



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2018 30 stp

Fakultet for realfag og teknologi (REALTEK)

Effekten av maskineringsfeil på utmattingslevetiden til bøyepåkjente aksler

The effect of surface defects due to machining errors
on rotating bending fatigue life

Jørgen Skårdal

Maskin Prosess og Produktutvikling
REALTEK

Effekten av maskineringsfeil på utmattingslevetiden til bøyepåkjente aksler

Jørgen Skårdal



**Mastergradsoppgave ved Norges Miljø og
Biovitenskapelige Universitet(NMBU). Fakultetet for
Realfag og teknologi (REALTEK)**

FORORD

Denne masteroppgaven er gjennomført som en del av masterprogrammet i Maskin, prosess og produktutvikling ved Fakultet for matematiske realfag og teknologi (REALTEK) ved NMBU. Masteroppgaven er gjennomført i vårsemesteret 2018 med et omfang på 30 studiepoeng.

Ved maskinering av aksler er det nødvendig å kvalitetssikre at overflaten er uten maskineringsfeil. Maskineringsfeil ved dreining av en overflate kan blant annet medføre at utmattingslevetiden blir radikalt redusert. Dersom overflaten bare testes noen vilkårlige steder med en ruhetsmåler, så behøver ikke alle maskineringsfeil å bli oppdaget. Fakultet for realfag og teknologi (REALTEK) ved NMBU ønsker å utvide sin kunnskap om dette temaet og har derfor initiert denne masteroppgaven.

Oppgaven tar for seg årsaker til maskineringsfeil, hvordan maskineringsfeil kan oppdages og ved praktisk testing er det sett på hvilken innvirkning maskineringsfeilene har på utmattingslevetiden. Videre er det gjennomført en litteraturstudie og samtaler med fagpersoner som har samlet ytterligere kunnskap om dette fagfeltet.

Rapporten innleder med kapitler som beskriver problemstilling, mål og begrensinger, metoder og terminologi. Deretter følger et kapittel om grunnlagsteori hvor sponfraskillende bearbeiding ved dreining og overflateruhet har fått et spesielt fokus. Videre følger kapitler som omfatter overflate og utmatting, maskinerings effekter og årsaker. Deretter kommer et kapittel om produksjon av prøvestaver, med og uten maskineringsfeil som leder frem til resultatene fra utmattingstesting. Rapporten avsluttes med kapitler om diskusjon, konklusjon og videre arbeid.

Rapporten kan brukes som veileder for ingeniører som arbeider med konstruksjoner som omfatter aksler. Rapporten gir nødvendig kunnskap om maskinering og maskineringsfeil og de utmattingskritiske følgene disse kan få. Denne kunnskapen er nødvendig for å kunne jobbe i interaksjon med maskineringsverkstedet, gi anbefalinger når det gjelder produksjon og for å utføre mottakskontroll av de leverte produkter.

Leseren bør ha grunnleggende kunnskaper på maskiningeniørnivå og kjennskap til maskinering for å få fullt utbytte av rapporten.

Til slutt vil jeg rette en takk til førsteamanuensis Geir Terjesen som har vært hovedveileder ved NMBU. Jeg vil også takke Overingeniør Øyvind Hansen for god hjelp ved verkstedet til NMBU og lab ingeniør Rune Orderløyen for god hjelp med utmattingstestmaskin ved OsloMet.

Jørgen Skårdal

Ås, 14 mai. 2018

SAMMENDRAG

Denne masteroppgaven er gitt av Fakultet for matematiske realfag og teknologi (REALTEK) ved NMBU. REALTEK er tilknyttet et eget maskineringsverksted som blant annet benyttes til å lage komponenter til forskning og utvikling. En kjent problemstilling fra dette miljøet er at maskineringsfeil kan redusere utmattingslevetiden til aksler betraktelig. Denne problemstillingen har vært utgangspunktet for masteroppgaven.

