

Tabell 6.1. Rangering og vekting av viktige egenskaper

Egenskap	Beskrivelse	Vekting
Effektivitet	Tidsbruk for oppsett av forsøk og før brudd blir registrert. Dette er spesielt viktig i undervisningssammenheng der studenter vil ha begrenset med tid på laboratoriet og flere grupper skal benytte seg av maskinen.	4
Fleksibilitet	Hvorvidt løsningen kan benyttes på ulike utforminger av prøvestaver og andre akselformer fra eksterne oppdragsgivere.	3
Nøyaktighet	Resultatene fra testmaskinen må være så pålitelige og repeterbare som mulig for å være verdifulle. Dette betyr at måle- og registreringsutstyr må være nøyaktig og designet bør konstrueres slik at det minimerer faren for brukerfeil.	5
Funksjonalitet	Maskinen fungerer og oppfyller hovedfunksjonen på en god måte. Designet bør ikke inneholde ekstra funksjoner som går utover maskinens hovedmål og -funksjoner.	5
Brukervennlighet	Brukervennlighet handler om hvor enkelt det er for brukere å forstå og bruke funksjoner og elementer av maskinen. Dette er spesielt viktig når maskinen skal benyttes i undervisningssammenheng. Studenter bør kunne bruke maskinen og få brukbare resultater med begrenset opplæring. Det er også et mål at studenter skal kunne forstå virkemåten og derfor bør alle viktige komponenter være synlige.	4
Kompleksitet	Høy kompleksitet og mange ekstra funksjoner vil med tanke på læringsutbytte virke skadende. Hensikten med maskinen i undervisningssammenheng er at studenter skal gjøre så mye som mulig selv av beregninger og databehandling for å maksimere læringsutbytte. Høyere kompleksitet vil også gi lengre tilvirkingstid og produksjonskostnader. Det vil også medføre muligheten for mer tidkrevende og kostbart vedlikehold og driftsstopp.	4


Tabell 6.1. Forts.

Egenskap	Beskrivelse	Vekting
Robusthet	De ulike maskindelene og elektriske komponenter må tåle de påkjenninger repeterende bruk vil gi. Påvirkes også av hvor enkelt det vil være å erstatte komponenter som svikter/havarerer. Må reservedeler bestilles, kan de kjøpes i nærliggende butikker eller er de egenprodusert.	4
Størrelse	Plass vil alltid være begrenset og det bør gjøres en innsats for å minimere plassbruken der dette er mulig.	2
Sikkerhet	Sikkerhet rundt maskinen er viktig og roterende elementer bør derfor dekket til for å unngå at klær eller lignende kommer inn i mekanismen. Riktig merking og sikkerhetstiltak som nødstoppknapp er ønskelig.	5
Kostnad	Prisen må kunne minimeres slik at den er mindre enn prisen for å kjøpe inn eksisterende maskiner fra markedet.	4

6.3. Metriske grensespesifikasjoner


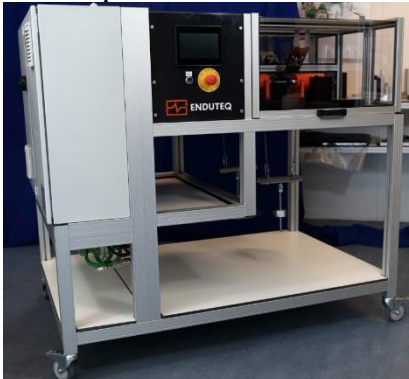
Grensespesifikasjoner må oppfattes som metriske toleranser. Det eksisterer mange ulike varianter og byggemåter, men det vil være naturlig å benytte seg av dimensjoner og egenskaper fra maskiner som er tilgjengelige på markedet for å danne seg et tidlig bilde av hvilke dimensjoner som er både praktiske og realistiske.

Tabell 6.2. Vurdering av fysiske mål og dimensjoner for eksisterende testmaskiner på markedet. Høydemål er for w+b UBM 60 total høyde til maskin og oppstillingsbord. – markerer mål som ikke er tilgjengelige.

Maskin	Maks bøye-moment [Nm]	Lengde [mm]	Dybde [mm]	Høyde [mm]	Maks rotasjons-hastighet [r/min]	Vekt [mm]
w+b UBM 60 	60	1200	750	1225	5000	350

Utvikling av roterende 4-punkts bøyeutmattingsmaskin

Tabell 6.2. Forts.

Maskin	Maks bøye-moment [Nm]	Lengde [mm]	Dybde [mm]	Høyde [mm]	Maks rotasjons-hastighet [r/min]	Vekt [mm]
	120	1520	1010	1450	5000	690
	25	-	-	-	10.000	Ca. 50

Tabell 6.3. Ekstremalverdier for spesifikasjoner fra vurderte løsninger på markedet.

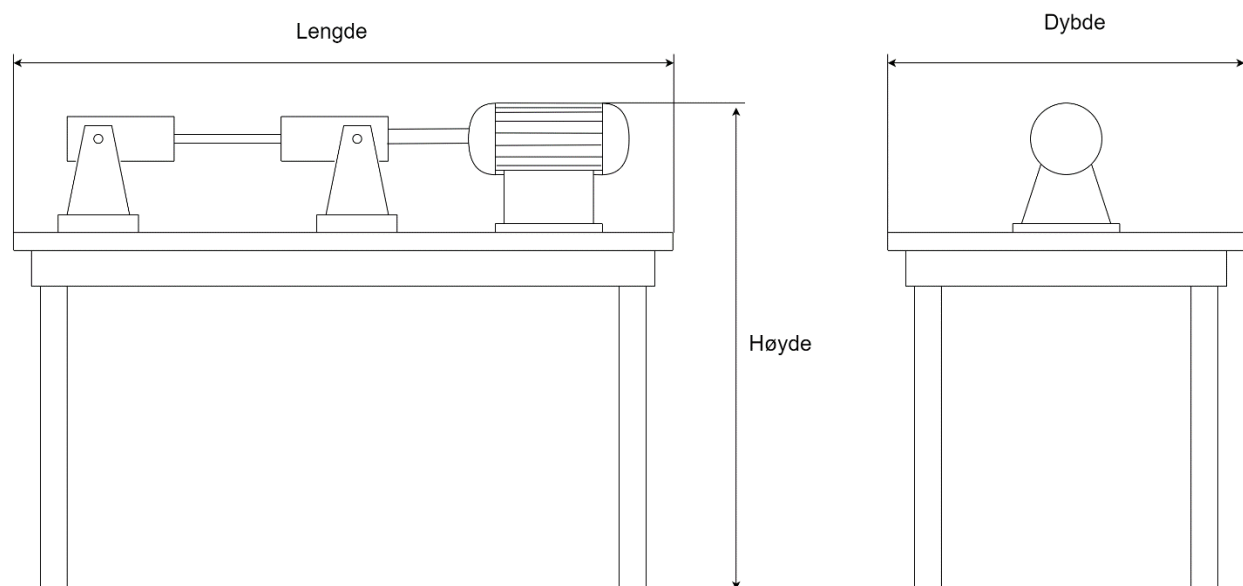
Egenskap	Min verdi	Maks verdi
Maks bøyemoment [Nm]	25	120
Lengde [mm]	1200	1520
Dybde [mm]	750	1010
Høyde [mm]	1225	1450
Maks rotasjonshastighet [r/min]	5000	10.000
Vekt [kg]	50	690

6.4. Metriske grovspesifiseringer

Ut ifra de metriske grensespesifikasjonene kan man velge et grovt utgangspunkt for metriske verdier. Disse vil sammen med spesifikasjoner og fra oppdragsbeskrivelsen og gjeldende

Utvikling av roterende 4-punkts bøyeutmattingsmaskin

standarder senere benyttes som dimensjonerings- og konstruksjonsgrunnlag. Følgende figur viser fysiske dimensjoner som skal grovspesifiseres og hva dimensjonene representerer på maskinen og tilhørende oppstilling.



Figur 6.2. Fysiske dimensjoner ved maskin og oppstilling.

Basert på en vurdering av eksisterende løsninger og behov fra oppdragsgiver er det gjort følgende grovspesifisering av fysiske egenskaper for testtriggen:

Tabell 6.4. Liste over metriske grovspefikasjoner. Motormoment er beregnet fra gitt motoreffekt ved maks turtall.

Egenskap	Verdi
Maks bøyemoment [Nm]	25
Lengde [mm]	1500
Dybde [mm]	750
Høyde[mm]	1200
Rotasjonshastighet [r/min]	3000
Motoreffekt [kW]	1
Motormoment [Nm]	3,18
Vekt [kg]	200

6.5. Tidlige kostnadsvurderinger

Utmattingsmaskiner som finnes på markedet ligger ofte priset fra rundt 50.000 kr og kan stige i pris opp til flere 100.000 kr. Det er ønskelig å holde seg på en pris fra produksjon på eget verksted på under 30.000 kr. Her kan man i så måte se bort ifra kostnadene knyttet til masterarbeidet (jfr. kapittel 13).

7. Konseptutvikling

I dette kapitlet blir verktøy fra kapittel 3 benyttet for å komme frem til produktets hovedfunksjon og generere aktuelle løsningsalternativer. SCAMPER og funksjonsanalyse blir benyttet for å komme fram til funksjoner og mulige løsninger. Hensikten er å vurdere så mange løsninger og ideer som mulig for å ende opp med det beste konseptet for videreutvikling.

7.1. Funksjonsanalyse

I funksjonsanalysen kartlegges hovedfunksjon, og andre aktuelle funksjonsnivå som bygger opp under hovedfunksjonen defineres som delfunksjoner. Deretter genereres løsningsalternativer til funksjonene som kan sammenlignes og drøftes før et endelig konseptvalg blir gjennomført.

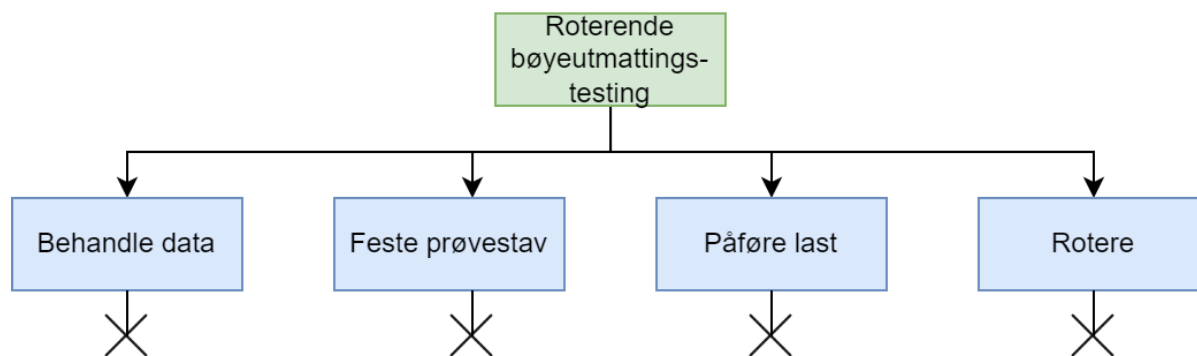
Med basis i dette kan man generere løsningsalternativer til funksjonene som kan sammenlignes og drøftes før et endelig konseptvalg blir gjennomført.

Funksjonsanalysen er illustrert nedenfor. Den er delt opp i en trinnvis sekvensorden for å sikre best mulig lesbarhet. Funksjonene er delt inn i hovedfunksjon, sekundærfunksjoner og tertiærfunksjoner. Til slutt ligger de aktuelle løsningsforslagene for hver enkelt funksjon.

De ulike trinnene i funksjonsdiagrammet er kodet på følgende vis:



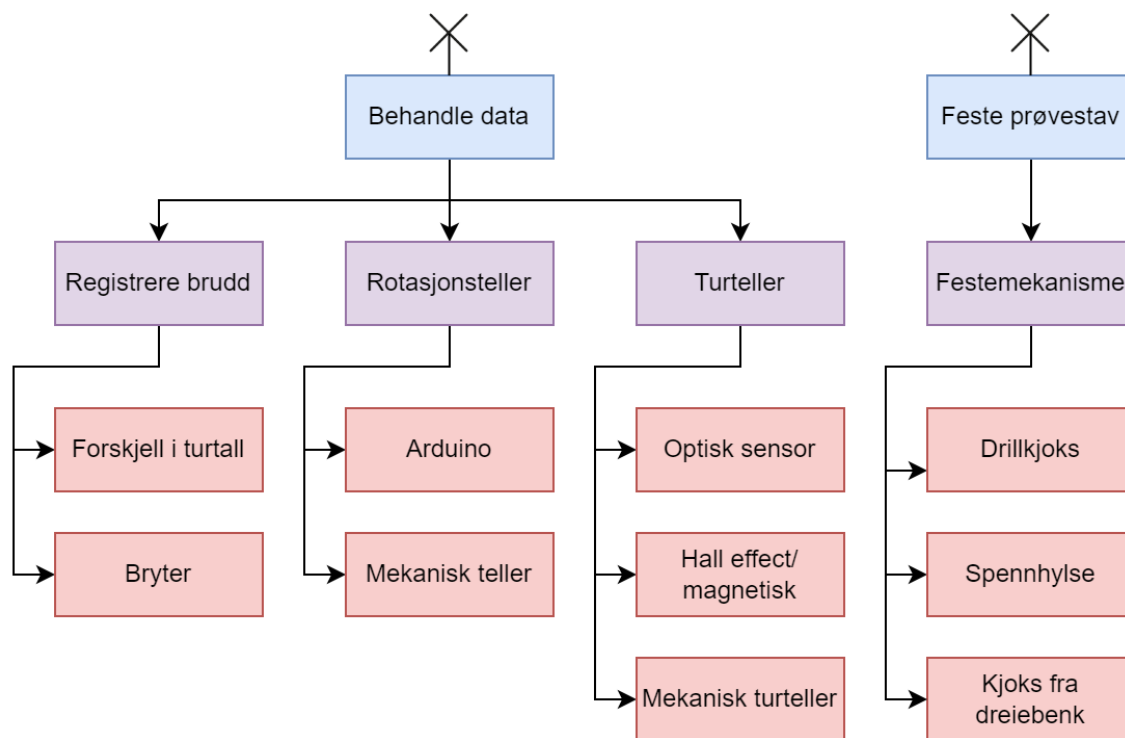
Figur 7.1. Fargeforklaring for funksjonsdiagrammer.



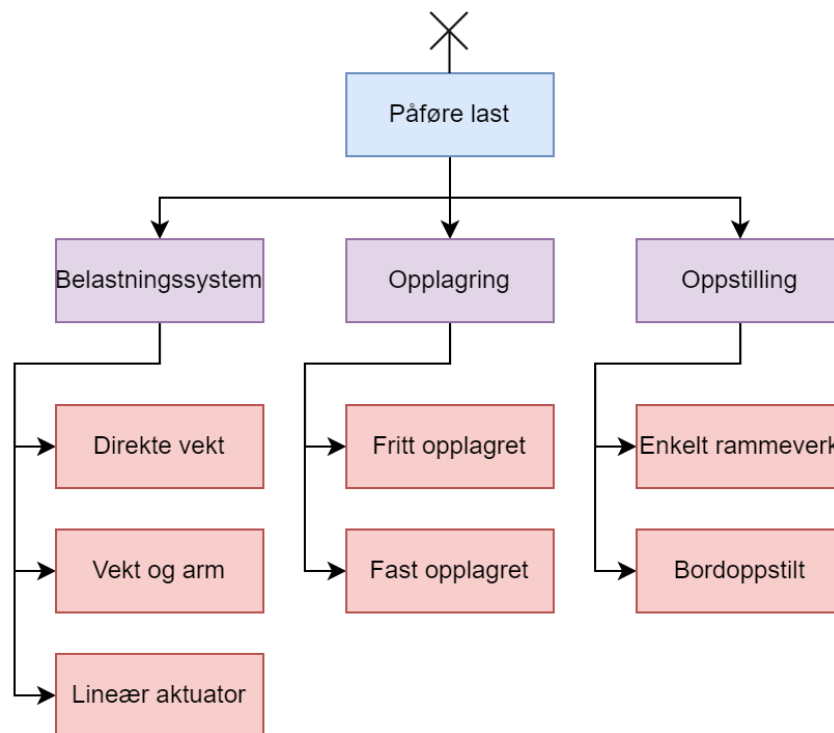
Figur 7.2. Diagram over primærfunksjon og sekundærfunksjoner. X markerer hvor tertiærfunksjoner følger i kommende diagrammer.

Påfølgende funksjonsnivåer og elementer som inngår listes videre i oppstillinger med egne undergreiner (subfunksjoner) på neste side.

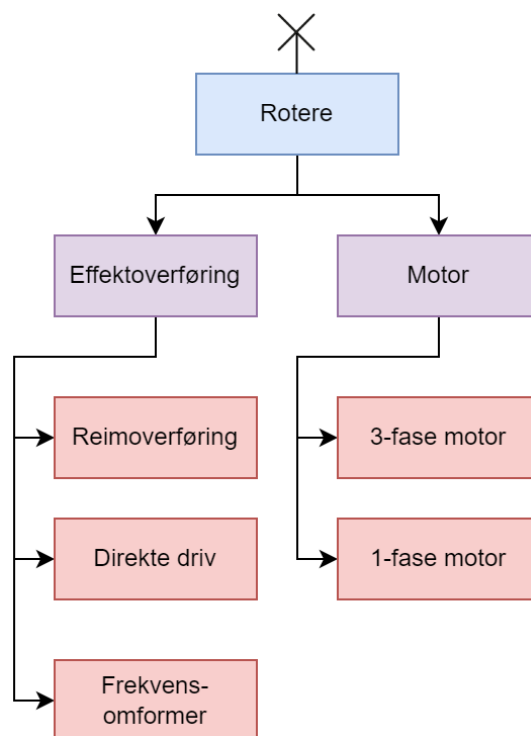
Utvikling av roterende 4-punkts bøyeutmattingsmaskin



Figur 7.3. Diagram over sekundærfunksjonene behandle data og feste prøvestav.



Figur 7.4. Diagram over sekundærfunksjon påføre last.



Figur 7.5. Figur over sekundærfunksjon rottere.

7.2. Funksjonsalternativer

Tabellene nedenfor vil gi en oversikt over de ulike funksjonsalternativene for hver av funksjonene fra funksjonsanalysen. Funksjonsalternativene blir skisser og forklart. Senere vil disse bli vurdert opp mot hverandre for å gjøre valg.

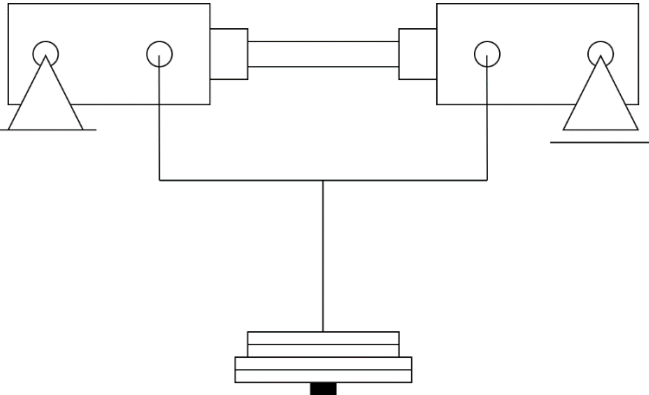
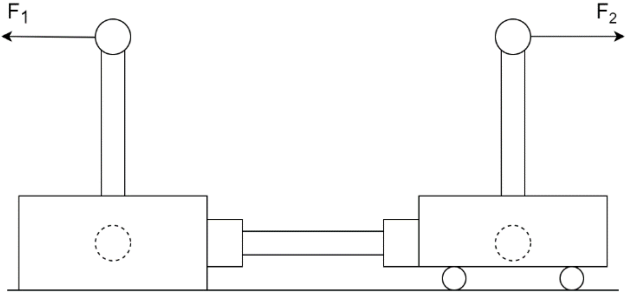
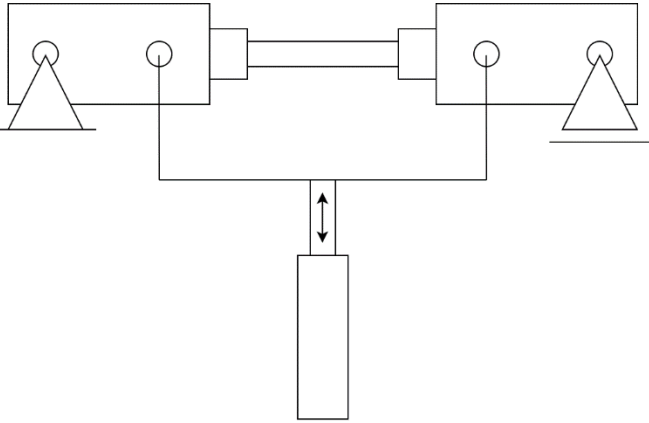
7.2.1. Belastningssystem

Viktige faktorer for belastningssystemet er nøyaktighet for påført last og hvor enkelt og intuitivt det er å påføre ønsket bøyemoment på prøvestaven. Utformingen på belastningssystemet påvirker maksimalverdier for hvor mye bøyemoment som kan påføres staven. Det vil være en ulempe dersom man må benytte veldig tunge vekter for å oppnå ønsket bøyemoment.

For tunge vekter vil kunne være en utfordring fordi det medfører økt fare for at prøvestaven utsettes for støt som kan svekke utmattingslevetiden og gi unøyaktige resultater. Dette må balanseres med behovet for en enkel konstruksjon.

For alle løsningsalternativene som blir presentert er hovedmekanismen 4-punkts bøyning. Derfor dreier valget seg kun om hvilken fremgangsmåte som skal benyttes for å oppnå målet om konstant bøyemoment over prøvestaven som er definert tidlig i oppgaven.

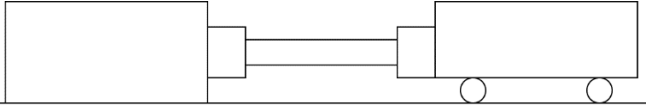
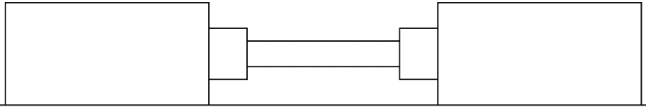
Tabell 7.1. Løsningsalternativer for belastningssystem.

Alternativ	Beskrivelse
<p>A) Direkte vekter</p> 	<p>Vekter er koblet direkte til innspenningene til prøvestaven via vaiere eller staver. Vektene er delt mellom de to sidene og sørger for jevn fordeling av vekt.</p>
<p>B) Vekt og arm</p> 	<p>Vekter festet til vektarmer via vaiere og trinser som øker hvor stort bøyemoment som påføres prøvestaven per vektenhet. Det benyttes ett sett med vekter per side.</p>
<p>C) Lineær aktuator</p> 	<p>Belastningssystemet er en videreutvikling av direkte vekter der belastningen kommer fra en lineær aktuator i stedet for vekter. Påført moment kan da varieres gjennom testen. Løsningen kan også inkludere en lastcelle som måler belastningen og inkluderer dette i en digital rapport.</p>

7.2.2. Opplagring

Hvordan innspenningene er opplagret vil påvirke hvilke spenninger som vil oppstå fra den påførte lasten. Det er ønskelig å oppnå ren bøyespenning som er konstant over hele prøvestaven. For store strekkspenninger vil påvirke utmattingslevetiden til materialet som skal testes.