Målet med masteroppgaven var å lage en oversiktlig rapport som gav en oversikt over årsakene til maskineringsfeil og hva man skal se etter ved inspeksjon for å fastlegge disse feilene. Videre skulle det utføres utmattningstesting på aksler produsert med og uten maskineringsfeil. Resultatene av utmattningstestingene skulle presenteres og den kunnskapen som ble funnet i litteraturen og som fremkom etter diskusjon med fagpersoner skulle beskrives og diskuteres.

Oppgaven ble innledet med en litteraturstudie som omfattet sponfraskillende bearbeiding, overflateruhet og utmatting. Jeg studerte også tidligere artikler som omhandlet samme tema for å få kunnskap om de erfaringer som foreligger. Det er også utført praktisk testing av utmattingsstaver med og uten framprovoserte maskineringsfeil for å fastlegge endringer i utmattingslevetid.

Litteraturstudien gav forståelse for sponfraskillende bearbeiding, overflateruhet og maskineringsfeilenes innvirkning på utmattingslevetiden. To hovedtyper maskineringsfeil er valgt ut henholdsvis «sperring» som oppstår ved vibrasjoner og klining som på grunn av lokalt høye temperaturer medfører at spon kliner seg fast til overflaten de viktigste funnene fra litteraturen er at

- Overflateintegriteten som en helhet påvirker utmattingslevetiden for maskinerte overflater.
- Overflatefaktorens reduisering av utmattingsgrensen vil ligge mellom 0,5 - 0,8.¹⁰
- Skjæredata påvirker overflateruheten i større grad enn utmattingslevetiden¹¹
- Den mest betydelige egenskapen ved maskinerte overflater er restpenninger i overflatelaget¹².

Fra utmattningstesting av stålet EN355J2 +M ved roterende bøying med konstant spenningsvidde og spenningsforholdet $R = -1$, ble det funnet at prøvestaver utsatt for maskineringsfeil vil oppleve en reduksjon av utmattingslevetid på henholdsvis 44, 8 prosent for sperring og 60,5 prosent for klining.

Som grunnlagsbok i utmatting vil jeg spesielt nevne boken «Metal Fatigue in engineering» R. Stephens m.fl.¹⁰ fordi den er grundig og godt forklart, men den må sees i sammenheng med ny forskning da den er utgitt i 2001 og noe av innholdet kan være utdatert. Videre vil jeg trekke frem artiklene «Influence of machining parameters on fatigue endurance limit of AISI 4140 steel» Karina S.S. Lopes m.fl.¹¹. for være grundig og systematisk i gjennomføringen, i tillegg til «fatigue life of machined components» A. Pramanik m.fl.¹² som kartlegger at forskningen fortsatt er på et tidlig stadium vedrørende utmattingslevetiden for maskinerte komponenter.

ABSTRACT

This master thesis was given by the Faculty of science and technology (REALTEK) at the Norwegian University of Life Sciences (NMBU). The faculty is affiliated with its own machining workshop, which is used for machining components to research and development projects. A known issue in the field is the reduction of fatigue life due to surface defects caused by the machining process which became the starting point for this thesis.

The scope of this master thesis was to develop a report that gave an overview of the causes of surface defects in the machining process and what look for when inspecting for the surface defects. Furthermore, a rotating bending fatigue test should be conducted on specimen with and without these surface errors. The knowledge found from literature and conversations with skilled persons in the field should be discussed and described.

The thesis was initiated with a literature review, focusing on the chip removing process, surface roughness and fatigue life. I also reviewed some published articles regarding the research in the field, to gather information about which stage the research had reached. Experimental testing has been conducted on specimen with and without surface defects to determine changes in fatigue life.

The literature review provided an understanding of chip removal processing, surface roughness and surface errors due to the machining process and the effect on the fatigue life. The articles also provided an insight in machining errors, I chose two main types of defects, chatter vibration and adhering of chips into the work piece caused by local high temperatures in the cutting zone. Both of which are described in the report and will reduce the fatigue life of machined components. From the literature review it was found that

- surface integrity as a whole affects the fatigue life of machined surfaces
- The reduction of fatigue life due to surface factors is between 0,5 - 0,8 ¹⁰.
- Machining parameters affects the surface roughness to a greater extent than the fatigue life.
- The most significant factor to establish fatigue limit is the residual stresses in the surface layer caused in the machining process¹².