Tabell 7.2. Løsningsalternativer for opplagring.

Alternativ	Beskrivelse
<p>A) Fritt opplagret</p> 	<p>Den ene innspenningen er lagret opp for å kunne gli med lav friksjon ved horisontal forskyvning.</p>
<p>B) Fast opplagret</p> 	<p>Begge innspenningene er fast opplagret og kan ikke forskyves horisontal. Ved nedbøying i prøvestaven vil det her oppstå strekkspenning i prøvestaven.</p>



7.2.3. Festemekanisme

Festemekanismen bør være enkel å bruke og kunne spenne fast prøvestaven med nok kraft til at den ikke slurer. Samtidig er hvor variabel diameteren til festemekanismen er viktig fordi den påvirker hvor fleksibel maskinen er for å teste ulike størrelser av prøvestaver og andre aksler. En annen faktor å ta hensyn til er festemekanismens eksentrisitet. Dersom fingrene fra valgt kjoks strammes ulikt rundt prøvestaven vil det oppstå andre belastninger som er uønskede.

Tabell 7.3. Løsningsalternativer for festemekanismen.

Alternativ	Beskrivelse
<p>A) Spennhylse</p>  <p>[33]</p>	<p>Fleksibel kjoks med utskiftbar spennhylse gi stor variasjon i størrelse på prøvestav. Spennhyslene kan være dyre, spesielt hvis man skal ha et stort utvalg tilgjengelig.</p>

Tabell 7.3. Forts.

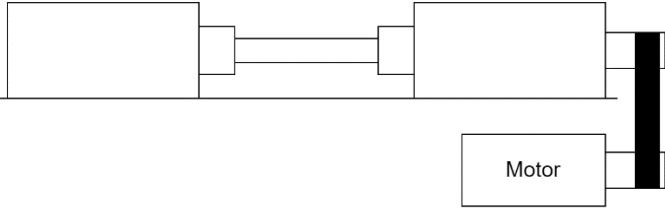
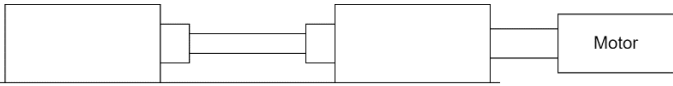

Alternativ	Beskrivelse
<p data-bbox="250 296 448 327">B) Drillkjøks</p>  <p data-bbox="203 764 256 793">[34]</p>	<p data-bbox="824 296 1390 369">En drillkjøks kan gi god nok fleksibilitet for tiltenkt bruk til en lavere pris.</p>
<p data-bbox="250 800 565 831">C) Køks fra dreiebenk</p>  <p data-bbox="203 1409 256 1438">[35]</p>	<p data-bbox="824 800 1409 915">Finnes med 3 og 4 tenner. Konstruert med tanke på eksentrisitet. Vil være godt balansert med hensyn til vibrasjoner.</p>

7.2.4. Overføre effekt/variere hastighet

En prøvestav som er utsatt for vekslende belastning vil varmes opp og temperatur har en påvirkning på levetiden. Hvor mye oppvarming er avhengig av rotasjonshastigheten, og derfor kan det være aktuelt å ville styre denne for å få ønskelige testresultater.

Samtidig som høy rotasjonshastighet vil kunne gi uønskede resultater vil for lav hastighet være en ulempe. Spesielt i utdanningsammenheng for studenter er det viktig at testene kan gjennomføres på kort nok tid som laboratorieøvelse.

Tabell 7.4. Løsningsalternativer for effektoverføring og hastighetsvariering.

Alternativ	Beskrivelse
<p>A) Removerføring</p> 	<p>Motoren er koblet til akselen via en removerføring. Ved å variere størrelsene på remskivene kan man styre rotasjonshastigheten til prøvestaven. Løsningen må inkludere en funksjon for å stramme remen.</p> <p>Mulige typer: flatrem, kilerem, tannrem.</p>
<p>B) Direkte</p> 	<p>Motoren er direkte koblet til resten av systemet via en aksel. Rotasjonshastigheten til prøvestaven vil derfor være lik turtallet til motoren og det vil ikke være variabelt.</p>
<p>C) Direkte drevet med frekvensomformer</p>  <p>[36]</p>	<p>Grunnleggende samme system for effektoverføring som ovenfor, men motoren er koblet til en frekvensomformer. Ved å styre frekvensen til strømmen inn i motoren styrer man også rotasjonshastigheten til prøvestaven og denne kan stilles inn til nøyaktig ønsket verdi.</p>

7.2.5. Motor

Motoren må kunne levere jevn rotasjon og minimere vibrasjoner. Det må også tas hensyn til hva slags infrastruktur og ekstrautstyr ulike motortyper krever. Fordi det ikke stilles store krav til motoreffekt og moment vil det ikke i stor grad fokuseres på motorenes egenskaper nå det kommer til dette.

Det blir i dette tilfellet ikke presentert DC-motorer som et løsningsalternativ fordi AC-motorenes driftssikkerhet og energibesparende egenskaper i forhold anses som kritiske. Til sammenligning har DC-motorer fordeler når det kommer til variable hastigheter, noe som ikke er spesielt viktig for denne applikasjonen, der det antas at motoren vil gå med konstant hastighet i lengre perioder.

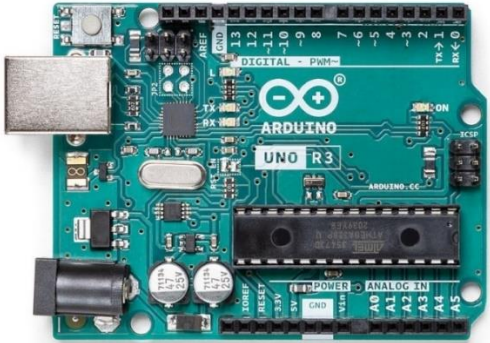
Tabell 7.5. Løsningsalternativer for motor.

Alternativ	Beskrivelse
<p>A) 1-fase AC</p>  <p>[37]</p>	<p>En 1-faset motor kan kobles inn i vanlige stikkontakter og krever ingen spesielle hensyn.</p>
<p>B) 3-fase AC</p>  <p>[38]</p>	<p>3-fase motorer kan levere jevnere kraftoverføring enn en 1-fase-motor. Kan ikke kobles til vanlige stikkontakter og er ofte dyrere enn 1-fasede alternativer.</p>


7.2.6. Registrering av brudd

Det må implementeres en løsning for registrering av brudd i prøvestaven. Ved brudd må et signal gis til motoren slik at denne stopper. Dette er både for å stoppe tellingen av rotasjoner og for å forhindre farlige situasjoner ved at løse deler roteres fritt.

Tabell 7.6. Løsningsalternativer for registrering av brudd.

Alternativ	Beskrivelse
<p>A) Forskjell i turtall</p>  <p>[39]</p>	<p>Den første løsningen er å registrere turtall på begge sider av prøvestaven og gi signalet inn i en mikrokontroller. Fordi motoren kun er festet til den ene siden vil de rotere med samme hastighet når prøvestaven er hel, men ved brudd vil det bli et avvik mellom målingene. Mikrokontrolleren vil sammenligne rotasjonshastighetene og når avviket mellom de to målingene overstiger målesikkerheten til sensorene kan motoren kuttet ut.</p>

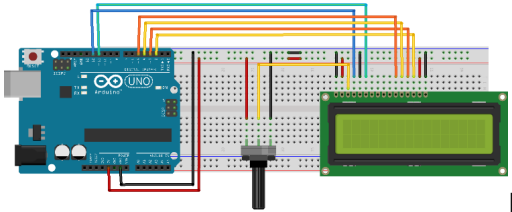

Tabell 7.6. Forts.

Alternativ	Beskrivelse
<p>B) Bryter (Limit switch)</p>  <p>[40]</p>	<p>En mekanisk bryter kan plasseres slik at den vil trykkes inn av innfestingen når prøvestaven går i brudd. En grensebryter (Limit switch) brukes får å oppdage når en gjenstand beveger seg utenfor et definert område og kan derfor brukes til å registrere brudd og koble ut motoren.</p>

7.2.7. Rotasjonsteller

Spennings-levetidsmetoden baserer seg på to variabler, spenning og levetid. For roterende bøyeutmattning er levetiden antall rotasjoner, og nøyaktig telling av totalt antall rotasjoner er kritisk.




Tabell 7.7. Løsningsalternativer for rotasjonsteller.

Alternativ	Beskrivelse
<p>A) Arduino med LCD</p>  <p>[41]</p>	<p>En mikrokontroller, for eksempel Arduino, kan ta imot rotasjonssignaler og føre dette inn i sitt interne minne. Dermed kan den telle totalt antall rotasjoner. Dette kan vises på en LCD-skjerm eller overføres til en datamaskin for videre behandling.</p>
<p>B) Mekanisk rotasjonsteller</p>  <p>[42]</p>	<p>En mekanisk rotasjonsteller kan kobles til akselen og viser totalt antall rotasjoner.</p>

7.2.8. Turteller

En turteller viser rotasjonshastigheten. Dette er nyttig for å kontrollere om maskinen roterer med ønsket turtall og kan i ettertid brukes til å estimere levetiden dersom rotasjonsteller har sviktet og man har målt tiden før brudd med en klokke.

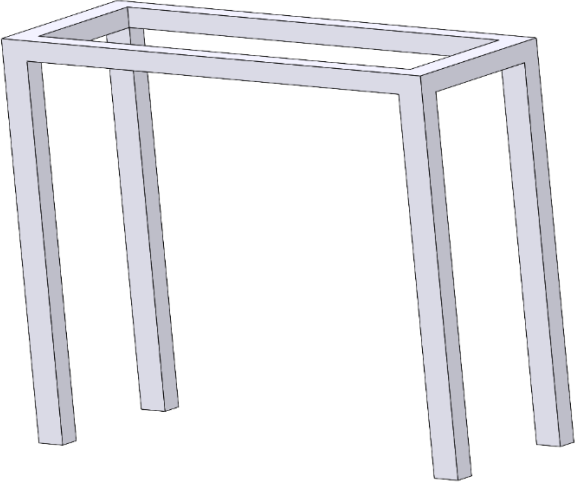
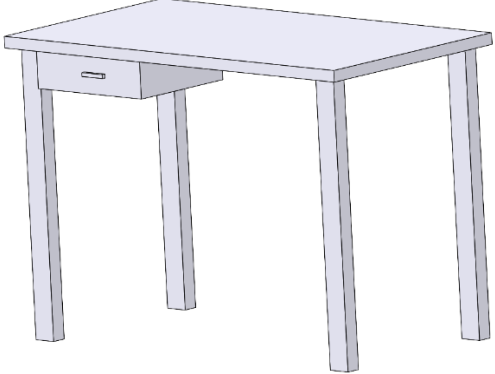
Tabell 7.8. Løsningsalternativer for turteller.

Alternativ	Beskrivelse
<p data-bbox="250 506 488 537">A) Optisk sensor</p>  <p data-bbox="672 911 727 942">[43]</p>	<p data-bbox="824 506 1414 659">Egner seg best for bærbar bruk og er avhengig av reflekterende egenskaper på akselen. Kan oppnås med reflekterende tape, men denne kan bli skitten over tid.</p>
<p data-bbox="250 947 683 978">B) Hall effect/magnetisk sensor</p>  <p data-bbox="743 1373 799 1404">[44]</p>	<p data-bbox="824 947 1377 1062">Permanente systemer bruker oftere magnetiske sensorer. Dette vil ofte fungere som en mer pålitelig permanent løsning.</p>
<p data-bbox="250 1415 553 1446">C) Mekanisk turteller</p>  <p data-bbox="743 1780 799 1812">[45]</p>	<p data-bbox="824 1415 1414 1698">Denne typen sensorer vil være dyre for å få god nøyaktighet. Det er fare for at en kontaktbasert turteller vil slite med at den slurer i forhold til akselens turtall. En permanent versjon kan mulig konstrueres som benytter for eksempel tannhjul for å oppnå best nøyaktighet.</p>

7.2.9. Oppstilling

Alternativer knyttet til oppstillingen rundt maskinen er utforsket i større detalj i den tidligere masteroppgaven til Rivas. Det vil derfor gjøres enklere her, og det er fokus på at det skal være lett å forstå maskinen.

Tabell 7.9. Løsningsalternativer for oppstillingen av maskinen.

Alternativ	Beskrivelse
<p data-bbox="251 506 560 541">A) Enkelt rammeverk</p> 	<p data-bbox="849 506 1414 663">Utmattingsmaskinen er stilt opp i et enkelt rammeverk uten noen bordplate eller ekstra funksjoner. Hovedfokus på at det er enkelt å konstruere.</p>
<p data-bbox="251 1068 548 1104">B) Bord/arbeidsbenk</p> 	<p data-bbox="849 1068 1398 1188">Utmattingsmaskinen er stilt opp på et bord som har noen ekstra elementer, som skuff for verktøy og ekstrautstyr.</p>

7.3. Form- og estetikkalternativer

Enkelhet er kritisk, og designet vil følge funksjonelle behov fremfor estetiske hensyn. Det er likevel krav til at maskinen skal utformes slik at det er tilsyn til funksjoner og at disse skal være lett å forstå. Det må også tas hensyn til sikkerhet i utformingen slik at alle roterende elementer er tilstrekkelig avskjermet. Avskjermingen bør være tilstrekkelig gjennomsiktig dersom dette er sikkerhetsmessig forsvarlig for å sikre innsyn til prøvestaven.

8. Konseptscreening og valg

I dette kapitlet vil det gjennomføres konseptvalg av funksjonsalternativene fra forrige kapittel. Ved bruk av Pughs metodikk i form av seleksjonsmatriser er målet å gjøre konseptvalg på mest mulig effektiv og objektiv måte. Etter gjennomført screening og seleksjon sitter man igjen med løsninger som kan videreutvikles til et ferdig produkt.

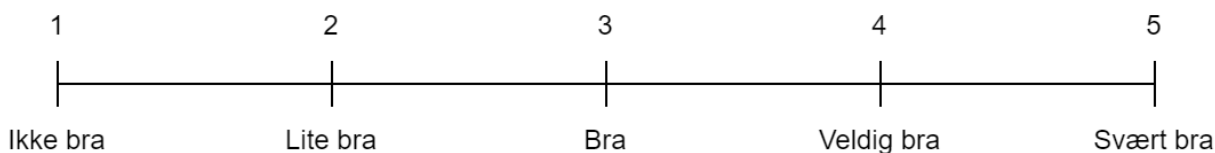
8.1. Utvikling av seleksjonsmatrise

Seleksjonsmatrisene blir utviklet med bakgrunn i Pughs metodikk og baseres også på rangeringen av viktighet av produktegenskaper fra kapittel 5.2. Den andre aksene, kvalitetsaksen, vil også rangeres i en skala fra 1 til 5. Hver av løsningsforslagene fra kapittel 7 skal få poeng for hvor godt disse oppfyller hver av produktegenskapene. Deretter ganges disse med vektningen, og hver av alternativene får en total poengsum.

For hver av funksjonene velges den løsningen med høyest poengsum. Med denne objektive vurderingen sitter man igjen med en total konseptløsning som skal utvikles videre.



Figur 8.1. Skala for rangering av viktighet, hentet fra kapittel 5.2. I praksis benyttes skalaen fra 2 til 5 fordi egenskaper som ville vært rangert som «ikke viktig» ikke blir vurdert.



Figur 8.2. Skala for rangering av kvalitet. Her blir hele bredden benyttet i rangering av løsningsforslagenes kvalitet i utfyllelse av viktige produktegenskaper. I alle tilfeller er 5 beste oppnåelige verdi. For eksempel i vurdering av kostnad får et billig alternativ høyere score enn et dyrt et.

8.2. Egen konseptscreening

Her presenteres seleksjonsmatrisene for funksjoner fra kapittel 7. Gjennom seleksjonsprosessen kommer man fram til en fullstendig løsning med de beste løsningene.

Valg av belastningssystem

- A) Direkte vekter
- B) Vekt og arm
- C) Lineær aktuator

Tabell 8.1. Egenscreening av funksjonsalternativer for belastningssystemet.

1. Belastningssystem							
Egenskap	Vekting	A)		B)		C)	
		Poeng	Sum	Poeng	Sum	Poeng	Sum
Effektivitet	4	4	16	4	16	2	8
Fleksibilitet	3	3	9	4	12	5	15
Nøyaktighet	5	4	20	5	25	3	15
Funksjonalitet	5	5	25	5	25	2	10
Brukervennlighet	4	5	20	4	16	2	8
Kompleksitet	4	5	20	3	12	1	4
Robusthet	4	4	16	3	12	2	8
Størrelse	2	4	8	3	6	2	4
Sikkerhet	5	4	20	4	20	4	20
Kostnad	4	5	20	4	16	2	8
Vektet sum	-	-	174	-	160	-	100

Løsningen med flest poeng ble direkte vekter. Den blir valgt som den mest simple løsningen som vil være enklest å bruke. Man mister noe fleksibilitet sammenlignet med den lineære aktuatoren. Man mister også noe evne til å påføre høye bøyemomenter som vektarm-løsningen vil kunne gi. Bedre brukervennlighet og kompleksitet veier likevel tyngre i dette tilfellet.

Valg av opplagring

- A) Fritt opplagret
- B) Fast opplagret

Tabell 8.2. Egenscreening av funksjonsalternativer for opplagring av innspenning.

2. Opplagring					
Egenskap	Vekting	A)		B)	
		Poeng	Sum	Poeng	Sum
Effektivitet	4	4	16	4	16
Fleksibilitet	3	5	15	4	12
Nøyaktighet	5	5	25	4	20
Funksjonalitet	5	4	20	4	20
Brukervennlighet	4	4	16	4	16
Kompleksitet	4	3	12	5	20
Robusthet	4	3	12	4	16
Størrelse	2	3	6	3	6

Tabell 8.2. Forts.

Egenskap	Vekting	A)		B)	
		Poeng	Sum	Poeng	Sum
Sikkerhet	5	3	15	3	15
Kostnad	4	3	12	4	16
Vektet sum	-	-	149	-	157

Det er ikke mye som skiller disse to løsningene. Det blir lagt vekt på at det vil være en utfordring å finne en løsning der opplagringen vil kunne bevege seg friksjonsfritt. Samtidig er det blitt argumentert i kapittel 5, med bakgrunn i utledning fra Timoshenko, for at nedbøyingen i midten normalt vil være veldig liten og derfor ikke gi betydelige aksiale spenninger. Det anses derfor som unødvendig å utvikle en løsning for friksjonsfri glidning for opplagringen.

Valg av festemekanisme

- A) Drillkjoks
- B) Spennhylse
- C) Kjoks fra dreiebank

Tabell 8.3. Egenscreening av funksjonsalternativer for festemekanisme/kjoks.

3. Festemekanisme							
Egenskap	Vekting	A)		B)		C)	
		Poeng	Sum	Poeng	Sum	Poeng	Sum
Effektivitet	4	4	16	3	12	3	12
Fleksibilitet	3	3	9	5	15	4	12
Nøyaktighet	5	2	10	4	20	4	20
Funksjonalitet	5	4	20	5	25	4	20
Brukervennlighet	4	5	20	4	16	3	12
Kompleksitet	4	4	16	3	12	3	12
Robusthet	4	2	8	4	16	4	16
Størrelse	2	4	8	3	6	2	4
Sikkerhet	5	4	20	4	20	4	20
Kostnad	4	5	20	3	12	3	12
Vektet sum	-	-	147	-	154	-	140

Valget her falt på spennhylsen. Dette er en dyrere løsning, men valget begrunnes med at drillkjoksen ikke er laget for applikasjoner der eksentrisitet er kritisk. Det anslås derfor at løsningen med spennhylser vil gi mer nøyaktige resultater ved at innspenningene på begge sider har bedre eksentrisitet.

Valg av effektoverføring

- A) Removerføring
- B) Direkte
- C) Direkte med frekvensomformer

Utvikling av roterende 4-punkts bøyeutmattingsmaskin

Tabell 8.4. Egenscreening av funksjonsalternativer foreffektoverføring.

4. Effektoverføring							
Egenskap	Vekting	A)		B)		C)	
		Poeng	Sum	Poeng	Sum	Poeng	Sum
Effektivitet	4	4	16	4	16	3	12
Fleksibilitet	3	4	12	2	6	5	15
Nøyaktighet	5	4	20	4	20	5	25
Funksjonalitet	5	3	15	3	15	3	15
Brukervennlighet	4	4	16	5	20	3	12
Kompleksitet	4	2	8	4	16	2	8
Robusthet	4	3	12	4	16	2	8
Størrelse	2	3	6	4	8	3	6
Sikkerhet	5	3	15	4	20	4	20
Kostnad	4	4	16	5	20	1	4
Vektet sum	-	-	136	-	157	-	125

Valg løsning ble direkte driv. Man mister muligheten til å regulere rotasjonshastigheten ved å bytte ut remskiver eller bruke frekvensomformer. Løsningen er billigst og enklest, og man har muligheten til å installere en frekvensomformer senere om det skulle være behov uten store merkostnader.

Valg av motor

- A) 1-fase motor
- B) 3-fase motor

Tabell 8.5. Egenscreening av funksjonsalternativer for motor.

5. Motor					
Egenskap	Vekting	A)		B)	
		Poeng	Sum	Poeng	Sum
Effektivitet	4	4	16	4	16
Fleksibilitet	3	3	9	4	12
Nøyaktighet	5	3	15	5	25
Funksjonalitet	5	4	20	4	20
Brukervennlighet	4	3	12	4	16
Kompleksitet	4	5	20	3	12
Robusthet	4	4	16	2	8
Størrelse	2	3	6	4	8
Sikkerhet	5	4	20	4	20
Kostnad	4	5	20	2	8
Vektet sum	-	-	154	-	145

3-fase motoren krever tilgang til 3-fase strøm og dette vil kunne begrense bruken. Bruk av en 1-fase motor er derfor en enklere og billigere løsning, og dette er valgt løsning.

Valg av registrering av brudd

- A) Forskjell i turtall
- B) Mekanisk bryter

Tabell 8.6. Egenscreening av funksjonsalternativer for registrering av brudd i prøvestav.

6. Registrere brudd					
Egenskap	Vekting	A)		B)	
		Poeng	Sum	Poeng	Sum
Effektivitet	4	3	12	3	12
Fleksibilitet	3	4	12	3	9
Nøyaktighet	5	4	20	5	25
Funksjonalitet	5	3	15	4	20
Brukervennlighet	4	3	12	3	12
Kompleksitet	4	2	8	4	16
Robusthet	4	3	12	5	20
Størrelse	2	3	6	3	6
Sikkerhet	5	2	10	4	20
Kostnad	4	3	12	3	12
Vektet sum	-	-	119	-	152

Valgt løsning ble mekanisk bryter. Denne løsningen anses som både enklere å implementere og mer pålitelig når det kommer til registrering av brudd. Fordi det er en mekanisk bryter som registrerer brudd er man ikke avhengig av en mikrokontroller som gjør beregninger. Det vil derfor også være en sikrere løsning.