From rotating bending fatigue tests with the stress relation $R = -1$ it was found that specimen with surface errors due to chatter vibration experienced a reduction in fatigue life of 44,8 percent and 60,5 percent for specimen with chip adhering to the surface.

I would like to point out the book “metal fatigue in engineering” R. Stephens et.al. ¹⁰ that has provided a good understanding of fatigue properties, it was published 2001 and some of the content may be outdated. The article “Influence of machining parameters on fatigue endurance limit of AISI 4140 steel ” Karina S.S. Lopes et.al.¹¹. being systematic in the experiments and at last I would like to point out «fatigue life of machined components» A. Pramanik ¹² to survey that the research is still at an early phase regarding the fatigue life of machined components.

Innholdsfortegnelse

1. INNLEDNING.....	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Problemstillinger	2
1.3 Målsettinger og begrensinger	3
1.4 Metode og løsningsverktøy	4
1.4.1 Litteraturstudie	4
1.4.2 Utmattingstesting.....	4
1.4.3 Programvare.....	4
1.6 Terminologi.....	5
1.6.1 Symboler og enheter	6
1.6.2 Ligninger og betydning.....	8
2. Grunnlags Teori	11
2.1 Sponfraskillende bearbeiding	11
2.2 Dreining.....	11
2.2.1 Dreiebenkens oppbygning og funksjon.....	12
2.2.2 Skjærrets form og neseradie.....	14
2.2.3 Skjæredata ved dreining	16
2.2.4 Oppspenning av arbeidsemnet, utforming og stabilitet.....	16
2.2.5 CNC maskiner og G-koder	17
2.3 Overflatefeil ved dreining	19
2.3.1 Klining	19
2.3.2 Sperring	20
2.3.3 Andre typer av maskineringsfeil	22
2.4 Overflateruhet.....	22
2.4.1 Overflateruhet generelt.....	22
2.4.2 Overflateruhet og dreining	23
2.4.3 Tabell for overflateruhet for bearbeidingsprosesser.....	24
2.4.4 Måleutstyr.....	25

3. Utmatting	27
3.1 Generelt om utmatting.....	27
3.2 Sprekkinitering og sprekkevekst.....	28
3.3 Reduseringsfaktorer for estimering av utmattingslevetid	30
3.4 S-N metoden.....	33
3.5 Juvinalls metode for estimering av SN kurven	34
3.6 Testmaskiner og metoder	35
3.7 Utmattingsdata for stål S355J2 + M kvalitetene	36
4. Innvirkning av maskinering på utmattingssegenskaper ved maskinerte komponenter. ...	37
4.1 Skjæredata og påvirkning på overflateintegritet.	37
4.2 Skjæredata og effekter på utmattingslevetid.	38
4.3 Skjæredata og effekten på restspenninger	40
5. Årsaker til maskineringsfeil	41
5.1 SLD diagrammer	41
5.2 Kontroll teknikker ved sperring	42
6. Produksjon og testing av Prøvestaver	43
6.1 Fremprovosere maskineringsfeilene.	43
6.2 Produksjon av prøvestaver	44
6.2.1 Valgt materiale for testingen	44
6.2.2 Fremgangsmåte	44
6.3 Kontroll av kvalitet.....	47
6.4 Gjennomføring av test.....	48
6.5 Resultater.....	50
7. Diskusjon og evaluering	53
7.1 Produksjonen av prøvestavene.	53
7.2 Gjennomføring av test.....	53
7.3 Litteratur.....	54
7.4 Evaluering av testresultatene.....	55
7.5 Redusering av utmattingsgrense ved maskin/operatørfeil i dreieprosessen.....	57
8. Konklusjon og videre arbeid.....	59
9. Litteraturreferanser	61
10. Vedlegg	63