Valg av rotasjonsteller

- A) Mekanisk teller
- B) Arduino med skjerm

Tabell 8.7. Egenscreening av funksjonsalternativer for rotasjonsteller.

7. Rotasjonsteller					
Egenskap	Vekting	A)		B)	
		Poeng	Sum	Poeng	Sum
Effektivitet	4	4	16	3	12
Fleksibilitet	3	3	9	4	12
Nøyaktighet	5	4	20	3	15
Funksjonalitet	5	3	15	5	25
Brukervennlighet	4	4	16	3	12
Kompleksitet	4	4	16	2	8
Robusthet	4	2	8	4	16
Størrelse	2	3	6	3	6
Sikkerhet	5	3	15	3	15
Kostnad	4	2	8	4	16
Vektet sum	-	-	129	-	137

Utvikling av roterende 4-punkts bøyeutmattingsmaskin

Løsningen for visning av antall rotasjoner ble valgt til Arduino med skjerm. Mekaniske tellere som tåler høye turtall vil være dyre til innkjøp og ikke ha samme funksjonalitet og fleksibilitet som en Arduino. Med en Arduino kan man lagre resultatene digitalt og ved bruk av en nøyaktig turteller vil resultatet for antall rotasjoner før brudd også være nøyaktig.

Valg av turteller

- A) Optisk
- B) Magnetisk
- C) Mekanisk

Tabell 8.8. Egenscreening av funksjonsalternativer for turteller.

8. Turteller							
Egenskap	Vekting	A)		B)		C)	
		Poeng	Sum	Poeng	Sum	Poeng	Sum
Effektivitet	4	4	16	4	16	4	16
Fleksibilitet	3	4	12	3	9	3	9
Nøyaktighet	5	3	15	5	25	3	15
Funksjonalitet	5	4	20	5	25	3	15
Brukervennlighet	4	3	12	3	12	4	16
Kompleksitet	4	4	16	4	16	3	12
Robusthet	4	3	12	4	16	2	8
Størrelse	2	3	6	3	6	2	4
Sikkerhet	5	4	20	4	20	2	15
Kostnad	4	4	16	3	16	3	16
Vektet sum	-	-	145	-	161	-	111

Magnetisk turteller ble valgt som løsningen med mest poeng. Magnetiske turtellere er oftest brukt i permanente installasjoner der nøyaktighet er viktig.

Tabell 8.9. Egenscreening av funksjonsalternativer for oppstilling

9. Oppstilling					
Egenskap	Vekting	A)		B)	
		Poeng	Sum	Poeng	Sum
Effektivitet	4	4	16	5	20
Fleksibilitet	3	1	3	4	12
Nøyaktighet	5	3	15	3	15
Funksjonalitet	5	2	10	4	20
Brukervennlighet	4	4	16	3	12
Kompleksitet	4	4	16	3	12
Robusthet	4	4	16	4	16
Størrelse	2	3	6	3	6
Sikkerhet	5	3	15	4	20
Kostnad	4	5	20	4	16
Vektet sum	-	-	129	-	149

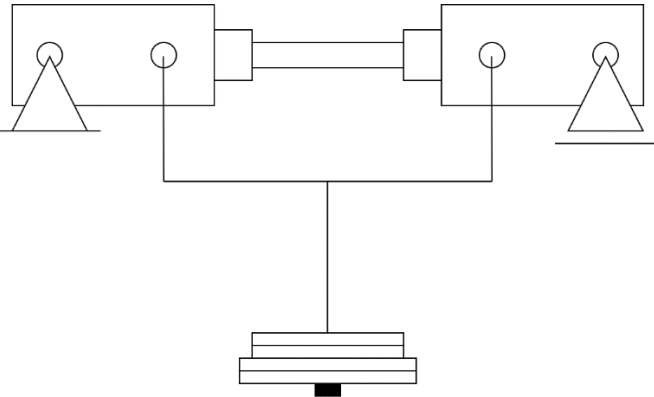
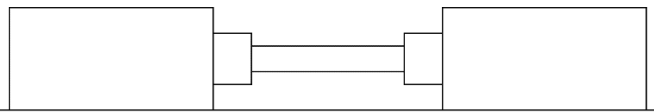

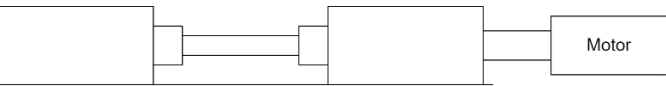
Utvikling av roterende 4-punkts bøyeutmattingsmaskin

Det blir her valgt å stille utmattingsmaskinen opp på et bord. Dette åpner for muligheten å ha noen ekstra funksjoner, som skuff for verktøy.

8.3. Foretrukne løsningsalternativer


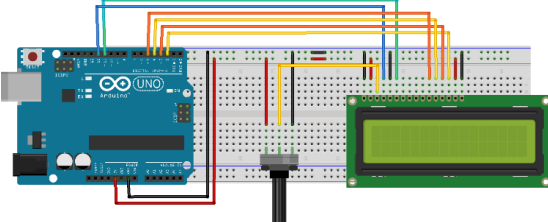

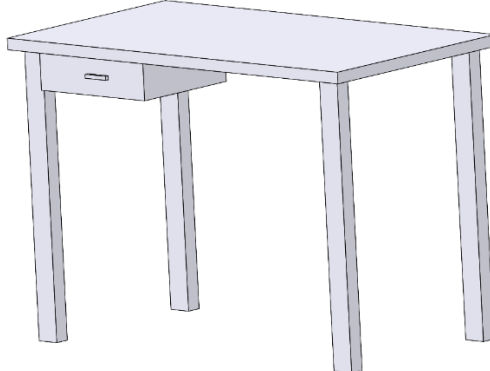
En tabell viser en oppsummering av de funksjonsalternativene som nå er valgt ut og skal utvikles til en helhetlig konseptløsning.

Tabell 8.10. Valgte funksjonsalternativer etter Pughs metode.

Figur	Beskrivelse
	Belastingssystem Direkte vekter
	Opplagring Fast opplagring
	Innspenning Spennhylse
	Effektoverføring Direkte drevet

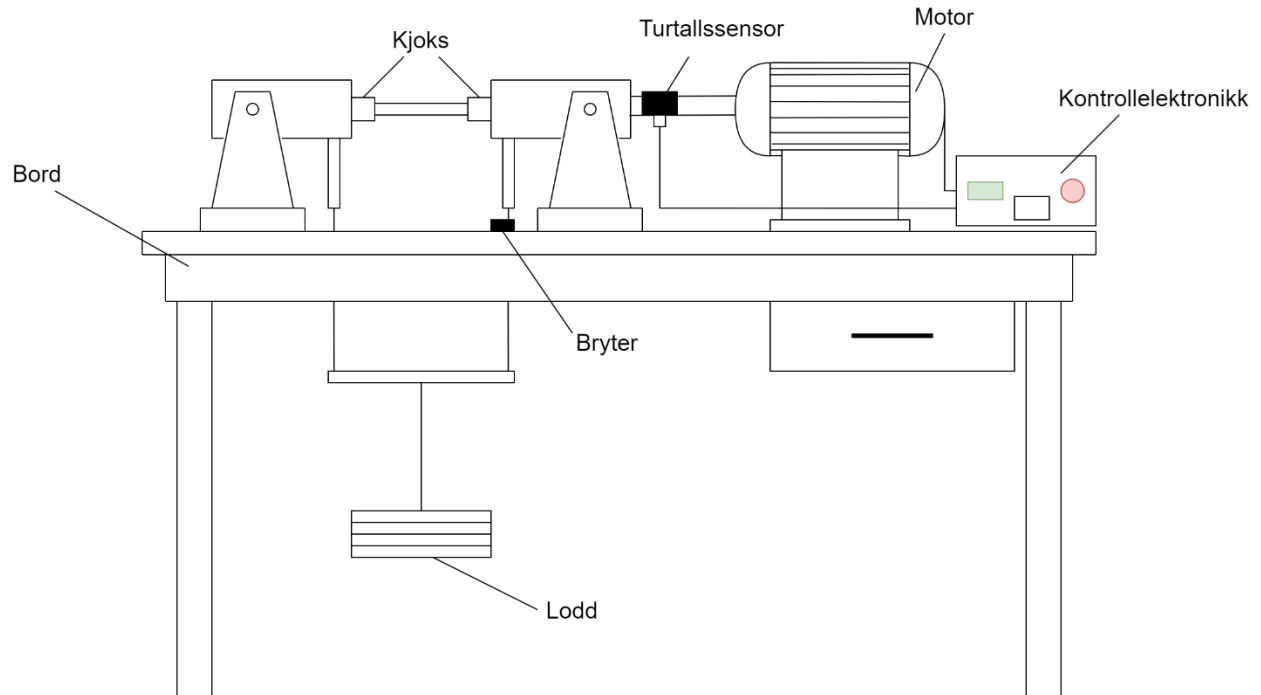
Utvikling av roterende 4-punkts bøyeutmatningsmaskin

Tabell 8.10. Forts.

Figur	Beskrivelse
	<p>Motor AC-motor med 1 fase</p>
	<p>Bruddregistrering Mekanisk bryter</p>
	<p>Rotasjonsteller Mikrokontroller med data fra turtallssensor</p>
	<p>Turtallssensor Magnetisk sensor</p>
	<p>Oppstilling Bord</p>

Utvikling av roterende 4-punkts bøyeutmattingsmaskin

Under finnes det en tidlig skisse som viser de ulike hovedkomponentene som er valgt ut i dette kapittelet. Dette er utgangspunktet for hvordan konstruksjonen skal utvikles videre.



Figur 8.1. Helhetlig skisse av funksjonsvalg og løsninger viser hvordan de utvalgte alternativene kommer sammen til et fullstendig løsningskonsept.

9. Grovberegninger

For å få en best mulig sikkerhet og robusthet i konstruksjonen av testbenken er det nødvendig å gjøre en del grunnleggende beregninger av utvalgte eller kritiske elementer i konstruksjonen. Dette omfatter spesielt innfesting, roterende deler og belastningssystem, men også betraktninger knyttet til brukssikkerhet.

9.1. Beregningsmålsettinger

Hovedmål:

Å klarlegge belastninger på konstruksjon og konstruksjonselementer under bruk i laboratoriet, samt viktige forhold knyttet til konstruktiv og brukssikkerhet, samt legge beregningsgrunnlag for best mulig material og tverrsnittvalg.

Delmål/beregningsfokus:

Det vil dimensjoneres oppheng for vekter slik at det tåler tenkte brukspåkjenning og enkelte lengder vil fastsettes slik at man kan oppnå ønsket bøyemoment på prøvestaven. Det tas utgangspunkt i et ønsket maksimalt bøyemoment på prøvestaven og maksimal vekt som er tilgjengelig som lodd.

Følgende elementer skal bli beregnes eller dimensjoneres:

- **Kontrollere bøyespennning i prøvestav ved grensebetingelser.**

For å kontrollere at konstruksjonen er egnet til å oppnå utmattingsbrudd kontrolleres bøyespenningen i prøvestaven ved høyeste praktiske belastning.

- **Lengde på innspenning/lagerhus.**

Med utgangspunkt i ønsket maksimale vekt på lodd som skal brukes og maksimal ønsket bøyemoment på prøvestaven skal armen vekten virker på bestemmes. Dette tilsvarer avstanden mellom opplagring til lagerhuset og innfesting til lodd-mekanismen.

- **Profil for fordeling av vekt mellom lagerhus/løfteåk.**

En profil må fordele vekten fra lodd på to punkter, ett på hvert lagerhus. Denne profilen må tåle statisk belastning fra loddene og inneholde 3 festepunkter.

- **Spennning ved havari av lager.**

Dersom et lager skulle låse seg vil maksimalt moment fra motoren påføres aksel eventuelt prøvestav. Dette er en «worst case» tilfelle for spenninger i aksel.

Enkelte deler av oppheng og oppstilling av maskinen vil også undersøkes slik at det tåler de statiske brukspåkjenningene.

9.2. Forutsetninger

Forenklinger

Det er valgt å se bort ifra egenvekt i lagerhus da det er usikkerhet rundt nøyaktig geometri og materialvalg. Dette er noe som bør kalibreres for maskinen med strekkklapper på prøvestaven uten noen ekstra belastning.

Det antas at det ikke er noen normalkrefter i systemet, og at lagerhus og lastpåføringsmekanismen er isolert fra eventuelle skjærkrefter fra aksel og motor.

Forutsatte egenskaper

For beregningene forutsettes det at maksimal tyngde på lodd tilgjengelig er 50 kg. Ønsket maksimale bøyemoment på prøvestaven settes til **25 Nm**. På anbefaling fra oppdragsgiver anses den minste praktiske diameteren til prøvestaven som 6 mm på det smaleste.

Sikkerhetsfaktor

For beregningene gjennomført her baseres tillatt spenning på materialets strekkfasthet. Sikkerhetsfaktor mot brudd for statiske belastninger **settes til 3**.

Foreløpig materialvalg

Som utgangspunkt for beregninger antas bruk av **konstruksjonsstål i kvalitet S235**. Med strekkfasthet $R_m = 360 \text{ MPa}$ gir dette:

$$\sigma_{till} = \frac{R_m}{n_b} = \frac{360 \text{ MPa}}{3} = 120 \text{ MPa}$$

9.3. Beregningstrinn

Kontrollere bøyepening i prøvestav ved grensebetingelser

Finner motstandsmoment for prøvestav med minste diameter 6 mm:

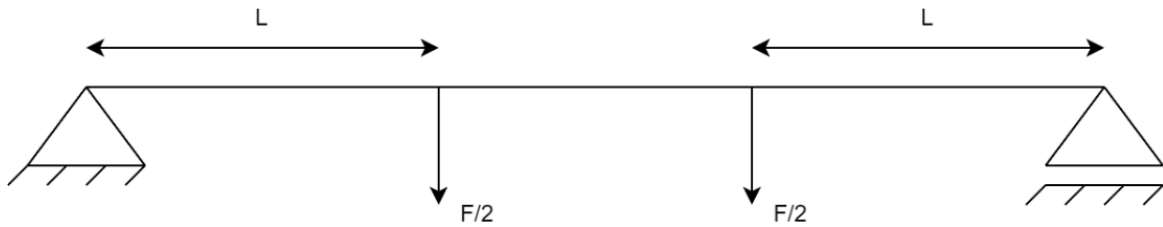
$$W_b = \frac{\pi D^3}{32} = \frac{\pi 6^3}{32} = 21,21 \text{ mm}^3$$

Finner bøyepening i prøvestav:

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W_b} = \frac{25 \text{ Nm}}{21,21 \text{ mm}^3} = 1179 \text{ MPa}$$

For mange stålmaterialer er utmattingsgrensen ca. 50% av strekkfastheten, R_m . Med dette kan utmattingsmaskinen i teorien benyttes til å nå utmattingsgrensen til stålmaterialer med strekkfasthet over 2000 MPa ved grensebetingelser.

Lengde på innspenning/lagerhus



Figur 9.1. Skisse av definerte lengder, krefter og opplagring for lagerhusene.

Finner størrelsen på kraften F ved 50 kg lodd:

$$F = m \cdot g = 50 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 490,5 \text{ N}$$

Formel for moment M:

$$M = \frac{F}{2} \cdot L$$

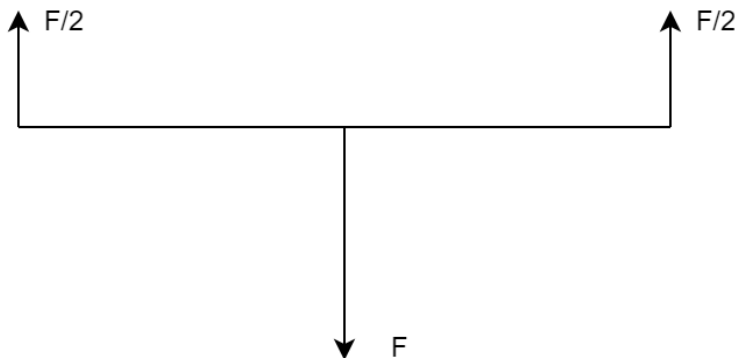
Finner lengde L fra ønsket moment og kraft F:

$$L = \frac{2M}{F} = \frac{2 \cdot 25 \text{ Nm}}{490,5 \text{ N}} = 102 \text{ mm}$$

Det er funnet at for å gi ønsket bøyemoment på 25 Nm ved påførte lodd med masse 50 kg må avstanden mellom opplagring til lagerhus og angrepspunkt for belastningen være 102 mm. Dette gir formel for påført bøyemoment på prøvestaven:

$$M [\text{Nm}] = \frac{m [\text{kg}]}{2}$$

Profil for fordeling av vekt mellom lagerhus/løfteåk



Figur 9.2. Krefter som virker på profilen. Profilen har en lengde på 150 mm.

Utvikling av roterende 4-punkts bøyeutmattingsmaskin

Kraften F er som ovenfor:

$$F = 490,5 \text{ N}$$

Antar at det skal benyttes et profil med lengde 100 mm. Dette gir bøyemoment:

$$M_b = \frac{F}{2} \cdot \frac{L}{2} = \frac{490,5 \text{ N}}{2} \cdot \frac{150 \text{ mm}}{2} = 18394 \text{ Nmm}$$

Finner nødvendig motstandsmoment:

$$W_b = \frac{M_b}{\sigma_{till}} = \frac{18394 \text{ Nm}}{120 \text{ MPa}} = 153,3 \text{ mm}^3$$

Om man går ut ifra en kvadratprofil må dimensjonene være:

$$W_b = \frac{b^3}{6}$$

$$b = \sqrt[3]{6W_b} = \sqrt[3]{6 \cdot 153,3} = 9,7 \text{ mm}$$

En kvadratprofil med lengde 10 mm gir tilfredsstillende spenning.

Spenning ved havari av lager

For å forstå hva som sannsynligvis vil skje ved lagerhavari undersøkes vridespenningen som vil oppstå dersom et lager låser seg. Kontrollerer først torsjonsspenning i prøvestav med diameter 6 mm, som i tillegg er belastet med bøyepening lik halvparten av strekkfastheten. Den polare motstandsmodulen for sirkulært tverrsnitt:

$$W_p = \frac{\pi \cdot d^3}{16} = \frac{\pi \cdot 6^3}{16} = 42,4 \text{ mm}^3$$

Vridningsmomentet fra motoren er antatt 3,18 Nm. Det gir følgende torsjonsspenning:

$$\tau_t = \frac{M_v}{W_p} = \frac{3180 \text{ Nmm}}{42,4 \text{ mm}^3} = 75 \text{ MPa}$$

Ved bruk av von Mises spenningshypotese finner man jevnførende spenning. Antar at prøvestaven er av S235 stål og har en strekkfasthet lik 360 MPa. Bøyepeningen er derfor 180 MPa.

$$\sigma_{jf} = \sqrt{\sigma_b^2 + 3 \cdot \tau_t^2} = \sqrt{180^2 + 3 \cdot 75^2} = 222 \text{ MPa}$$

Da er sikkerhetsfaktor mot brudd:

$$n_b = \frac{R_m}{\sigma_{jf}} = \frac{360}{222} = 1,6$$

Det konkluderes derfor med at en prøvestav i stål antagelig ikke vil brytes av dersom et lager låser seg ved disse belastningene. Dersom bøyemomentet på prøvestaven ville vært større øker muligheten for at staven brytes.

Akselen som vil ha både større diameter og ikke være utsatt for bøyemoment antas derimot å være trygg. I dette tilfellet vil det derfor være behov for overlastsikring av motoren for å forhindre høy strømbruk og overbelastning av elektronikk.

9.4. Materialer og tidlige styrkebetraktninger

Materialdata til noen aktuelle ståltyper er presentert nedenfor.

Tabell 10.1 Materialdata for aktuelle kvaliteter av konstruksjonsstål [46, 47].

Konstruksjonsstål	Karboninnhold [%]	Strekkfasthet, R_m [MPa]	Flytegrense, R_e [MPa]	E-modul [GPa]
S235JR	0,17-0,20	360	235	206
S275J0	0,18	430	275	206
S355J0	0,20	510	355	206

Gjennom grovberegningene er det oppdaget at de statiske belastningene i konstruksjonen ikke er veldig store. Derfor vil det være aktuelt å vurdere aluminiumslegeringer som produksjonsmateriale. Aluminium har visse fordeler, som for eksempel at det er enklere å maskinere. Det har også en lavere tetthet enn stål.

Endelig materialvalg vil gjøres etter FEM-analyser og eksterntesting, og er presentert sammen med produksjonsmetode i kapittel 13.

10. Eksperttesting og eksterninput

Dette kapittelet tar for seg eksterntesting av valgt konsept. Ekspertene blir benyttet for å få innspill på valgte løsninger, dimensjonering, konstruksjon og produksjon. Det blir gjort rede for målene for eksterntesting og en gjennomgang av resultater og tilbakemeldinger.

10.1. Testmålsettinger

For å få mest mulig ut av eksterntesting settes det klare mål på hva som er ønskelig å oppnå og finne svar på. Målene vil brukes til å formulere spørsmål til ekspertgruppen.

10.1.1. Hovedmål

Hovedmålet er å få klarhet i usikkerhetsmomenter knyttet til valgte løsninger og utførte beregninger. Resultatene bør kunne benyttes i videre utforming av arkitekturen.

10.1.2. Delmål

Følgende punkter er mer spesifikke delmål for eksterntesting.

- Kartlegge hvorvidt valgte løsninger er hensiktsmessige og oppfyller satte krav.
- Forhøre seg om utførte beregninger er fornuftige og tilstrekkelige.
- Få råd rundt valg av materialer og produksjonsmetoder, samt tilhørende kostnader tidsbruk.
- Diskutere små detaljer i konstruksjonen og hvilke småkomponenter som vil kunne være nødvendige.

10.2. Gjennomføring

Kommunikasjonen i eksperttesting ble gjennomført gjennom møter, både digitalt og fysiske. Det ble fokusert på å stille aktuelle spørsmål og åpne diskusjoner om forbedringspotensialer og designhensyn.

10.3. Testpopulasjon

Testpopulasjonen er valgt ut etter hvem som er eksperter med kompetanse som kan belyse aktuell problematikk og gi svar på usikkerhetsmomenter. Informasjonen og rådene de kommer med vil være med på videre i arbeidsprosessen.

Tabell 10.1. Ekspertene som deltar i eksterntesting, med deres spesialkompetanse og fagområde.

Tittel og navn	Spesialkompetanse og fagområde
Førsteamanuensis Geir Terjesen	Dimensjoneringsteknikk og beregning, oppdragsgiver
Senioringeniør Øyvind Hansen	Verkstedmester for prototypeverkstedet, produksjonsmetoder

10.4. Resultater

Førsteamanuensis Geir Terjesen

Fordi Terjesen er oppdragsgiver ble det her diskutert hvorvidt valgte løsninger vil gi ønskede resultater. Her kom det fram at valgt konsept og tidlige designskisser vil resultere i konstant bøyemoment over prøvestaven slik som er ønsket.

Det ble også diskutert hvilke beregninger som burde gjennomføres. Det ble anbefalt å beregne bøyespennning i prøvestaven ved valgte spesifikasjoner for å få en indikasjon på levetid og utmattingsgrense.

Generelle anbefalinger og råd fra Geir Terjesen:

- I praksis vil den minste mulige diameteren for prøvestaver være ca. 6 mm.
- For studentøvelser vil det være fornuftig å få ned tiden før brudd.
- For stål er utmattingsgrensen ofte rundt halvparten av strekkfastheten.
- Det vil være svært liten deformasjon av prøvestaven, så dette er ikke noe man behøver å ta mye hensyn til i designprosessen.

Senioringeniør Øyvind Hansen

Med Hansen ble det fokusert på å få råd rundt materialvalg og produksjonsmetoder. Det ble også brukt tid på å diskutere aktuelle innkjøpte komponenter som kan oppfylle funksjoner som er usikre i løsningsarkitekturen. Dette gjelder for eksempel hvordan man kan isolere bevegelser i innspenningen av prøvestaven som vil vippe og motoren som er fast montert.

Materialer:

Hansen anbefaler aluminium for det meste av komponenter (konstruksjonsaluminium, 6000-serien), eksempelvis aluminium 6082. Dette fordi aluminium er raskere å maskinere enn stål. Derfor bør aluminium benyttes der dette oppfyller styrkekrav. Disse komponentene kan el-oxidere som overflatebehandling, noe som vil gi omtrent uendelig levetid i innendørsklima. I tillegg vil dette gi et visuelt godt utseende. Akselen er en komponent som bør produseres i stål.

Produksjon:

Tid ved produksjon koster ofte mer enn materialer. Fordi aluminium er enklere og raskere å maskinere kan dette være en billigere løsning enn stål. En CNC-fres kan ta ut alle delene på 2-4 timer. Estimert pris for å benytte CNC-maskin er 1500 kr per time.

Design:

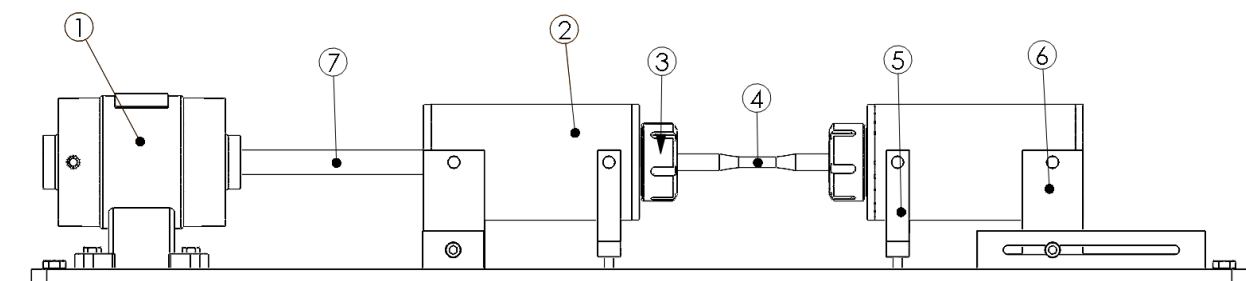
To kjevekoblinger på akselen kan brukes for å tillate bevegelse. Dette gir også høyere toleranse for skeivstillinger og oppstilling, og vil derfor være tidsbesparende ved montering.

11. Løsningsarkitektur

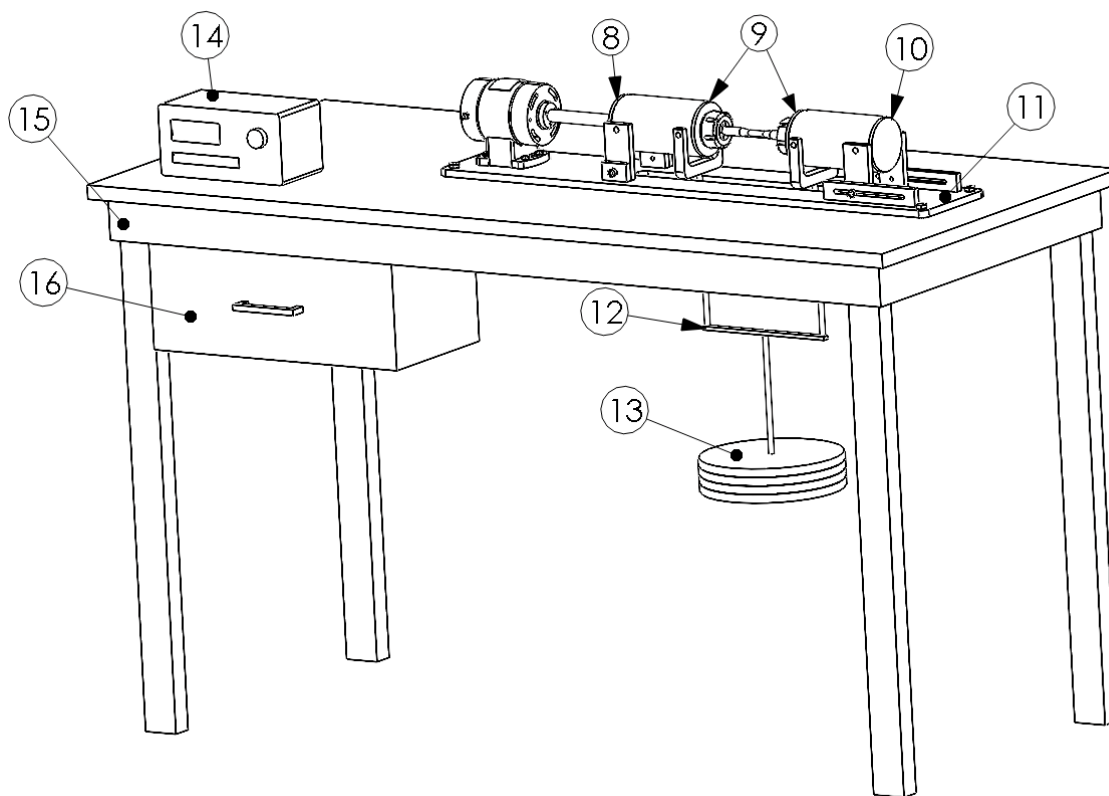
Her presenteres løsningsarkitekturen gjennom sammenstillingstegninger og detaljsskisser av viktige komponenter.

11.1. Helhetsoversikt

Nedenfor vises en helhetsoversikt av sammenstilling med nummerering av hovedkomponenter og noen andre viktige komponenter. Ikke tegnet inn er sensorer, brytere og ledninger.



Figur 11.1. Sideprofil av hovedkomponenter i sammenstillingstegning med nummerering.



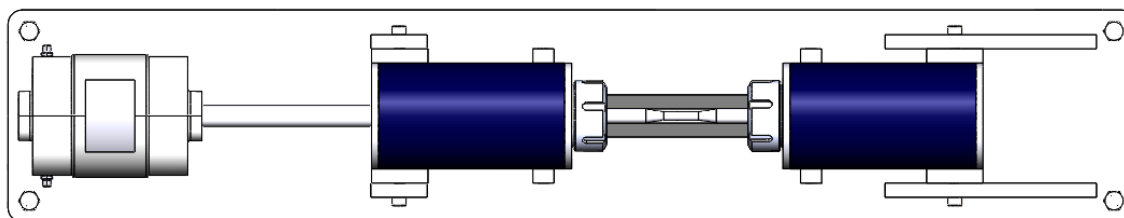
Figur 11.2. Oversiktstegning inkluderer oppstilling og andre komponenter i konstruksjonen med nummerering.

Tabell 11.1. Komponenter etter nummerering fra sammenstillingstegninger med beskrivelse og antall.

Nr.	Hovedkomponent	Beskrivelse	Antall
1	Motor	Driver rotasjon for prøvestaven.	1
2	Lagerhus	Holder lager og kjoks. Huser også sensor for rotasjonsmåling.	2
3	Kjoks	Spenner fast prøvestav.	2
4	Prøvestav	Testobjekt.	1
5	Gaffel	Overfører last til lagerhusene.	2
6	Fot til lagerhus	Fester lagerhus til bunnplate.	4
7	Aksel	Overfører rotasjon fra motor til kjoks.	1
8	Lokk med hull til aksel	Lukker mye av det roterende inne og beskytter lagre. Inneholder hull til aksel.	1
9	Lokk med hull til kjoks	Lukker mye av det roterende inne og beskytter lagre. Inneholder hull til kjoks.	1
10	Lokk	Lukker mye av det roterende inne og beskytter lagre.	2
11	Bunnplate	Binder konstruksjonen sammen.	1
12	Vektholder	Fordeler vekt fra lodd til hver av lagerhusene.	1
13	Lodd	Belastning til prøvestaven.	4
14	Elektronikkboks	Inneholder elektronikk som mikrokontroller til behandling av sensordata, skjerm, startknapp og stoppknapp.	1
15	Bord	Oppstilling.	1
16	Skuff	Skuff til oppbevaring av blant annet verktøy og ekstrautstyr.	1

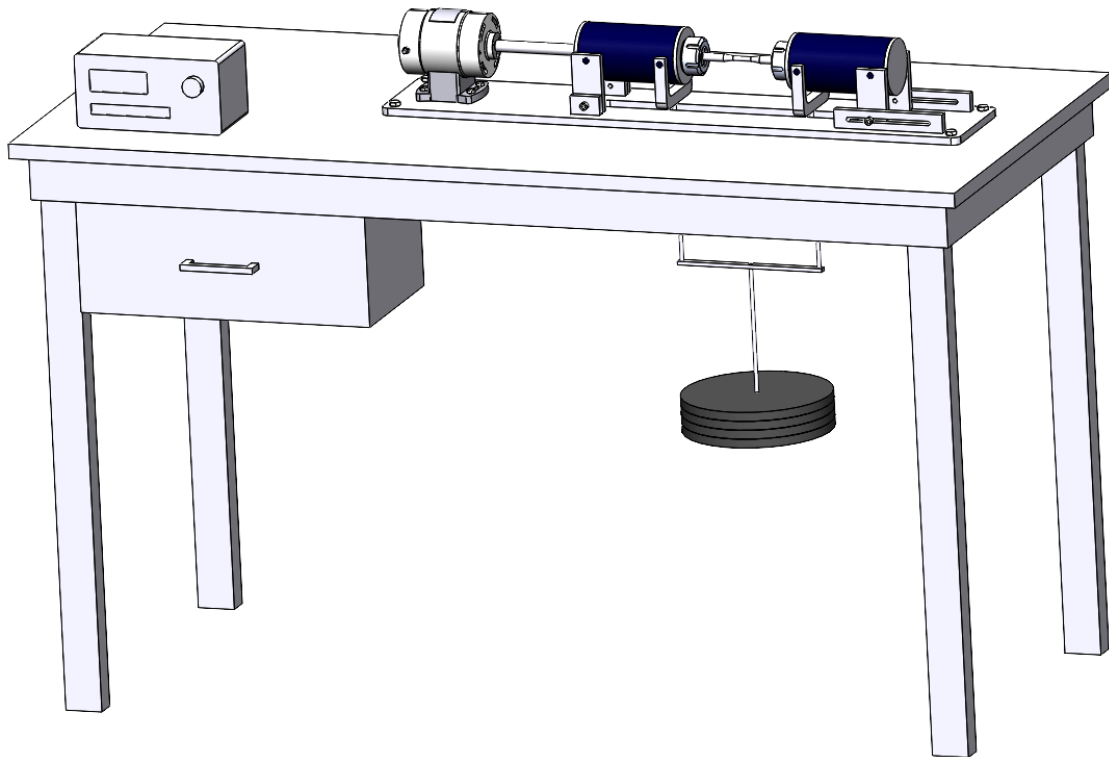
11.2. Basisrenderinger i 3D

Basisrenderte helhetstegninger gir en bedre oversikt over konstruksjonen i 3D og enkelte detaljer i sammenstillingen.

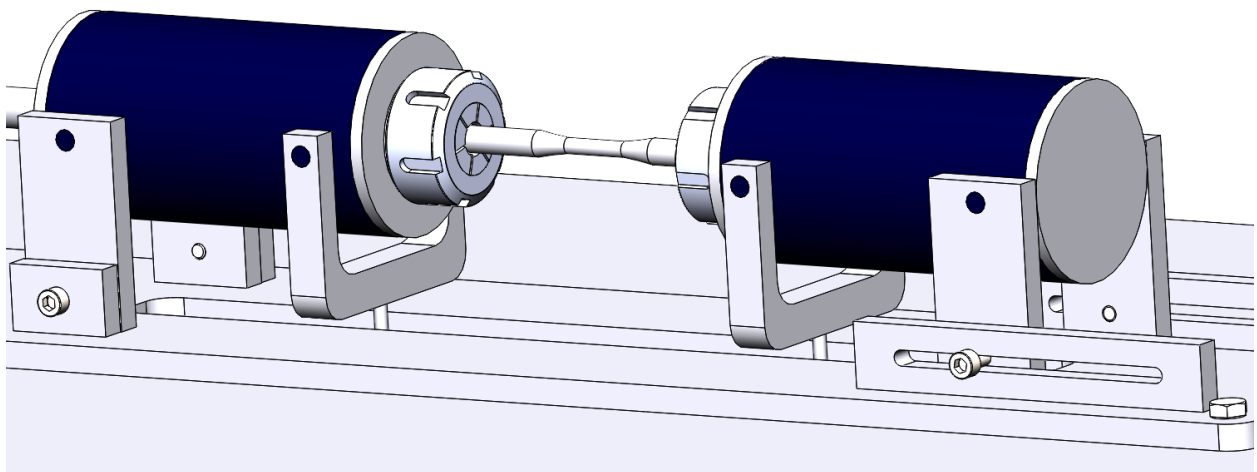


Figur 11.3. Hovedmaskinen uten oppstilling sett ovenfra. Motoren er på venstre side og prøvestaven spent inn midt mellom de to blå lagerhusene.

Utvikling av roterende 4-punkts bøyeutmattingsmaskin



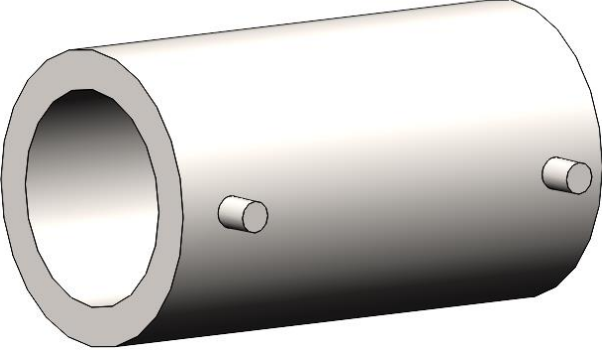
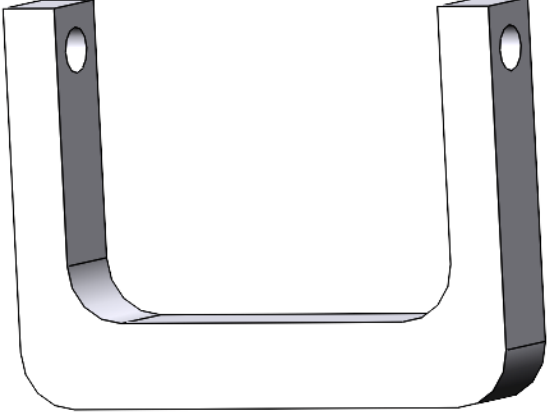
Figur 11.4. Basisrendering av sammenstilling med hovedkomponenter og viktige delkomponenter. Ikke tegnet er sensorer og brytere, samt ledninger til det elektriske.



Figur 11.5 Nærmere detaljer for lagerhus, opplagring, lastpåføring og innspenning av prøvestaven.

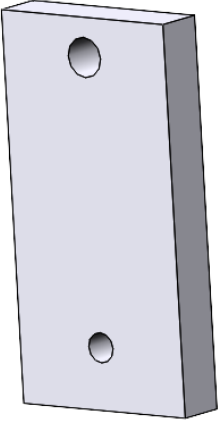
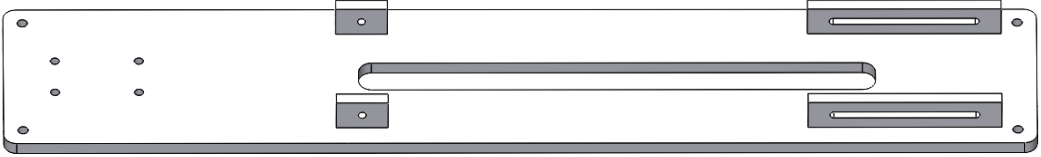
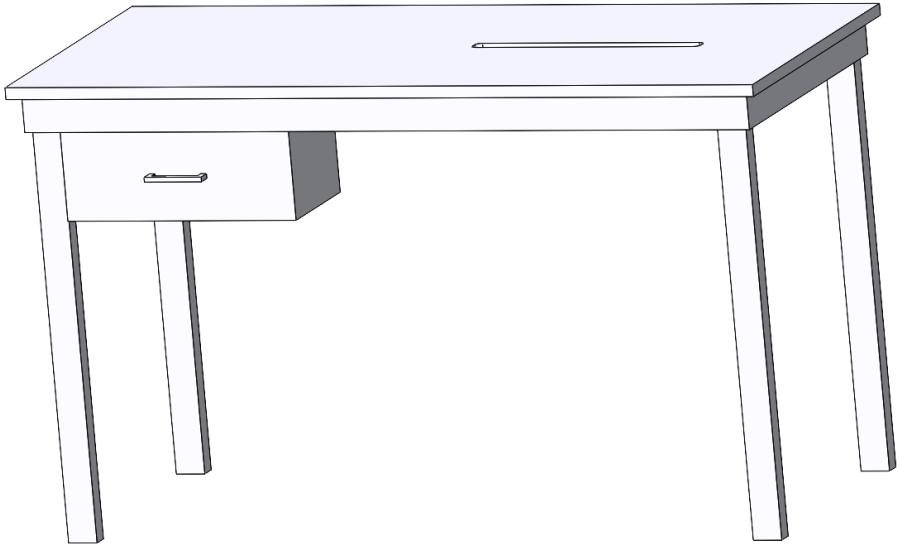
11.3. Hovedkomponenter

Tabell 11.2. Hovedkomponenter nummerert og 3D-modellert.

Nr.	Figur
2	 <p data-bbox="786 894 906 926">Lagerhus</p>
5	 <p data-bbox="805 1539 889 1568">Gaffel</p>


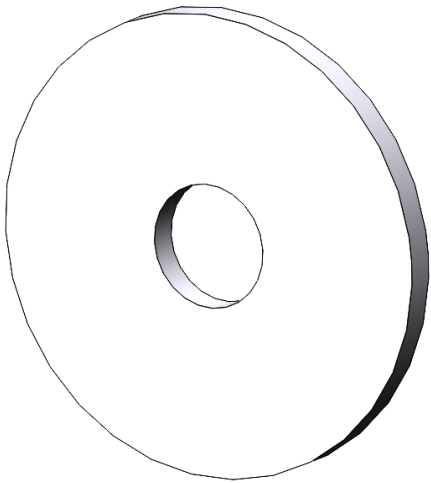
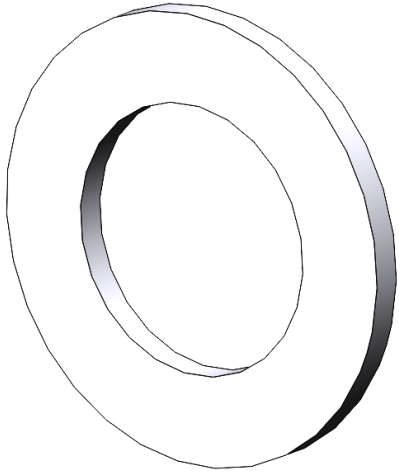
Utvikling av roterende 4-punkts bøyeutmatningsmaskin

Tabell 11.2. Forts.

Nr.	Figur
6	 <p data-bbox="824 848 873 884">Fot</p>
11	 <p data-bbox="813 1184 878 1220">Plate</p>
15 /16	 <p data-bbox="813 1835 878 1871">Bord</p>

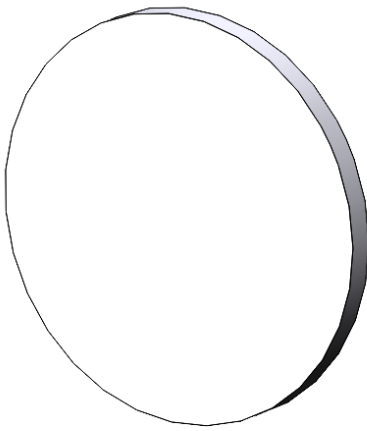
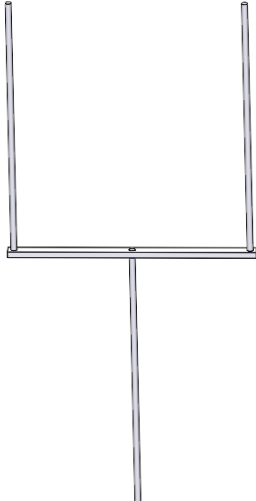
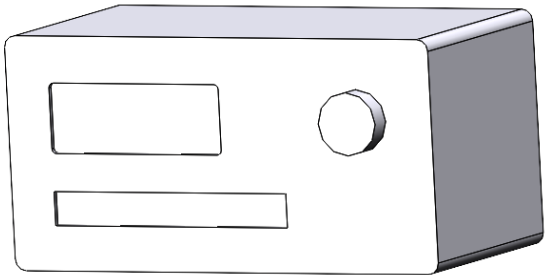
11.4. Delkomponenter

Tabell 11.3. Delkomponenter nummerert og 3D-modellert.