Figurliste

Figur 1	Hoveddelene på en dreiebenk ⁹	12
Figur 2	Eksempel på dreiespindel ³	13
Figur 3	Sleideføringer på en manuell dreiebenk ⁹	13
Figur 4	Verktøyholder på en manuell dreiebenk ⁹	14
Figur 5	Eksempel på bakdokke ⁴	14
Figur 6	Maskinstativ med vanger ⁴	14
Figur 7	Utvalg av dreiestål ³	15
Figur 8	Vinkler på dreiestål ⁹	15
Figur 9	Vinkler på dreiestål ⁹	15
Figur 10	Bearbeidingskrefter på arbeidsemnet ved dreining ⁵	16
Figur 11	Reduksjon av spennkraft ved økende omdreiningstall ⁵	16
Figur 12	CNC maskinen ved NMBUs verksted	17
Figur 13	Klining på en maskinert overflate	19
Figur 14	Klining ved lagvis oppbygging av spon ²	20
Figur 15	Sperring på en dreid overflate	20
Figur 16	Overflateruhet Ra ⁶	22
Figur 17	Overflateruhet Ra ⁶	22
Figur 18	Overflateruhet som funksjon av skjærehastigheten ⁵	24
Figur 19	Overflateruhet som funksjon av matinghastigheten ⁵	24
Figur 20	Mulig overflateruhet ved forskjellige bearbeidingsprosesser ⁷	24
Figur 21	Slepenålsbasert ruhetsmåler	25
Figur 22	Definisjoner av spenninger og sykler ¹	27
Figur 23	Glidelag i krystallkorn ⁸	29
Figur 24	Striasjoner og restbrudd av en prøvestav	29
Figur 25	Striasjoner og restbrudd ⁸	29
Figur 26	Sammenheng mellom økning av strekkfasthet , overflatefaktor og hardhet.....	30
Figur 27	SN diagram og definisjoner.....	33
Figur 28	Eksempel på SN diagram og hvordan lese det.....	33
Figur 29	Estimering av SN kurven med modifieringsfaktorer ¹	34
Figur 30	SN kurve estimert ved Juvinalls metode for en polert prøvestav ¹	34
Figur 31	Testmaskin for ikke uniformt fordelt moment	35
Figur 32	Testmaskin for uniformt fordelt moment	35

Figur 33 Bøyespennning i prøvestaver	36
Figur 34 Regenerativ sperring av en bølgete overflate	41
Figur 35 Prøvestav montert i utmattingstestmaskin.....	48
Figur 36 Testoppsettet ved utmattingstesting	48
Figur 37 Spredning av testresultatene med grafisk fremstilling av standardavvik.....	51
Figur 38 Estimerte SN kurver for prøvestavene	56
Figur 39 Modellert prøvestav med kjerv	57
Figur 40 Reduksjon av utmattingsgrense ved kjervet prøvestav	58

1. INNLEDNING

I dette innledende kapitlet vil det bli presentert en bakgrunn for oppgaven, problemstillinger ved temaet, målene for oppgaven, metoder og løsningsverktøy for å gjennomføre oppgaven i tillegg til en beskrivelse av terminologien.

1.1 Bakgrunn

Hensikten med denne masteroppgaven er å studere maskineringsfeilenes innvirkning på utmattingslevetiden til aksler. Denne kunnskapen er viktig ved produksjon av aksler og ved kvalitetskontroll av aksler slik at blant annet havarier på grunn av nedsatt utmattingslevetid kan forbygges. Denne oppgaven vil fokusere på maskineringsfeilene «klining» og «sperring» på dreide aksler for å undersøke hvor stor negativ effekt disse feilene har på utmattings-levetiden. Begrepene «klining» og «sperring» blir forklart i dette kapitlet. Fakultetet for realfag og teknologi ved NMBU har initiert oppgaven for å utvide sin kunnskap om emnet.

Aksler er en viktig maskindell som blir brukt ved roterende systemer for å overføre et dreiemoment eller støtte opp andre belastede deler. Det blir ofte sagt at hjulet er den viktigste oppfinnelsen, men for at hjulet skal holdes på plass er det behov for en aksel. Andre maskindeler blir ofte bygget rundt akslene og de kan deles inn i tre grupper ut i fra bruksområdet. bæreaksler, transmisjonsaksler og bøyelige aksler.