Nr.	Figur
7	 <p data-bbox="808 569 886 600">Aksel</p>
8	 <p data-bbox="727 1161 967 1192">Lokk med lite hull</p>
9	 <p data-bbox="711 1776 984 1808">Lokk med større hull</p>

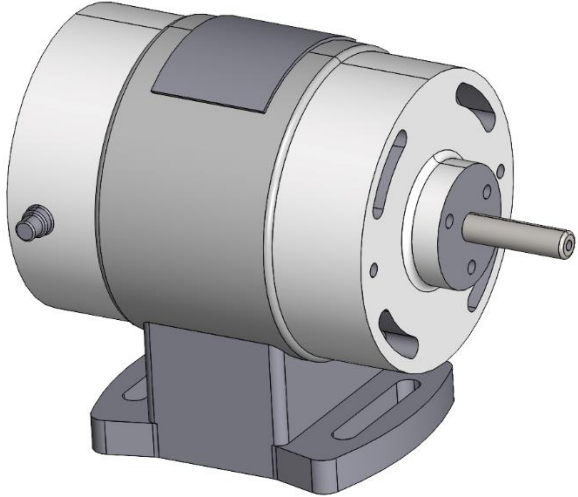
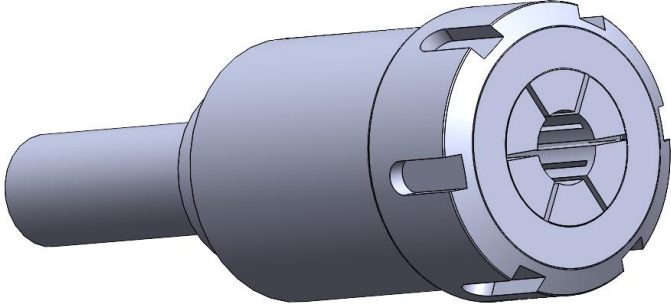

Utvikling av roterende 4-punkts bøyeutmatningsmaskin

Tabell 11.3. Forts

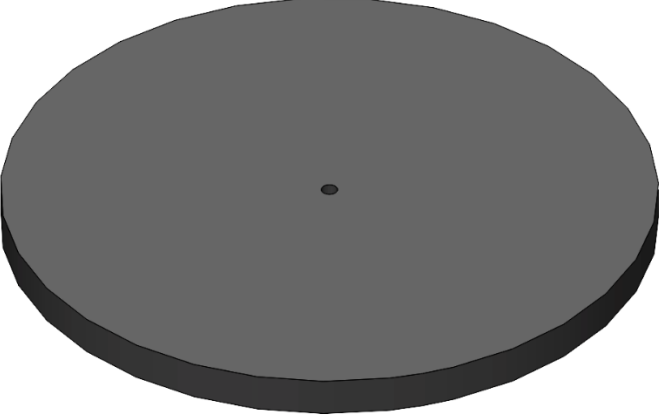
Nr.	Figur
10	 <p data-bbox="808 787 880 825">Lokk</p>
12	 <p data-bbox="776 1423 912 1459">Vektholder</p>
14	 <p data-bbox="743 1854 945 1883">Elektronikkboks</p>

11.5. Smådelar og standardkomponenter

Tabell 11.4. Innkjøpte og standardiserte komponenter.

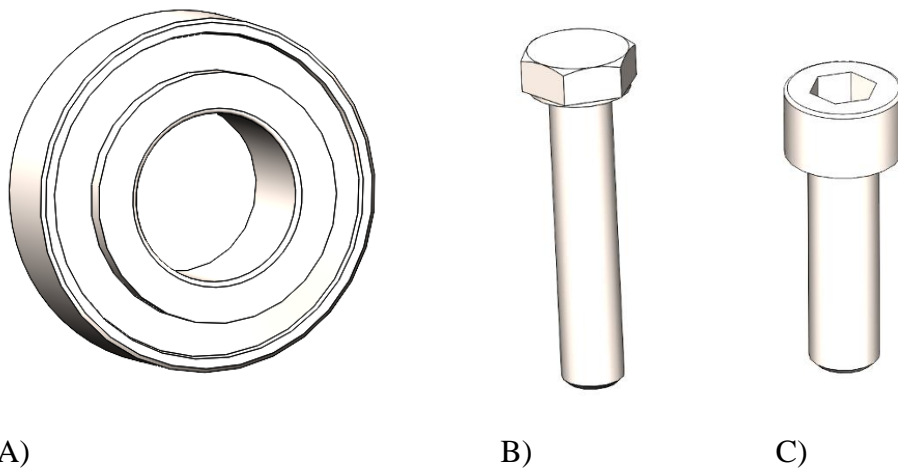
Nr.	Figur
1	 <p data-bbox="1138 863 1195 898">[48]</p> <p data-bbox="805 898 889 932">Motor</p>
3	 <p data-bbox="1227 1413 1284 1449">[49]</p> <p data-bbox="805 1449 889 1482">Kjoks</p>
4	 <p data-bbox="781 1633 914 1667">Prøvestav</p>

Tabell 11.4. Forts.

Nr.	Figur
13	 <p data-bbox="808 835 878 863">Lodd</p>

Skruer, bolter og lager

Oversikt over noen småkomponenter som hentes inn fra eksterne leverandører for montering.



Figur 11.6. A) SKF rullelager, B) ISO 4014 sekskantbolt, C) ISO 4762 Sylinderkrue med sekskanthull

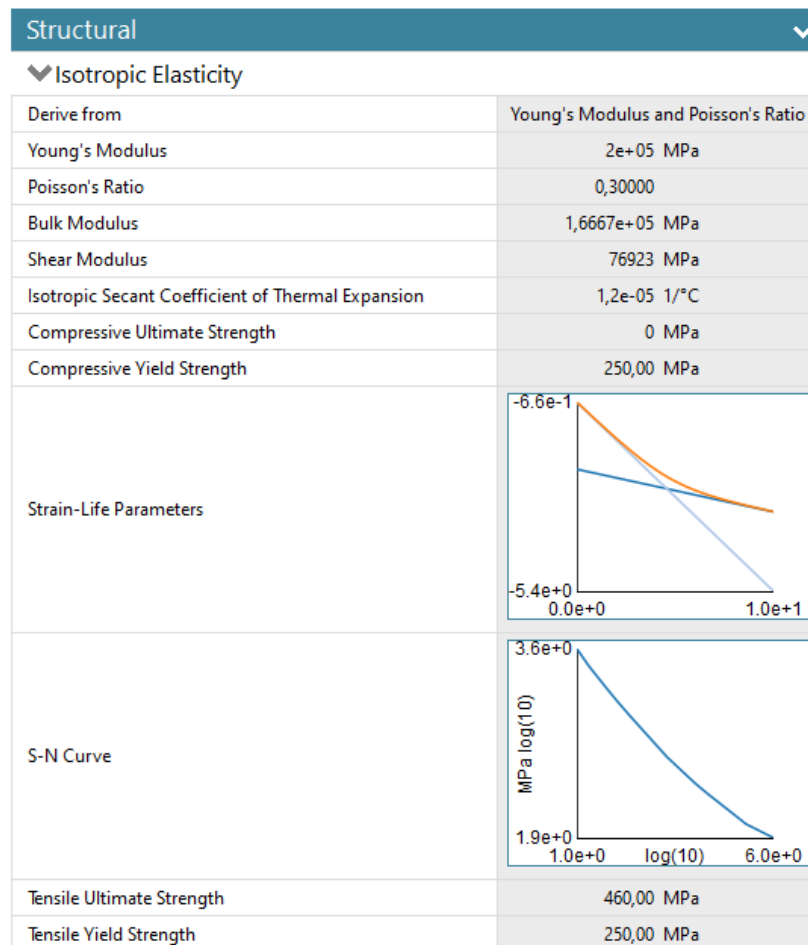
12. Konstruksjonsoptimering og robusthet

For å sikre kvalitet i konstruksjonen vil utvalgte elementer evalueres ut gjennom FEM-analyse. Det vil også bli gjort rede for tiltak som bør gjennomføres for å sikre driftssikkerhet og robusthet under produksjon og bruk.

12.1. FEM-analyse

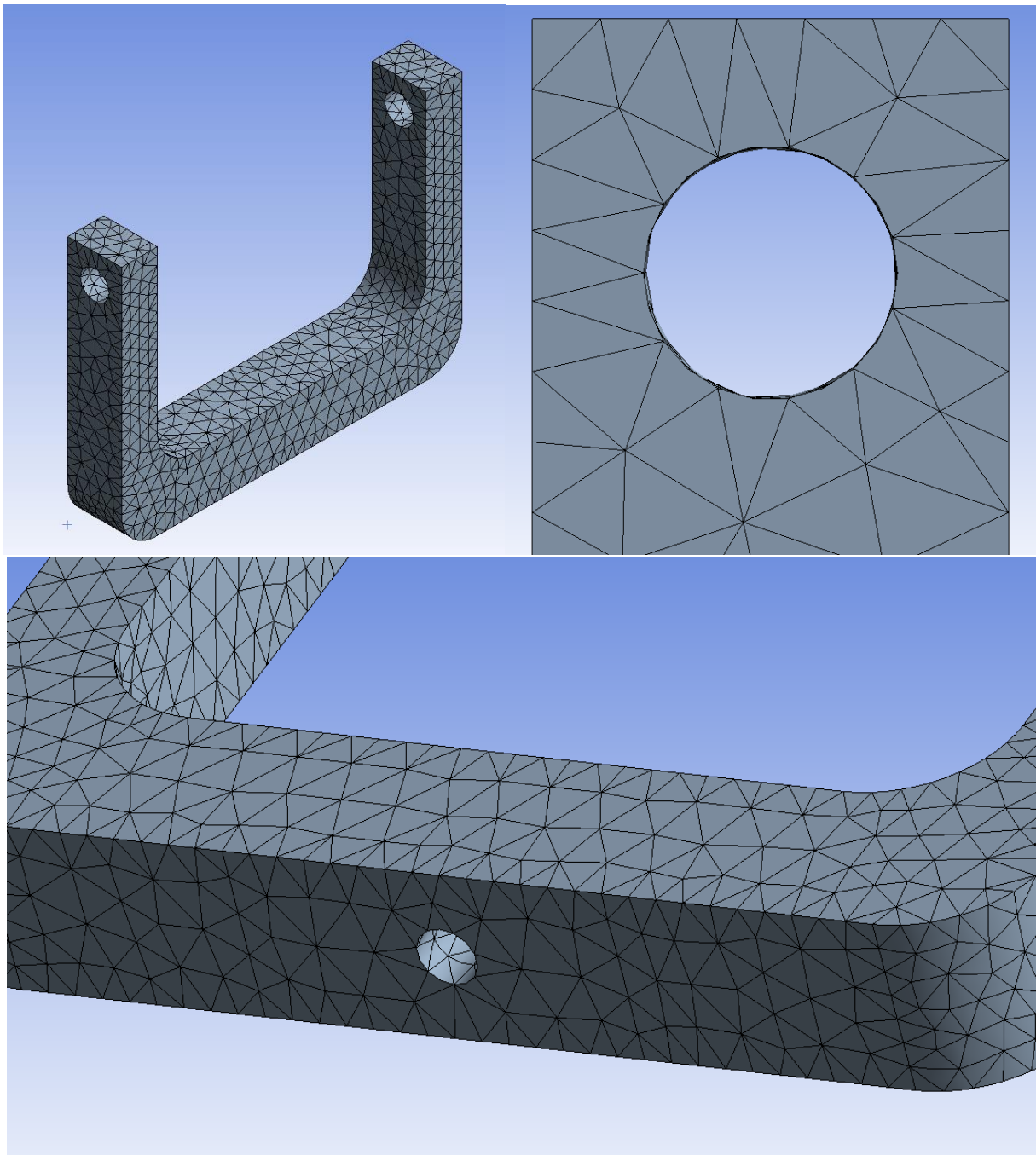
FEM-analyse av utvalgte komponenter gjennomføres for å verifisere antagelser og grovberegninger gjennomført tidligere i utviklingsarbeidet. Eventuelle problemer som over- og underdimensjonering vil kunne medføre mindre endringer i arkitektur, slik som reduksjon av tverrsnitt. Større avvik som krever omfattende redesign vil resultere i videre arbeid mot slutten av rapporten.

FEM-analysene ble gjennomført i ANSYS Workbench R2 2020. Komponenten som blir kalt «gaffel» blir undersøkt for å se hvilke spenning som vil oppstå, og en analyse av prøvestaven gjennomføres se hvordan spenningen vil fordeles og finne deformasjon.



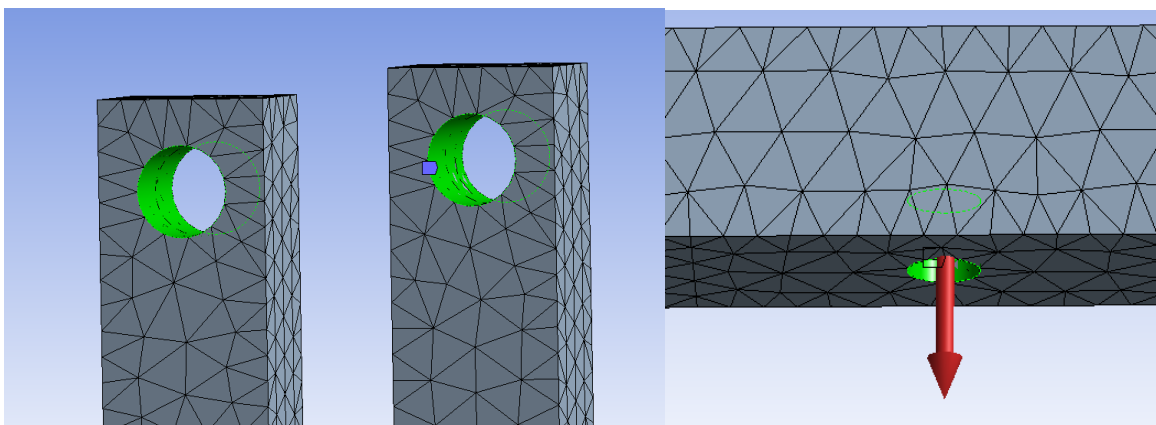
Figur 12.1. Materialegenskaper benyttet i FEM-analyser.

Gaffel:

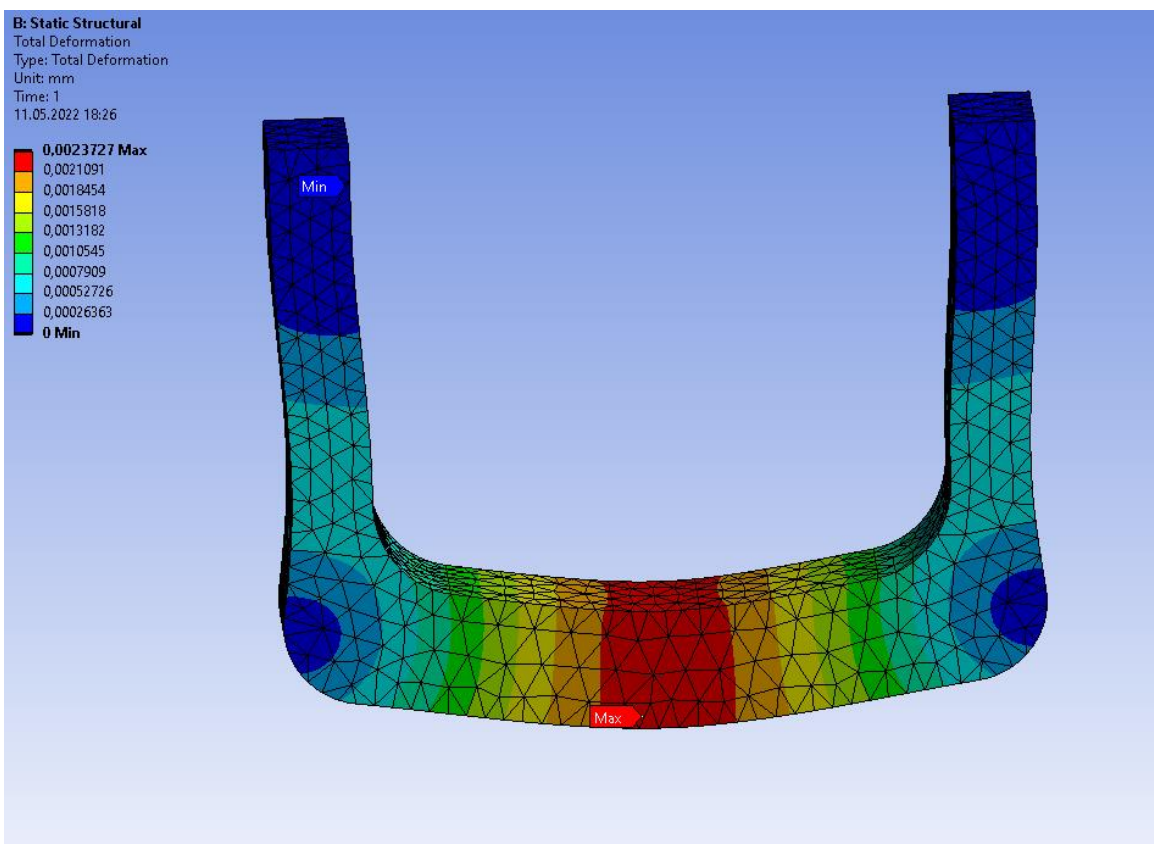


Figur 12.2. Det ble eksperimentert med grovheten av meshen for å minimere singulariteter og spenningstopper. Det det spesielt vektlagt hull ikke skulle bli for kantete og ujevne.

Utvikling av roterende 4-punkts bøyeutmattingsmaskin

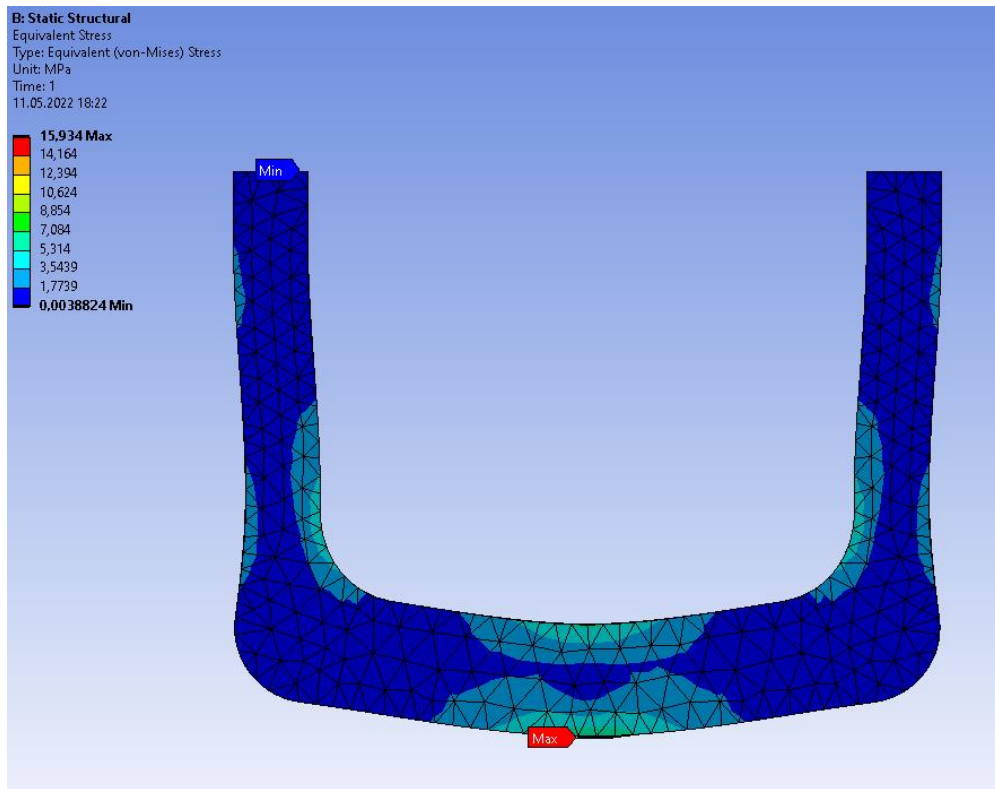


Figur 12.3. Komponenten ble fast innspent i de to hullene slik som vist til venstre. Til høyre vises kraftpåføring i hullet i bunnen av geometrien. Kraften har størrelse 245 N, som representerer halvparten av kraften fra loddene ved maks belastning.

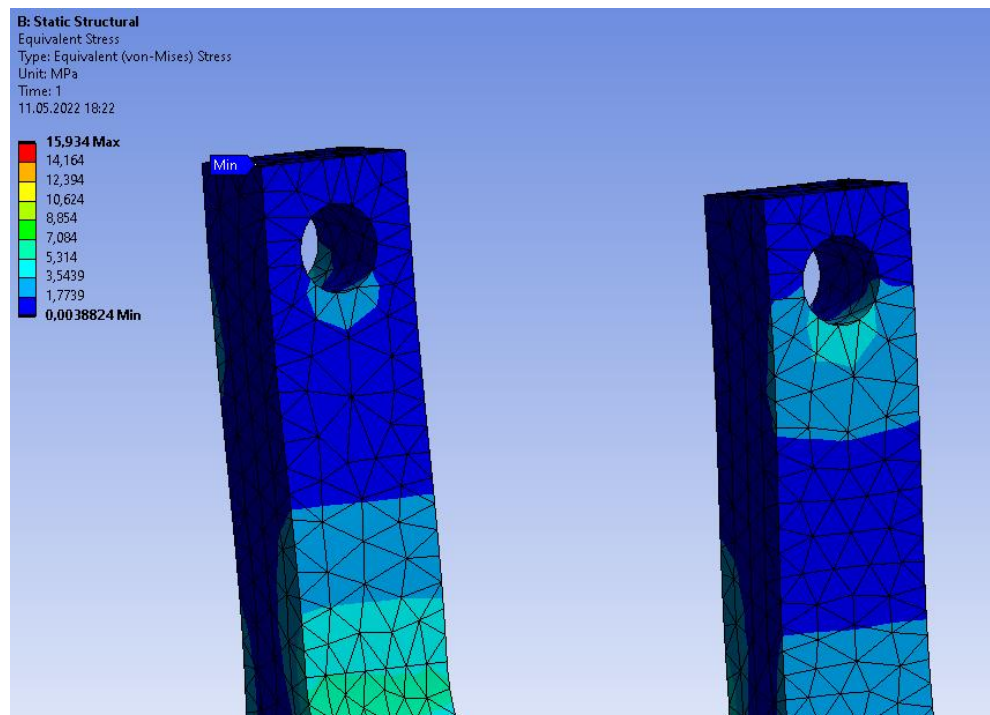


Figur 12.4. Resulterende deformasjonsplott. Største deformasjon er **0,002 mm**.

Utvikling av roterende 4-punkts bøyeutmattingsmaskin

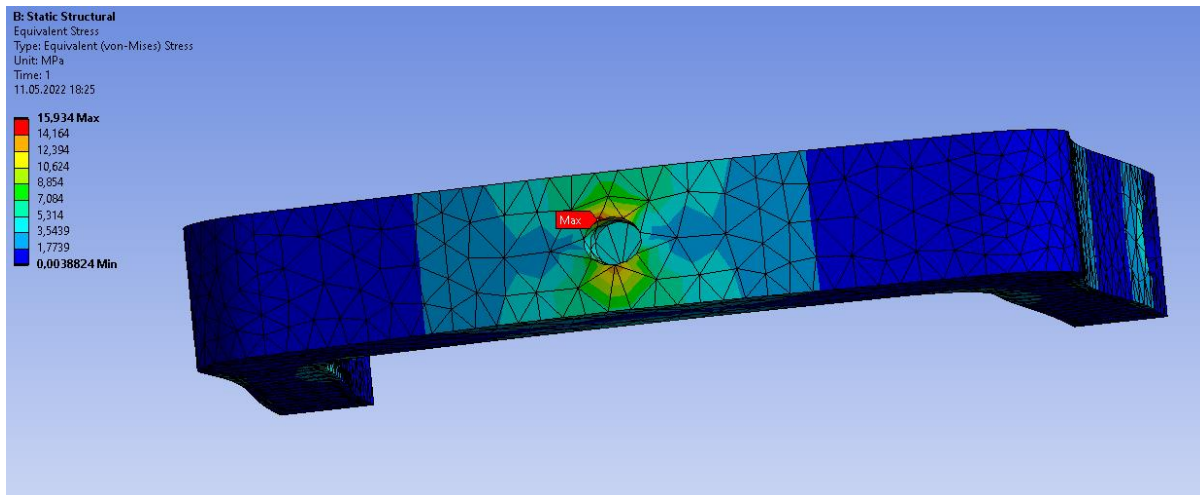


Figur 12.5. Von Mises spenningsplott fra siden. Maks spenning opptrer i ved bunnhullet med størrelse **15,9 MPa**.



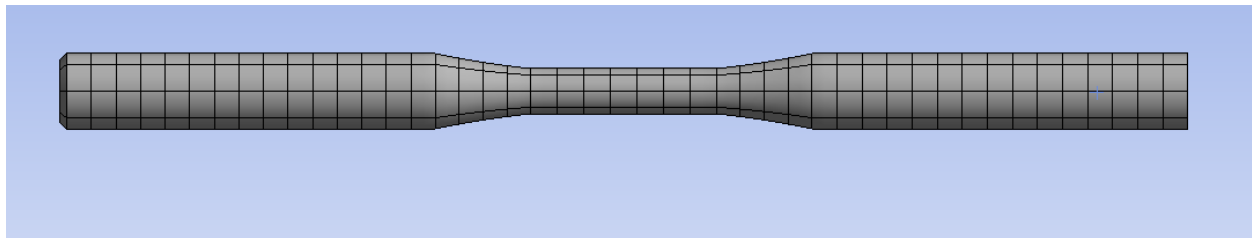
Figur 12.6. Viser fordeling av spenning rundt hull. Fargekode benytter samme maks og min spenning som ovenfor.

Utvikling av roterende 4-punkts bøyeutmattingsmaskin

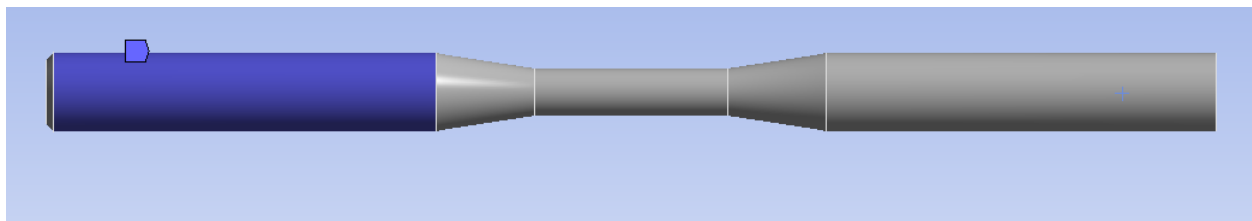


Figur 12.7. Spenningstopp ved bunnnull med samme fargeskala. Disse toppene tyder på ikke-optimal meshing fordi spenningen ikke er jevn rundt hele hullet. Finere mesh burde blitt brukt rundt hullene for å få mer nøyaktige resultater.

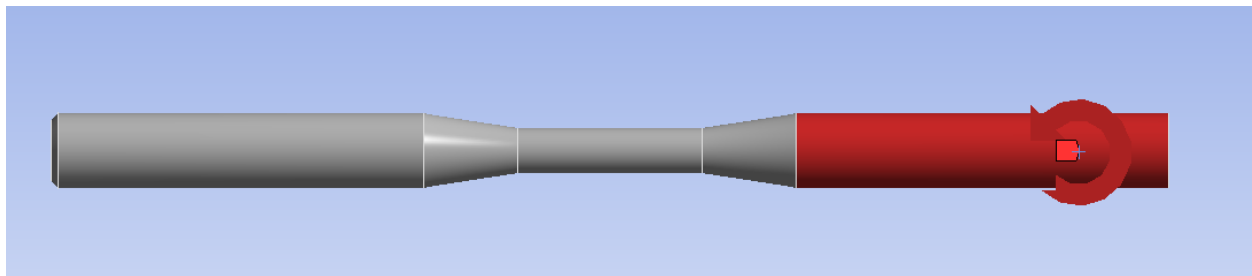
Prøvestav:



Figur 12.8. Mesh av prøvestav.

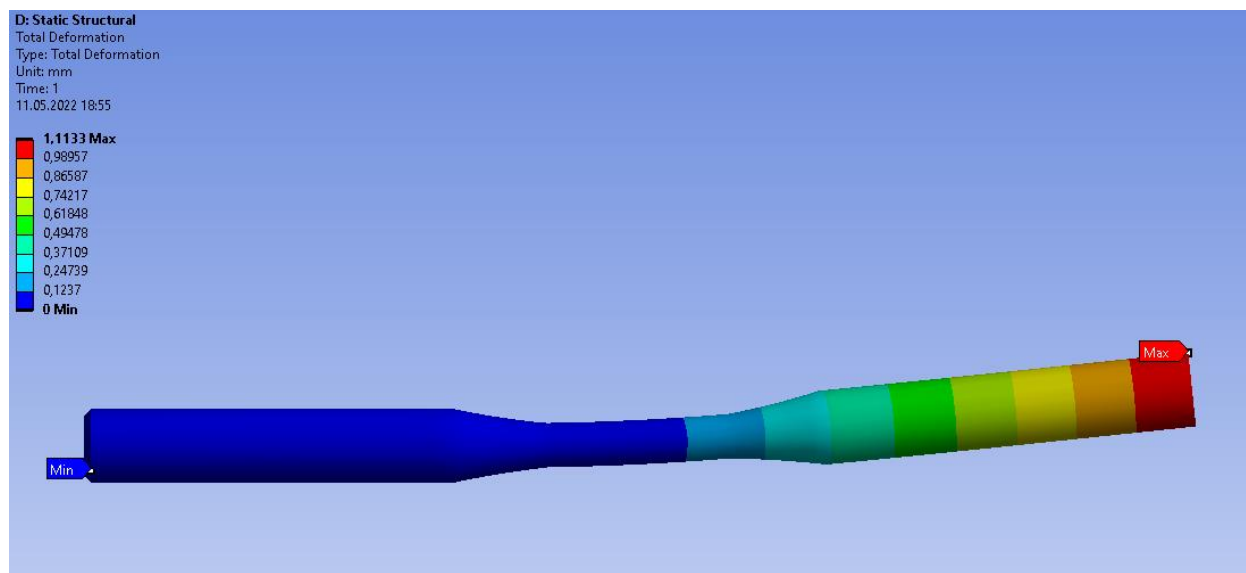


Figur 12.9. Prøvestaven ble fast innspent på venstre side.

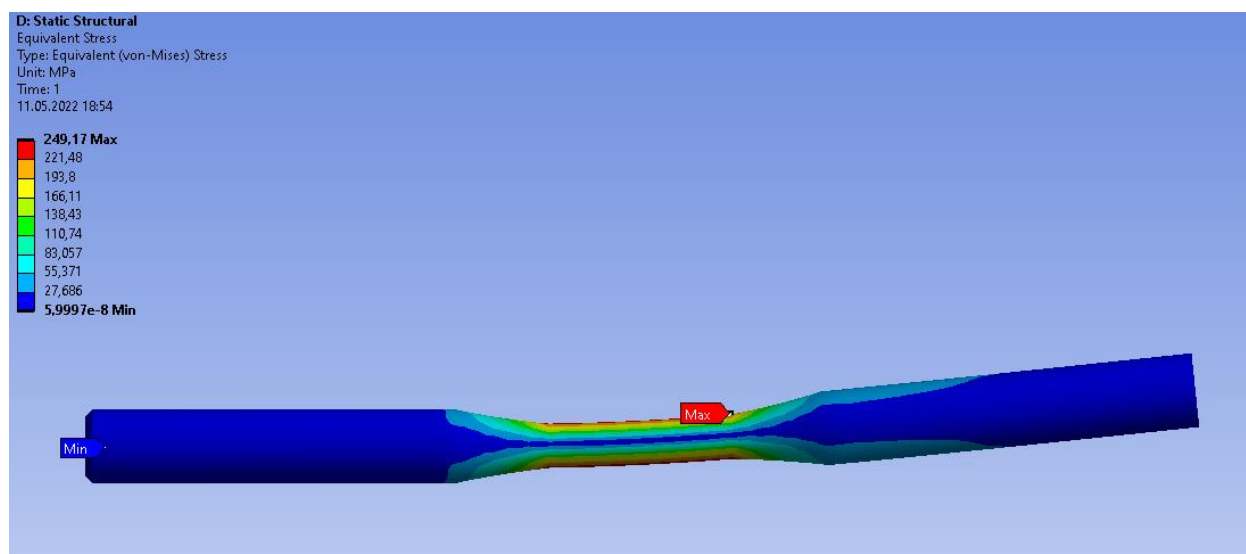


Figur 12.10. Et moment på 5 Nm ble satt på høyre side.

Utvikling av roterende 4-punkts bøyeutmattingsmaskin



Figur 12.11. Deformasjonsplott av prøvestav. Maks deformasjon er 1,1 mm.



Figur 12.12. Von Mises spenningsplott. Maks spenning er 249,2 MPa. Fordi det er konstant bøymoment over prøvestaven er det også synlig at bøyespenningen er konstant ved konstant tverrsnitt.

12.2. Tiltak for robusthet og optimering

Basert på tilbakemeldinger fra eksperter samtaler anbefales følgende tiltak ved produksjon av utmattingsmaskinen for å sikre driftssikkerhet og generell sikkerhet:

- **Avrunde skarpe kanter:**

For å forhindre skader ved bruk bør det unngås skarpe kanter på konstruksjonen. Eventuelle skarpe kanter bør slipes ned for å forhindre skader under bruk og håndtering.

- **Låsning av skruer:**

For å hindre at vibrasjoner fra motor løser skruer over tid bør skruer som ikke skal røres under normal drift låses med gjengelås. Dette er et kostnadseffektivt tiltak som øker driftssikkerhet og motvirker uønskede forsøksresultater.

- **Avbalansering av roterende komponenter:**

Før maskinen tas i bruk første gang bør roterende komponenter avbalanseres sammen. Dersom felles massesenter for komponentene er utenfor rotasjonssenteret vil det medføre vibrasjoner som kan gi uønskede spenninger i prøvestaven. For å sikre at maskinen kan gi så pålitelige resultater som mulig. Dette kan gjennomføres med strekkklapper på prøvestav når det ikke er noen belastning. Det vil likevel være mest aktuelt å leie inn tjenester eksterne for å gjennomføre balansering.

- **Overflatebehandling:**

Selv om utmattingsmaskinen skal brukes innendørs anbefales det at komponenter i aluminium el-oksideres for å øke levetiden og overflatekvaliteten. For komponenter i stål vil det være mest aktuelt med pulverlakkering som gir god slitestyrke og levetid for behandlede komponenter.

- **Vedlikehold:**

Maskinen er konstruert for å være så vedlikeholdsfri som mulig. Kulelagre velges ut for å være smørefri og trenger derfor ikke jevnlig vedlikehold i form av smøring. Disse er i tillegg godt skjermet i lagerhusene og behøver ikke vedlikehold før de eventuelt må skiftes ut ved enden av sin levetid. Annet vedlikehold vil bestå av tilstramming av skruer før bruk.

12.3. Sikkerhet

Av sikkerhetshensyn er konstruksjonen utstyrt med skjerming av roterende elementer og nødstoppknapp. Skjermingen skal fungere både for å skjerme mot eventuelle prosjektiler som i verste fall kan fly ut ved brudd eller skader ved maskinen og for å forhindre at løse gjenstander faller blir fanget i maskineriet.

Til tross for disse sikkerhetstiltakene er det anbefalt å sikre at brukere og tilskuere ikke har løse plagg eller hår som kan komme inn i roterende maskineri. Dette vil kunne medføre seriøse skader. Spesielt med tanke på studenter på laboratorieøvelser som skal observere maskinen. Det kan derfor være gunstig at dersom det er mange mennesker til stede rundt maskinen at en er utnevnt som sikkerhetsansvarlig og sørger for sikker drift.

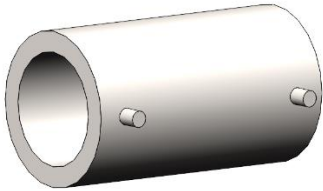
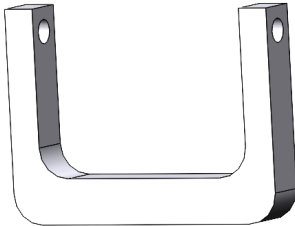
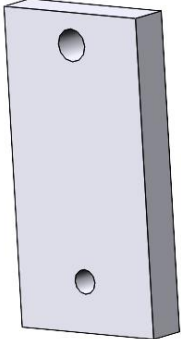
13. Produksjon og økonomi

For å få et anslag på produksjonskostnader til testmaskinen vil det gjøres rede for tilvirkningsmetode og materialbruk for de komponenter som skal produseres lokalt. Kostnadskalkylen vil også inneholde priser til innkjøpte komponenter og vil derfor gi et fullstendig bilde av kostnader.

13.1. Produksjonstrinn


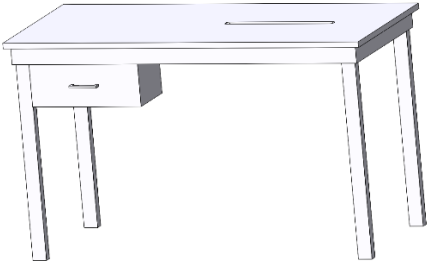

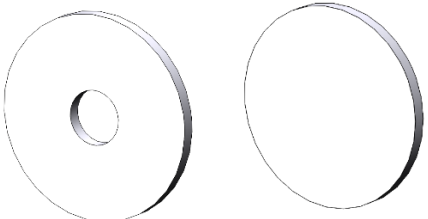
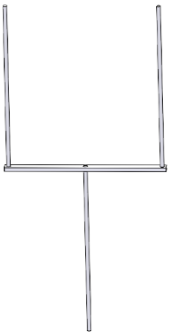
Tabellen nedenfor gir en oversikt over de komponentene som skal produseres lokalt. Disse er detaljert med aktuell tilvirkningsmetode og materiale som skal benyttes i produksjonen.

Tabell 13.1. Oversikt over hovedkomponenter som skal produseres og tilhørende tilvirkningsmetode og materiale. Hver av komponentene er vist som en skisse som viser form.

Komponent	Produksjonsdetaljer
 <p data-bbox="391 1056 513 1087">Lagerhus</p>	<p data-bbox="727 779 1089 810">Materiale: Aluminium 6082</p> <ul data-bbox="781 821 1386 961" style="list-style-type: none"> • Rørprofil • Kuttet til lengde • 4 hull bores og gjenges til skruer for festing av gaffel
 <p data-bbox="412 1419 493 1451">Gaffel</p>	<p data-bbox="727 1094 1089 1125">Materiale: Aluminium 6082</p> <ul data-bbox="781 1136 1386 1283" style="list-style-type: none"> • Firkantprofil/plate • CNC-freser geometri • 2 hull bores i siden for festing med lagerhus • 1 hull bores og gjenges til ståltau i oppheng
 <p data-bbox="428 1839 477 1871">Fot</p>	<p data-bbox="727 1457 1089 1488">Materiale: Aluminium 6082</p> <ul data-bbox="781 1499 1040 1604" style="list-style-type: none"> • Flattstål • Kuttet til lengde • Bore 2 hull

Utvikling av roterende 4-punkts bøyeutmattingsmaskin

Tabell 13.1. Forts.

Komponent	Produksjonsdetaljer
 <p style="text-align: center;">Plate</p>	<p>Materiale: Aluminium 6082</p> <ul style="list-style-type: none"> • Plate • Hull for festing til bord og motor bores • Spor i plate freses ut • Ører skjæres ut fra flattstål • Spor i ører freses ut • Ører sveises på plate
 <p style="text-align: center;">Bord</p>	<p>Materiale: S235 og kryssfiner</p> <ul style="list-style-type: none"> • Rammeverk bygges opp av firkantprofiler og sveises sammen • Benkeplate i behandlet kryssfiner sages til størrelse • Kan eventuelt benytte ferdig arbeidsbenk som kjøpes inn
 <p style="text-align: center;">Aksel</p>	<p>Materiale: S355</p> <ul style="list-style-type: none"> • Rørprofil • Innvendig nøkkelspor freses ut
 <p style="text-align: center;">Lokk</p>	<p>Materiale: Aluminium 6082</p> <ul style="list-style-type: none"> • De ulike utformingene av lokket CNC-freses • 4 hull for å feste til lagerhus bores ut
 <p style="text-align: center;">Vektholder</p>	<p>Materiale: S235</p> <ul style="list-style-type: none"> • Horisontalprofil utføres i henhold til grovberegninger • 3 hull bores i profilen • Ståltau festes i de ytterste hullene • Stangprofil kuttes til lengde og sveises til midten av horisontalprofilen

Tabell 13.1. Forts.

Komponent	Produksjonsdetaljer
 <p>Elektronikkboks</p>	Materiale: S235 <ul style="list-style-type: none"> • Elektronikk monteres i skall av stålplater • Hull til skjerm, knapper og kontakter bores • Plateknekking benyttes for lokk

13.2. Økonomi og kostnader

I dette delkapittelet vises et grovt estimat av kostnader knyttet til ulike deler a utvikling, konstruksjon og produksjon av ett eksemplar av utmattingsmaskinen. Dette inkluderer kostnader til eget utviklingsarbeid, innkjøp av materialer, innkjøpte komponenter og verkstedarbeid i tilknytning til produksjon og montering.

Materialkostnader er basert på at mesteparten av nødvendig materiale er tilgjengelig på verkstedet og ikke trenger å spesialbestilles. Dette er derfor et ganske grovt anslag på hva materialkostnadene kan komme på dersom ingen profiler må spesialbestilles.

Tabell 13.2. Kostnad, eget utviklingsarbeid.

Konseptutvikling	Timer	Pris [NOK]	Sum [NOK]
Utredning	211	550	116.050
Konseptutvikling	195	550	107.250
Dimensjoneringsarbeid	88	550	48.400
3D-modellering og tegning	93	550	51.150
Prosjektrapport	318	550	174.900
Sum konseptutvikling	905	-	497.750

Tabell 13.3. Materialkostnader.

Materialer	Mengde [kg]	Pris [NOK/kg]	Sum [NOK]
Stål S235	5	15	75
Stål S355	2	20	40

Utvikling av roterende 4-punkts bøyeutmattingsmaskin

Tabell 13.3. Forts.

Materialer	Mengde [kg]	Pris [NOK/kg]	Sum [NOK]
Aluminium 6082	10	40	400
Sum materialer	-	-	515

Tabell 13.4. Kostnader til innkjøpte komponenter.

Komponenter	Antall	Pris [NOK]	Sum [NOK]
Motor	1	2000	2000
Rullelager	4	150	600
Kjoks og spennhylser	2	1250	2500
Skruer	20	10	200
Arbeidsbenk	1	6000	6000
Sensor og elektronikk	1	800	800
Sum komponenter	-	-	12.100

Tabell 13.5. Kostnader til verkstedarbeid.

Konseptutvikling	Timer	Pris [NOK]	Sum [NOK]
Sveising	1	650	650
CNC	4	1500	6000
Montering	5	650	3250
Sum verkstedarbeid	10	-	9900

Tabell 13.6. Total kostnad.

Kostnadspost	Kostnad [NOK]
Konseptutvikling	495.000
Materialer	515
Komponenter	12.100
Verkstedarbeid	9900
Sum	517.515
Sum ekskl. konseptarbeid	22.515

Totalkostnaden for produksjonen av en prototype er 517.515 kr. Uten eget utviklingsarbeid er kostnader 22.515 kr.

13.3. Serieproduksjon

I dette tilfellet vil det ikke være aktuelt å gjennomføre en kostnadsanalyse av serieproduksjon av produktet fordi oppdragsbeskrivelsen detaljerer kun behov for en enkelt maskin ved laboratoriet til Realtek.

Likevel vil det være en mulighet for at verkstedet i fremtiden vil kunne produsere utmattingsmaskinen lokalt for eksterne kunder på bestilling etter eksisterende tegningsgrunnlag. Dette vil eventuelt skje i ganske liten skala. Derfor vil kostnadene for produksjon av utmattingsmaskin på bestilling være tilsvarende de som oppstår ved produksjon av første prototype, men man vil kunne se bort ifra utviklingsarbeid gjennomført som masterprosjekt av studenter.

14. Miljørendering og teknisk anvisning

Miljørenderingene vil vise testriggen i det miljøet den vil brukes i. For å demonstrere hvordan produktet vil kunne brukes blir det laget instruksjoner for en praktisk laboratorieoppgave som kan benyttes som del av opplæringen av studenter.

14.1. Renderte framstillinger

Figuren nedenfor viser en finrendering av sammenstillingen. På neste side følger en miljørendering der utmattingsprøvemaskinen er stilt opp i et materiallaboratorium.



Figur 14.1. Finrendering av utmattingsmaskinen.



Figur 14.2. Maskinen rendert i laboratoriemiljø. Bakgrunn hentet fra [50].

14.2. Instruksjoner for øvelsesbruk

Det er utviklet et eksempel på hvordan en laboratorieøvelse for studenter kan utformes og gjennomføres. Dette kan benyttes som en del av læreplanen i kurs i materialteknologi eller maskinteknikk.

Laboratorieinstruksjoner for en testing av en prøvestav:

Introduksjon

Hensikten er å gi studenter en praktisk innføring i hvordan amplitudespenningen påvirker levetiden ved roterende bøyeutmattning av materialer og gi erfaring med å bruke en utmattingsprøvemaskin. Ved å analysere data fra forsøk skal studentene kunne lage S-N kurver som kan benyttes ved dimensjonering.

Data fra forsøkene skal brukes til å lage en middelkurve og designkurve i et standard dobbeltlogaritmisk diagram for S-N kurver ved hjelp av regresjonsanalyse.

Øvingsbeskrivelse

Utmattningstesting gjennomføres under veiledning.

- a) Fyll inn data fra forsøk tre forsøk:

Utvikling av roterende 4-punkts bøyeutmattingsmaskin

Tabell 14.1. Studenter fyller inn utmattingslevetid her.

Stav nr.	Spenningsvidde, $\Delta\sigma$ [MPa]	Antall omdreininger, N
1	120	
2	200	
3	300	

Tidligere har 6 andre prøvestaver blitt testet med følgende resultater:

Tabell 14.2. Utmattingsdata fra tidligere forsøk.

Stav nr.	Spenningsvidde, $\Delta\sigma$ [MPa]	Antall omdreininger, N
4	120	600.000
5	120	580.000
6	200	200.000
7	200	210.000
8	300	50.000
9	300	42.000

- b) Bestem standardavviket \hat{s} og middelkurven ved regresjonsanalyse på formen: $N = C \cdot \Delta\sigma^{-m}$
- c) Sett opp likningen for designlinjen på samme form.
- d) Tegn kurvene i et S-N diagram.