Utmatting er ett viktig tema for ingeniøren fordi de fleste brudd i metaller oppstår på grunn av dette. Utmatting skjer ved et materiale blir utsatt for en periodisk spenningsvidde som er lavere enn strekkfastheten i materialet. Utmatting oppstod som et begrep rundt 1850 tallet, da flere togulykker fant sted ved at det gikk brudd i sporvognakslene. Ulykkene fungerte som en katalysator for å utforske årsaken til bruddene, blant annet togulykken i 1842 på strekningen Paris – Versailles. Toget hadde 640 passasjerer som var låst inne i jernbanevognene da ulykken skjedde og 42 personer omkom, dette førte til en etterforskning av ulykken hvor det ble funnet en sammenheng mellom distansen sporvognakslene hadde blitt brukt og det ble foreslått at disse skulle bli erstattet etter at toget hadde kjørt en viss distanse ¹³.

I dag er industrien i større grad automatisert enn tidligere, spesielt innenfor maskinering der CNC maskiner (Computer Numerical Control) har blitt mer utbredt. I årene fremover er det antatt at automatiseringen i industrien bare vil øke. Det har bidratt positivt ved at

effektiviteten og nøyaktigheten har økt og arbeidskraften har blitt redusert. På tross av dette vil ikke utmattingssegenskaper ligge til grunn for maskineringen. Kvaliteten på det maskinerte produktet blir målt ved dimensjon-, form og ruhetstoleranser. Under maskineringen kan det oppstå maskineringsfeil i manuelle dreiebenker og det antas at disse også kan oppstå ved CNC maskiner. Ved større produksjonsserier kan det tenkes at det er større sannsynlighet for at et produkt med maskineringsfeil vil bli en av mengden.

Maskineringsfeil som oppstår i dreiebenken kan ha en vesentlig negativ effekt på overflateintegriteten til en maskinert komponent. Med overflateintegritet menes de resulterende egenskapene i nærheten av overflatelaget etter å ha blitt maskinert. I denne oppgaven er det to typer maskineringsfeil som vil undersøkes, som har forskjellig navn i industrien i denne oppgaven velges det å bruke begrepene sperring og klining.

Sperring skjer på bakgrunn av vibrasjoner i dreiebenken eller fresemaskinen, og etterlater et karakteristisk spor i overflaten. Det er flere faktorer som spiller inn for hvordan det oppstår. Sperring har i lang tid blitt forsket på og det ble et tema allerede under masse produksjonen av T-forden i USA på starten av 1900 tallet. Det er fortsatt et relevant tema, fordi feilmekanismene er komplekse. innebærer tapt lønnsomhet i produksjonen og gir lavere kvalitet på produktene.¹⁴

Klining er en ustabil prosess som kan oppstå uten forvarsel, Det er ikke en like kjent maskineringsfeil, men kan oppstå i maskineringen ved at spon istedenfor å bli fraktet vekk fra arbeidsemnet kliner seg fast til overflaten. Ved maskineringsfeilene sperring og klining er det antatt at det vil oppstå en endring av overflateintegriteten som vil redusere utmattingsfastheten.

1.2 Problemstillinger

Det er antatt å være lite forskning på utmattingslevetiden vedrørende maskineringsfeil. Oppgaven vil derfor fokusere på:

- Kartlegge årsaker til maskineringsfeil, og typer maskineringsfeil ved dreining.
- Hvordan maskineringsfeil kan oppdages ved inspeksjon
- Hvilken innvirkning maskineringsfeil har på utmattingslevetiden
- Litteraturstudium for å kartlegge tidligere forskning om maskineringsfeil og utmattingslevetid

1.3 Målsettinger og begrensinger

Hovedmål

Lage en oversiktlig rapport som gir et bilde av hvor langt forskningen vedrørende maskinering og effekter på utmattingslevetid har kommet i tillegg beskrive litteratur som blir funnet under gjennomføringen av oppgaven på en god måte som bidrar til forståelse av temaet. Samt