Formler

Sammenhengen mellom massen til benyttede lodd og bøyemoment:

$$M [Nm] = \frac{m [kg]}{2}$$

Motstandsmomentet til prøvestaven:

$$W_b = \frac{\pi D^3}{32}$$

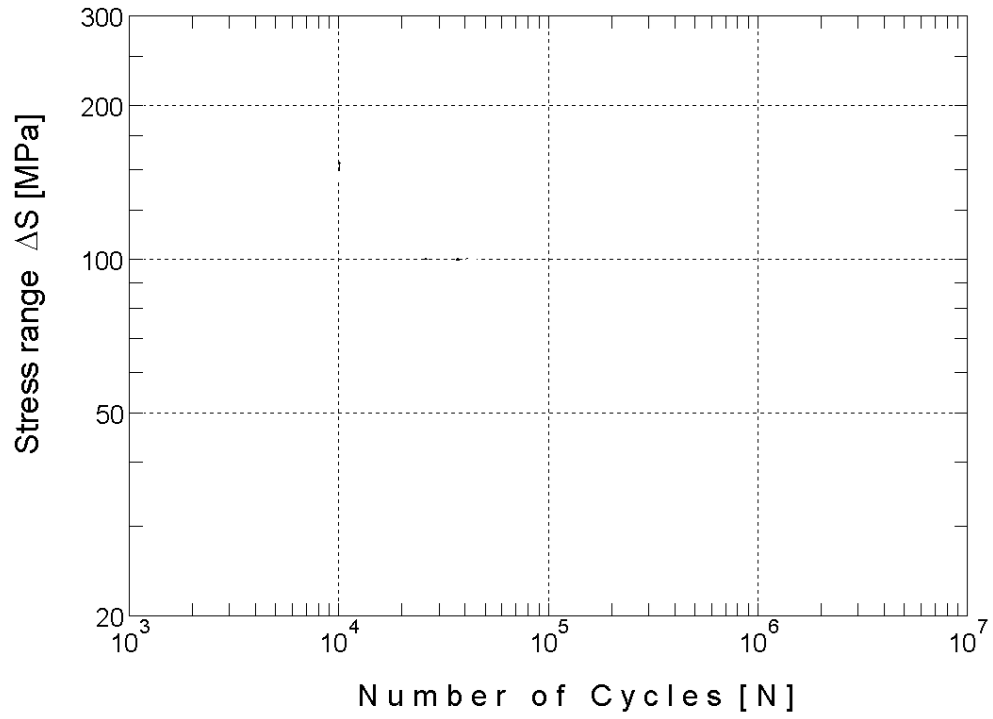
Bøyespennning:

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W_b}$$

Designkurven ($t_{\varepsilon/2, k-2}$ referer til student-t fordelingen):

$$\log N_{design} = \log C - m \cdot \log \Delta\sigma - t_{\varepsilon/2, k-2} \cdot \hat{s} \cdot \sqrt{\frac{k+1}{k}}$$

Utvikling av roterende 4-punkts bøyeutmattingsmaskin



Figur 14.3. Tomt S-N diagram for tegning av S-N kurver.

15. Prosessevaluering og diskusjon

For å få utnytte læringspotensialet med prosjektutførelsen reflekteres det over de utfordringer som har oppstått gjennom de ulike delene av arbeidet. Hensikten er å diskutere rundt egne erfaringer som er gjort og gjennomføre en evaluering av eget arbeid for å oppdage svakheter og styrker. Diskusjonen er bygget opp rundt prosesstrinnene hentet fra kapittel 3.6.

15.1. Læring og kompetanseutvikling

Gjennom prosjektprosessen er det gjort en del viktige erfaringer som er med på å styrke læringsutbyttet og kompetanseutviklingen. Følgende lærdom ble gjort som resultat av den fullstendige arbeidsprosessen:

- En del tid gikk med på å lese seg opp på mekanismene bak utmattingsbrudd og å forstå sammenheng mellom ulike faktorer som spiller inn. Dette har gitt viktig kunnskap rundt utmatting på dypere nivå enn det som har vært gjennomgått tidligere i studiet og vært spennende å lære.
- Det har oppstått utfordringer knyttet til planlegging av prosjektarbeidet, spesielt med tanke på prioritering av ulike aspekter. Generelt har det også vært en del ting som har tatt mye lengre tid enn antatt tidligere, spesielt å undersøke og forsøke å forstå flere eksisterende utmattingsmaskiner som er tilgjengelig på markedet. Å prøve å systematisere ulike funksjonelle aspekter hos de ulike produsentene og forsøke å tilpasse dette til å passe inn i rammene rundt denne prosjektoppgaven har vært en utfordring. Dette gjelder også utfordringer rundt å få oversikt over innkjøpte komponenter og sette sammen et fullstendig produkt av disse og egenproduserte deler.
- Usikkerhet knyttet til sykdom og koronasituasjonen som var et problem tidligere i semesteret. Sykdom som satte en pause i arbeidet ga utfordringer når arbeidet skulle gjenopptas, også kombinert med noen vedvarende symptomer. Det er nyttig å lære at sykdom alltid vil være et usikkerhetsmoment i større prosjekter og at man derfor alltid bør planlegge for hva som bør prioriteres dersom sykdom skulle oppstå.
- Vanskelig å balansere ulike delmål og fordele tidsbruken mellom disse. Det er tatt lærdom av det å måtte prioritere enkelte aspekter fremfor andre når tidspress er en faktor. Når noen av gjøremålene er mer krevende enn andre kan det være vanskelig å planlegge tidsbruk tidlig i prosessen.

15.2. Utredningsfasen

Utredningsfasen la grunnlaget for selve oppgaven og var med på å forme både sluttproduktet og rapporteringen av arbeidsprosessen. Prosjektplanleggingen, metodikken og teorigrunnlaget som ble lagt i denne fasen var kritisk for å få gjennomført prosjektet.

- Det er tydelig at det å ha godt definerte mål tidlig er kritisk for å holde god flyt og struktur i arbeidet. På kort sikt gir gode mål motivasjon, men det gir også et langsiktig

perspektiv ved at man vet hva man arbeider mot. Det hjelper både på fokus ved tilegning av kunnskap og hjelper med å organisere tilgjengelig tid og ressurser når arbeidsoppgavene er omfattende.

- Det har vært utfordrende å finne spesifikke eksempler på brudd ved bøyeutmattning for å illustrere viktigheten knyttet til prosjektet. Det finnes mange eksempler på katastrofale konsekvenser av utmattingsbrudd, men det er sjeldent at disse skyldes utmattning ved ren bøying.
- For å styre både design og spesifikasjoner ved testmaskinen ble det under teknologiutredningen brukt en del tid på å undersøke eksisterende maskiner. Informasjon rundt disse har ofte vært noe vanskelig å oppdrive, spesielt når det kommer til prising. Dette gjorde det vanskelig å sette et tidlig prismål for egen konstruksjon.
- I tillegg til kommersielle maskiner finnes det også lignende prosjekter utført av studenter og grupper tidligere, men også disse er ofte dårlig dokumentert og lite beskrevet. Dette gjør at det er vanskelig å utnytte tidligere arbeid på området på en optimal måte.
- Definerings av rammer rundt oppgaven og aktuelle begrensninger er noe som ble gjort tidlig, men også revidert underveis for å reflektere de reelle utfordringene som har oppstått underveis.
- Et annet hovedfokus har være å bygge opp maskinen rundt rammer satt av gjeldende standarder på feltet. Disse er ofte vanskelig å få oversikt over og er skrevet med relativt vanskelig å teknisk språk. Standarder refererer ofte til andre standarder, og disse kan være vanskelige å oppdrive. Dette gjelder spesielt standarder som omhandler databehandling nøyaktighet i materialforsøk. Likevel anses dette som en lærerik og spennende del av prosessen.

15.3. Utviklingsfasen

I utviklingsfasen ble det dannet mer konkrete rammer og spesifikasjoner for konstruksjonen og viktige valg av funksjoner og egenskaper ble gjennomført. Samtidig var avveiningen mellom ulike løsninger og funksjonsalternativer en viktig del av denne fasen.

- En utfordring i utviklingsfasen har vært å finne løsninger som har god balanse av gjennomførbarhet og relevans for både studie og ønsket læringsutbytte. Samtidig må valgte løsninger henge sammen og være praktisk rettet. Det er noen ganger fristende å gå i dybden på enkelte temaer, men samtidig kan man ikke bruke for mye tid på unødvendige detaljer.
- Å gjøre relevante og fornuftige valg av konsepter når alternativene har relativt like kvaliteter er ikke lett å gjøre på en objektiv måte. Egne forventninger og antagelser vil da spille større roller i seleksjonsprosessen.
- Viktige produktegenskaper burde blitt nøyere diskutert med en ekspertgruppe for å få kartlagt om de antagelsene som var grunnlaget for seleksjonsprosessen er fornuftige.

- Manglende kunnskaper knyttet til måleinstrumenter, elektronikk og nøyaktighet gjorde at utviklingen av disse aspektene ble gjort på et overflatenivå.
- Krav til motor burde blitt nøyere undersøkt gjennom en kombinasjon av beregninger, teknologiutredelse og ekstern input. Effektkravet til motor har nok blitt overvurdert, samtidig som at driftssikkerhet er en viktig faktor.

15.4. Konstruksjonsfasen

Konstruksjonsfasen la beregningsgrunnlaget som deretter ble benyttet i utviklingen av løsningsarkitekturen. Her ble det også gjort betraktninger rundt småkomponenter og andre innkjøpte deler.

- Her burde det blitt lagt mer vekt på å finne ut hvilke beregninger er relevante og viktige for konstruksjonen.
- Det ble oppdaget at ønsket om 25 Nm bøyemoment gir veldig stor spenning i prøvestaven som ble benyttet som eksempel. Dette kan likevel være fornuftig dersom man ønsker å teste større prøvestaver eller aksler.
- FEM-analyse avdekket at komponenter kan være overdimensjonert og at det ikke er veldig store spenninger i undersøkt komponent. Det burde derfor ha blitt undersøkt nærmere om reduksjon i tverrsnitt og størrelser er fornuftig. Flere FEM-analyser ville vært en del av denne prosessen.
- Valg av kulelager og andre elementer til roterende konstruksjon var utfordrende på grunn av begrensede kunnskap på området. Her burde det blant annet blitt undersøkt nærmere hva som er forventet levetid for lagre ved ulike belastninger og turtall. Også aksel forbindelser og koblinger kunne vært utforsket i større detalj.
- Småkomponenter og detaljer i løsningsarkitekturen ble i stor grad ikke utviklet til det nivået som var ønskelig, mest på grunn av tidsbegrensninger. Dette resulterte i at det er noen løse ender når det kommer til løsningsarkitekturen. Eksempelvis gjelder dette spesielt internt i lagerhusene, sikkerhetstiltak i form av skjerming av roterende elementer og i sammenkobling av de ulike hovedkomponentene.
- Det er komponenter som er utsatt for vekslende belastning. For å forhindre at maskinkomponenter selv får utmattingsbrudd burde det blitt gjort en levetidsanalyse med utmattingsberegninger av disse delene.

15.5. Ferdigstillingsfasen

I ferdigstillingsfasen ble det analysert rundt produksjon av produktet og kostnader knyttet til den fullstendige utviklingsprosessen. Ferdigstillingen av rapporten var også en stor del av denne fasen.

- Tidsbruk ved verkstedarbeid var et aspekt som var utfordrende å estimere på grunn av begrenset egen erfaring med maskinering, sveising og andre produksjonsmetoder.

Utvikling av roterende 4-punkts bøyeutmattingsmaskin

- Kostnader knyttet til innkjøp av materialer ble forenklet ved at det ble antatt en fast kilopris. I realiteten vil prisen variere basert på hvilke profiler og størrelse på innkjøp.
- Rapportferdigstilling som inkluderer tabelldelinger, sammensetning av vedlegg og kilder var mot slutten av arbeidet en svært tidkrevende del av prosessen. Dette inkluderer også korrekturlesing og annen verifisering av gjennomført arbeid.
- Fremstilling av lesbare tegninger av sammenstilling, samt eksplosjonstegning, tok lengre tid enn forventet.

16. Konklusjon

Gjennom dette prosjektarbeidet er det blitt utredet, utviklet, konstruert og designet en laboratorie-testmaskin for 4-punkts bøyeutmattning av prøvestaver. Maskinen er blitt utviklet, konstruert og designes etter foreskrevne standarder for testing av roterende bøyeutmattning under laboratorie-betingelser (ISO 1143). Konstruksjonen vil i så måte kunne gi et konstant bøyemoment over en standardisert prøvestav. Samtidig er det blitt lagt vekt på at den skal være enkel å bruke og demonstrere for utdanningsformål.

Maskinen er utstyrt med sensorer og elektronikk som samler inn og viser viktig data for utmattningstesting.

Alle trinn i utviklings-, dimensjonerings- og konstruksjonsarbeidet er blitt rapportert og beskrevet med tilhørende tegninger og tekniske anvisninger. Videre ble det utformet og tilpasset grunnlag for tekniske anvisninger i form av eksempel av laboratorieøvelse for studenter.

16.1. Resultater og anbefalinger

Følgende resultater er kommet frem som resultat av prosjektarbeidet:

Funksjon:

- Maskinen kan gjennomføre utmattningstesting av prøvestaver i ulik størrelse.
- Prøvestaver festes i kjoks med utskiftbar spennhylse som kan tilpasses ulike diametere av prøvestaver.
- Testing kan gjennomføres på prøvestaver med lengde mellom 100 og 150 mm.
- Data som innhentes og presenteres:
 - Tid siden teststart
 - Antall rotasjoner siden teststart
 - Nåværende turtall
- Belastning overføres fra et sett lodd som henger fra innspenningen.
- Maksimalt bøyemoment over prøvestav er 25 Nm.
- Vekslende spenning oppnås ved å rotere prøvestaven.
- Motor stanser automatisk når det registreres brudd i prøvestav.

Metriske forhold og dimensjoner:

- Dimensjoner for selve maskinen: H: 117,5 mm, L: 800 mm, B: 150 mm
- Dimensjoner for oppstilling: H: 770 mm, L 1310 mm, B: 590 mm
- Driftsspenning: 230 V
- Turtall: 3000 r/min
- Produksjonskostnader for prototype: 517.515 kr
- Produksjonskostnader ekskl. eget utviklingsarbeid: 22.515 kr

Anbefalinger

Under videre utvikling og produksjon av utmattingsmaskinen anbefales det å opprettholde følgende anbefalinger:

- Sørge for at det er godt tilsyn til hovedkomponenter og mekanismer.
- Utvikle en god løsning for sikring av roterende komponenter i form av en sikkerhetsskjerm.
- Gjennomføre balansering av roterende komponenter for å redusere vibrasjoner og uønskede spenninger i prøvestaver.
- Benytte to kjevekoblinger i akselen mellom motor og lagerhus for å isolere disse to systemene og minimere effekter fra skjevstilling og eventuelle vibrasjoner.

16.2. Videre arbeid

På grunn av de tidsmessige rundt utviklingsprosjektet er det flere områder som ikke er utredet til det fulleste. Før utmattingsmaskinen kan realiseres anbefales derfor å gjennomføre følgende kvalitetsforbedrende tiltak:

- Utføre utvidede FEM-analyser av alle lastbærende komponenter.
- Flere oppfølgingsberegninger på skruer og lastbærende komponenter, spesielt en designvurdering av vektholderen.
- Basert på FEM-analyser og beregninger gjennomføre designoptimeringer som materialbesparende tiltak.
- Gjennomføre utmattingsberegninger av utsatte detaljer og komponenter.
- Utføre en fullstendig utredning av motorvalg etter faktiske effektkrav og laster.
- Revidere kostnadsanalyse for å reflektere reelle priser på innkjøpte profiler og komponenter, samt verkstedarbeid.
- Kartlegge egenfrekvens for roterende komponenter og analysere kritiske turtall for disse.
- Utvikle et fullstendig system for innsamling og fremvisning av sensordata.

17. Kilder

17.1. Skriftlige kilder

- [7] Strzelecki, P., Tomaszewski T., *Analysis of axial load and bending load effects on the fatigue life*, AIP Conference Proceedings 2028, 2018.
- [10] Hunt, D. V., *Reengineering: Leveraging the Power of Integrated Product Development*, Wight (Oliver) Publications Inc., Sacramento, California, USA, 1993, 256 s.
- [11] Bøe, J. K., *PP-presentasjoner til TIP300 – Konsept og produktrealisering*, 2021, 264 s.
- [12] Magrab, E. B., *Integrated Product and Process Design and Development: The Product Realization Process*, 2nd Edition, CRC Press, New York, USA, 2009, 304 s.
- [13] OFFICE OF THE UNDER SECRETARY OF DEFENSE, *DoD Guide to Integrated Product and Process Development*, Washington DC, USA, 1996, 42 s.
- [14] Pugh, S., *Total Design: Integrated Methods for Successful Product Engineering*, Pearson Education, Essex, United Kingdom, 1991, 296 s.
- [16] Michalko, M., *Thinkertoys: A Handbook of Creative-Thinking Techniques*, 2nd Edition, Ten Speed Press, Berkeley, USA, 2006, 416 s.
- [17] Baxter, M., *Product Design*, 2nd Reprint, CRC Press, Cheltenham, United Kingdom, 2001, 308 s.
- [18] Maskinforskriften, *Forskrift om maskiner*, FOR-2009-05-20-544, 2009, Hentet fra: <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2009-05-20-544>
- [19] Stephens, R. I., *Metal Fatigue in Engineering*, 2nd Edition, Wiley, New York, USA, 2000, 496 s.
- [23] Singulani, A. P., *Advanced Methods for Mechanical Analysis and Simulation of Through Silicon Vias*, Doctoral dissertation, Technischen Universität Wien, 2014.
- [24] Sahu, J., *Effect of 475°C Embrittlement on the Fatigue Behaviour of a Duplex Stainless Steel*, Doctoral dissertation, Universität Siegen, 2008.
- [25] Air Force Flight Dynamics Laboratory, *Proceedings of the Air Force Conference on Fatigue and Fracture of Aircraft Structures and Materials*, 1970, 869 s.
- [26] Laird, C., *The Influence of Metallurgical Structure on the Mechanisms of Fatigue Crack Propagation*, ASTM, 1967, 131-180 s.
- [32] Timoshenko, S., Gere, J. M., *Mechanics of Materials*, 2nd SI Edition, Van Nostrand Reinhold, Boston, Massachusetts, USA, 1987, 784 s.
- [46] Terjesen, G., *Dimensjoneringsteknikk for ingeniører*, Fagbokforlaget, Oslo, 2021, 639 s.
- [47] Johannessen, J., *Tekniske tabeller*, Cappelen, Oslo, 2002, 138 s.

17.2. Internettkilder

- [1] Utmattingsgrafer, Inspectioneering. Hentet fra: <https://inspectioneering.com/tag/fatigue>. Lastet ned: 21/01/2022.
- [2] Rapport, togulykke, Statens Havarikommisjon for Transport. Hentet fra: <https://havarikommisjonen.no/Bane/Avgitte-rapporter/2011-08>. Lastet ned: 21/01/2022.
- [3] Togulykke, VG. Hentet fra <https://www.vg.no/i/wwv3d>. Lastet ned: 21/01/2022.
- [4] Utmattingsbrudd i toghjul, ScienceDirect. Hentet fra: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350630715001922?via%3Dihub>. Lastet ned 21/01/2022.
- [5] Brudd i veivaksel, Wikipedia. Hentet fra: <https://en.wikipedia.org/wiki/Fractography>. Lastet ned: 03/02/2022.
- [6] Servohydraulisk testmaskin, SwickRoell, Hentet fra: <https://www.zwickroell.com/products/dynamic-and-fatigue-testing-systems/servohydraulic-testing-machines/>. Lastet ned: 23.01.2022.
- [8] Koordinatsystem, Newport. Hentet fra: <https://www.newport.com/t/manual-positioning-basics>. Lastet ned: 19/01/2022.
- [9] IPD, NPDSolutions. 2019. Hentet fra: <https://www.npd-solutions.com/principles.html>. Lastet ned: 31/01/2022.
- [15] QFD, Wikipedia. Hentet fra: https://sv.wikipedia.org/wiki/Quality_function_deployment. Lastet ned: 31/01/2022.
- [20] Krystallstrukturer, Encycopædia Britannica, Hentet fra: <https://www.britannica.com/science/face-centred-cubic-structure#/media/1/199887/1527>. Lastet ned: 17/03/2022.
- [21] Glideplan, Tec-Science. Hentet fra: <https://www.tec-science.com/material-science/ductility-of-metals/influence-of-the-lattice-structure-on-the-ductility/>. Lastet ned: 17/03/2022.
- [22] Solidification, NDE-Ed. Hentet fra: <https://www.nde-ed.org/Physics/Materials/Structure/solidification.xhtml>. Lastet ned: 17/03/2022.
- [27] Spenningsbølge, Comsol. Hentet fra: <https://www.comsol.com/multiphysics/material-fatigue>. Lastet ned: 17/03/2022.
- [28] Utmattingsprøvemaskin, walter+bai. Hentet fra: https://www.walterbai.com/page/documents/Brochures/UBM_Rotary_Bending_E_low.pd.f. Lastet ned: 28/02/2022.
- [29] Utmattingsprøvemaskin, walter+bai. Hentet fra: <http://www.acutech.gr/media/pdf/Rotary%20Bending%20Testing%20Machines.pdf>. Lastet ned: 28/02/2022.

- [30] Utmattingsprøvemaskin, Zwick/Roell. Hentet fra: https://www.zwickroell.com/fileadmin/content/Files/SharePoint/user_upload/PI_EN/16_998_ARBM120_PI_EN.pdf. Lastet ned: 28/02/2022.
- [31] Utmattingsprøvemaskin, ENDUTEQ. Hentet fra: <https://enduteq.com/wp-content/uploads/2020/09/06c-RR-Moore-Fatigue-Testing-System.pdf>. Lastet ned: 28/02/2022.
- [33] Spennhylse, Schuchardt Maskin, Hentet fra: <https://smaskin.no/spennhylse-er11-er11>. Lastet ned: 28.04.2022.
- [34] Borchuck, Gustavsen AS. Hentet fra: <https://www.gustavsenas.no/wolfcraft/2649000/sds-plus-sett-inkludert-borchuck>. Lastet ned: 28.04.2022.
- [35] Mini lathe chuck, Grizzly Industrial. Hentet fra: <https://www.grizzly.com/products/grizzly-mini-lathe-chuck-w-arbors/h5934>. Lastet ned: 28.04.2022.
- [36] Frekvensomformer, VVParts. Hentet fra: <https://www.vvparts.no/produkt/frekvensomformer-1x200-240v-6-1a/>. Lastet ned: 28.04.2022.
- [37] 1-fase motor, Drivetek. Hentet fra: https://www.dtc.no/normmotor_1fase_317.html. Lastet ned: 28.04.2022.
- [38] 3-fase motor, Drivetek. Hentet fra: https://www.dtc.no/normmotor_3fase_326.html. Lastet ned: 28.04.2022.
- [39] Arduino Uno mikrokontroller, Arduino Hentet fra: <http://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3>. Lastet ned: 28.04.2022.
- [40] Bryter, Elfa Distrelec. Hentet fra: https://www.elfadistrelec.no/en/micro-switch-ss-5a-1co-47n-hinge-roller-lever-omron-electronic-components-ss-5gl2/p/11083592?ext_cid=shgooaqnoen-Shopping-campaign&gclid=CjwKCAjwxOCRBhA8EiwA0X8hi90d8hiWNPZabQOc1JpbIphbKeJoJqPwH-EpSuO5Zx5ugUdVUBdSwhoCoAUQAvD_BwE. Lastet ned: 28.04.2022.
- [41] LCD skjerm, Arduino2022. Hentet fra: <https://create.arduino.cc/projecthub/YoussefSabaa/lcd-display-in-real-time-ea0b7b>. Lastet ned: 28.04.2022.
- [42] Mekanisk teller, Grainger. Hentet fra: <https://www.grainger.com/product/DAYTON-Mechanical-Counter-5-Digits-6X158>. Lastet ned: 28.04.2022.
- [43] Optisk sensor, Cole-Parmer2022. Hentet fra: <https://www.coleparmer.de/i/monarch-6180-056-optical-sensor-for-up-to-3-feet-range-from-1-to-250-000-rpm/0821253>. Lastet ned: 28.04.2022.
- [44] Hall effect sensor, Electropeak. Hentet fra: <https://electropeak.com/hall-sensor-ss49e-1>. Lastet ned: 28.04.2022.

Utvikling av roterende 4-punkts bøyeutmattingsmaskin

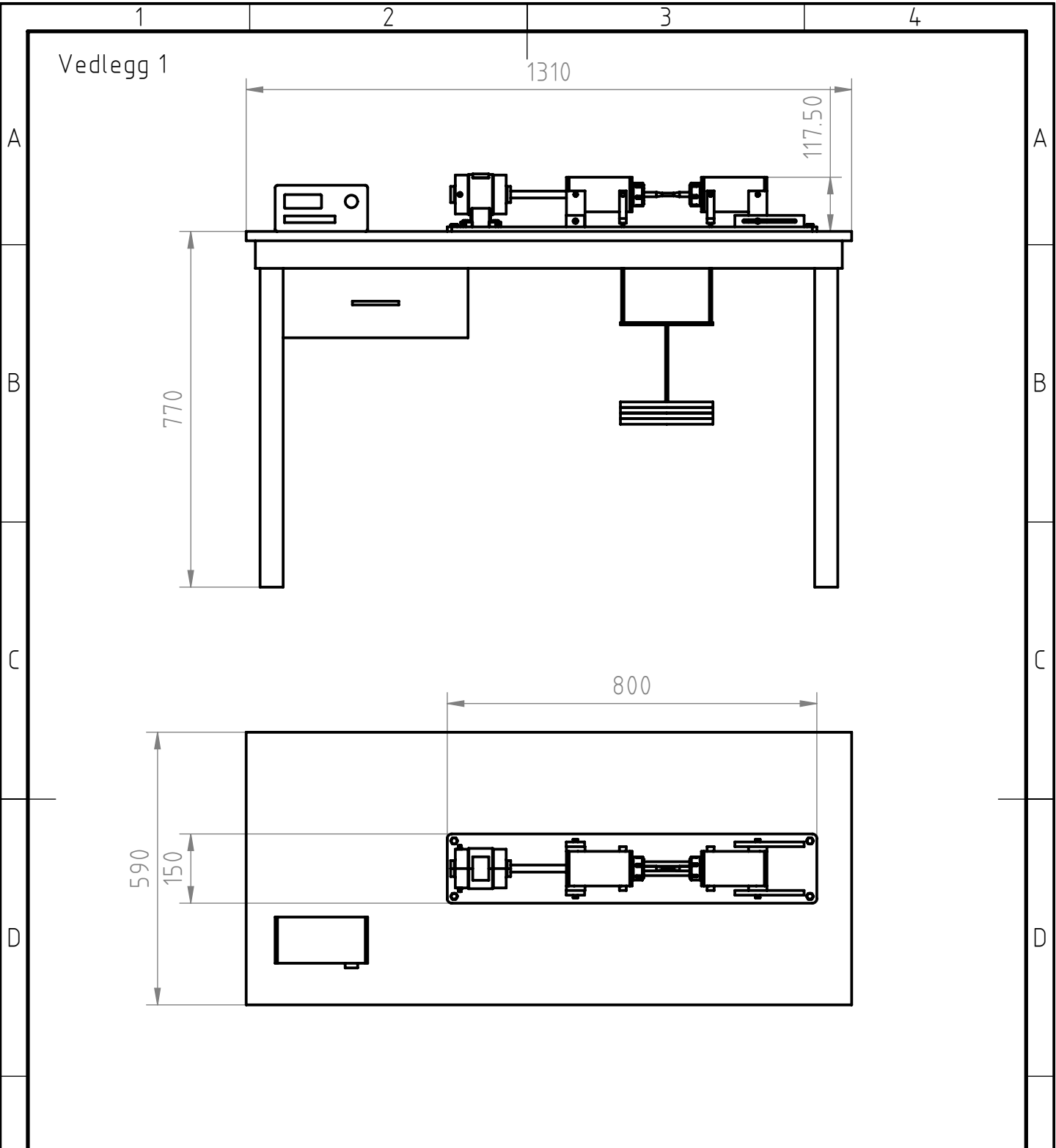
- [45] Mekanisk turteller, Peaktech. Hentet fra: <https://peaktech-rce.com/en/tachometers/361-peaktech-2795-digital-optical-contact-tachometer-5-digits.html>. Lastet ned: 28.04.2022.
- [48] CAD-modell, motor, GrabCAD. Hentet fra: <https://grabcad.com/library/motor-169>. Lastet ned: 28.04.2022.
- [49] CAD-modell, kjoks og spennhylse, GrabCAD. Hentet fra: <https://grabcad.com/library/er-32-collett-for-a-turret-lathe-1>. Lastet ned: 28.04.2022.
- [50] Bakgrunn, materiallaboratorium, ZwickRoell, Hentet fra: <https://www.zwickroell.com/services/laboratory-for-materials-and-components-testing/>. Lastet ned: 28.04.2022.

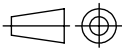

18. Vedlegg

Tabell 18.1. Oversikt over vedlegg og en beskrivelse av innhold.

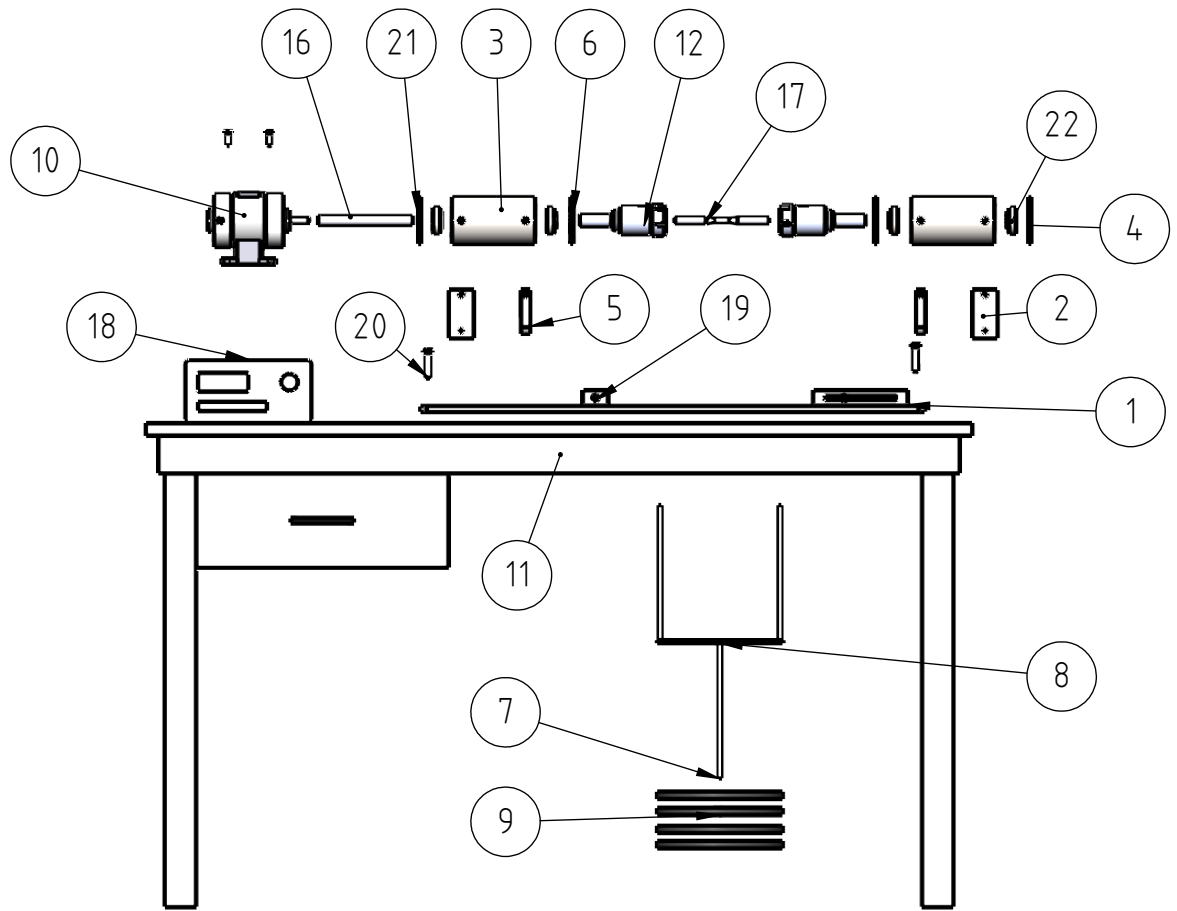
Vedlegg	Innhold
1	Måltegning, ISO128
2	Ekspljosjonstegning, ISO128
3	Stykkliste
4	Oppgavebeskrivelse fra Geir Terjesen
5	Tillatte spenninger fra <i>Tekniske tabeller</i> , J. Johannessen
6	ISO 1143, 4-punkts bøyebelastning
7	ISO 1143, formler for last


Vedlegg 1



1				TPN		12.05.22	
Revisjon	Revisjonen gjelder			Tegnet	Kontroll	Godkjent	Dato
Tittel:		 1:12 (A4)	Tegnet av:		Torbjørn Pytte Nordli		12.05.22
UTMATTINGSMASKIN			Kontrollert av:				
Roterende bøyeutmatting			Godkjent av:				
			Henvisning:				
		Alle mål i millimeter der ikke annet er oppgitt.		Dokumenttype:		Ark:	
		Toleranser iht. NS-ISO 2768-1 der ikke annet er oppgitt.		Måltegning		1/1	
				Tegningsnummer:		Revisjon	
				UTMATTING_DIM		1	

Vedlegg 2



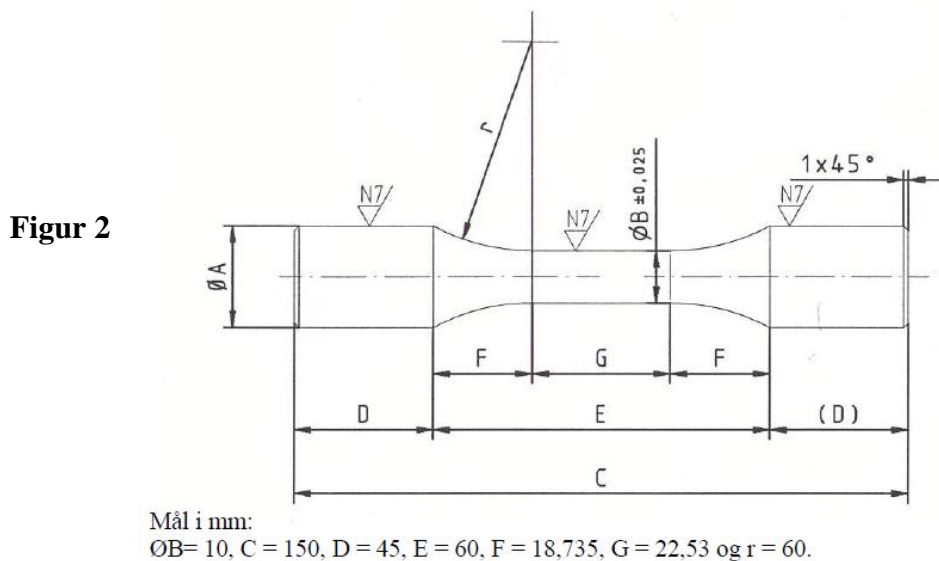
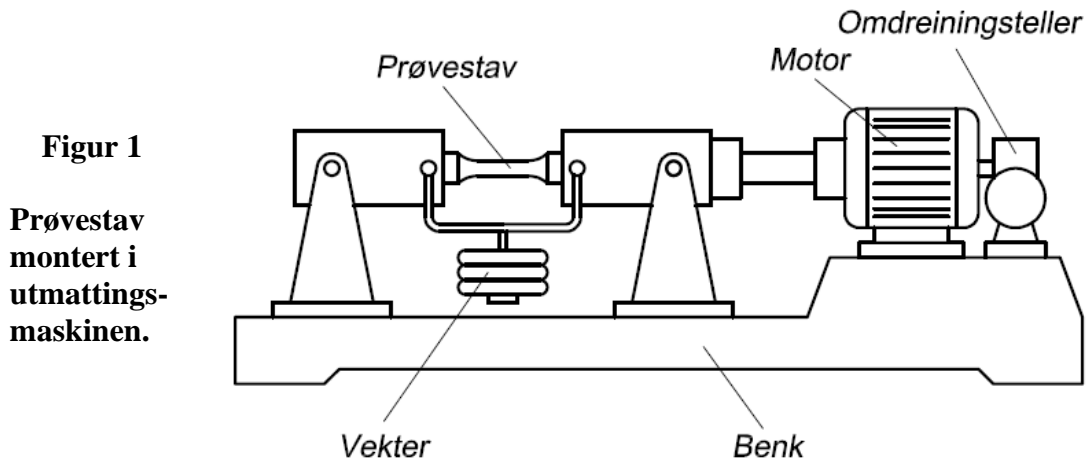
1		TPN			12.05.22
Revisjon	Revisjonen gjelder	Tegnet	Kontroll	Godkjent	Dato
Tittel: UTMATTINGSMASKIN Roterende bøyematting		Tegnet av: Torbjørn Pytte Nordli			12.05.22
		Kontrollert av: Godkjent av: Henvisning:			
		Tegningsnummer: UTMATTING_EKSPL	Dokumenttype: Eksplonasjonstegning		Ark: 1/1
		Alle mål i millimeter der ikke annet er oppgitt. Toleranser iht. NS- ISO 2768-1 der ikke annet er oppgitt.			Revisjon 1

STYKKLISTE			
Pos.	Tittel	Ant.	Materiale
1	Plate	1	Alu 6082
2	Fot	4	Alu 6082
3	Lagerhus	2	Alu 6082
4	Lokk1	1	Alu 6082
5	Gaffel	2	Alu 6082
6	Lokk2	2	Alu 6082
7	Stang	3	S235
8	Profil	1	S235
9	Lodd	4	
10	Motor	1	
11	Bord	1	S235 og kryssfiner
12	Kjoks	2	
13	ISO 4017 M6 x 20-N	4	
14	Aksel	1	S355
15	Stav	1	
16	Elektronikkboks	1	S235
17	ISO 4762 M6 x 20 – 20N	4	
18	ISO 4014 – M8 x 40 x 22-N	4	
19	Lokk3	1	Alu 6082
20	SKF – 32004 X – 14,SI,NC,14	4	

Masteroppgave: Roterende 4-punkts bøyeutmattingsmaskin

Bakgrunn

Ved NMBU's laboratorium er det behov for en roterende utmattingsmaskin, se eksempelet i figur 1. Maskinen skal konstrueres, med motor, stavinnfestingssystem og belastningssystem. Maskinen bør ha et turtall på minst 3000 o/min og skal konstrueres til en standardstav, se f.eks. figur 2. Maskinen må ha et tellesystem som angir hvor mange rotasjoner staven har gjort før brudd.



Momenter ved dimensjonerings og valg av komponenter til utmattingsmaskin

- Valg av design og ytre mål
- Valg av motor
- Valg av innfestingsforbindelser
- Valg av tellesystem
- Hvilke standarder gjelder?
- Styrke og utmattingsberegning av maskinen

Tillatte belastninger

Tillatte belastninger for stålkonstruksjoner i N/mm^2

Materiale	Belastningstype	Strekk σ_s	Trykk σ_t	Bøying σ_b	Vridning/ skjæring τ
NS-EN10025 S235JRG2	A I	100-150	100-150	110-160	65- 95
	B II	65- 95	65- 95	70-105	40- 60
	C III	45- 70	45- 70	50- 75	30- 45
NS-EN10025 S355J0	A I	140-205	140-205	150-215	80-125
	B II	90-130	90-130	100-150	55- 85
	C III	65- 95	65-95	70-105	40- 60
NS-EN10025 E360	A I	205-300	205-300	225-340	125-190
	B II	130-200	130-200	150-215	80-125
	C III	90-140	90-140	105-125	60- 90
NS-EN10083-1/-2 Seigherdingsstål 42Cr4Mo	A I	345-590	345-590	380-650	205-350
	B II	220-380	220-380	240-410	160-240
	C III	160-260	160-260	170-235	100-190
NS-11645 Sst 450	A I	80-120	105-160	90-130	50- 70
	B II	50- 80	60- 90	55- 85	30- 50
	C III	30- 50	30- 50	40- 60	20- 35
NS-11650 Sst 520	A I	90-130	120-180	100-140	45- 70
	B II	60- 90	70-110	70-110	35- 50
	C III	35- 60	35- 60	50- 75	25- 40
NS-11100* SjG 200	A I	20- 40	-110	45- 70	30- 45
	B II	10- 20	30- 60	30- 45	20- 30
	C III	5- 15	5- 15	20- 30	15- 20

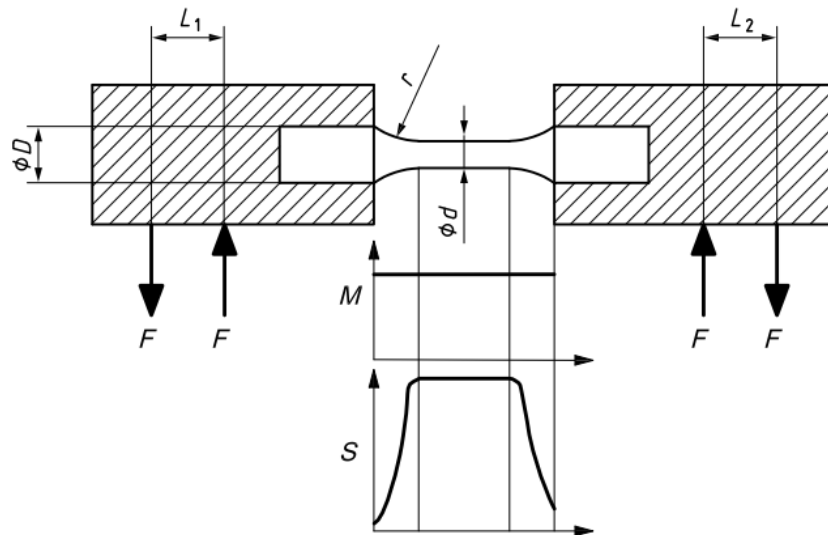
Tabellen har begrenset gyldighet og kan benyttes der det ikke blir gjort nøyaktige beregninger etter bruddhypotesen. Verdiene må reduseres hvis overflatene ikke er glattpolerte, og hvis det er muligheter for kjervvirkning.

Belastningstype A gjelder for statiske belastninger.

Belastningstype B gjelder for hurtig utsvingende belastninger.

Belastningstype C gjelder for hurtig vekslende belastninger.

*) Verdiene for bøying, vridning og skjæring gjelder sirkelformede tverrsnitt. Ved bøying må verdiene reduseres med 20 % for rektangulære tverrsnitt og med 40 % for I-formet tverrsnitt. Ved vridning og skjæring reduseres verdiene for kvadratisk tverrsnitt med 40 % og for rektangulære tverrsnitt med 40-60 %.



Key

D	diameter of gripped or loaded end of specimen	M	bending moment
d	diameter of specimen where stress is maximum	r	radius (see Table 1)
F	applied force	S	stress
L_1, L_2	force arm lengths		

Figure 5 — Parallel specimen — Four-point loading

Table 2 — Derivation of weight to be applied to test machine loading system

Machine type	Loading system	S	F	Conversion of F to applied mass
Single-point bending	Direct load	$S = \frac{M}{W} = \frac{16F(L-x)}{\pi d^3}$	$F = S \frac{\pi d^3}{16(L-x)}$	$\times 1,0$
Single-point bending	Fixed ratio lever	$S = \frac{M}{W} = \frac{16F(L-x)}{\pi d^3}$	$F = S \frac{\pi d^3}{16(L-x)}$	Divide by the lever ratio, M_{lr} .
Single-point bending	Lever and poise	$S = \frac{M}{W} = \frac{16F(L-x)}{\pi d^3}$	$F = S \frac{\pi d^3}{16(L-x)}$	Set to F on the load scale on the lever.
Two-point bending	Direct load	$S = \frac{M}{W} = \frac{16FL}{\pi d^3}$	$F = S \frac{\pi d^3}{16L}$	$\times 1,0$
Two-point bending	Fixed ratio lever	$S = \frac{M}{W} = \frac{16FL}{\pi d^3}$	$F = S \frac{\pi d^3}{16L}$	Divide by the lever ratio, M_{lr} .
Two-point bending	Lever and poise	$S = \frac{M}{W} = \frac{16FL}{\pi d^3}$	$F = S \frac{\pi d^3}{16L}$	Set to F on the load scale on the lever.
Four-point bending	Direct load	$S = \frac{M}{W} = \frac{32FL}{\pi d^3}$	$F = S \frac{\pi d^3}{32L}$	$\times 1,0$
Four-point bending	Fixed ratio lever	$S = \frac{M}{W} = \frac{32FL}{\pi d^3}$	$F = S \frac{\pi d^3}{32L}$	Divide by the lever ratio, M_{lr} .
Four-point bending	Lever and poise	$S = \frac{M}{W} = \frac{32FL}{\pi d^3}$	$F = S \frac{\pi d^3}{32L}$	Set to F on the load scale on the lever.

where

S is the required test stress;

M is the bending moment;

F is the applied force;

L is the force arm length (see A.4.2);

d is the specimen diameter;

W is the section modulus;

M_{lr} is the machine lever ratio (see also A.4.3);

x is the distance along the specimen axis from the fixed bearing face to the stress measurement plane.



Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway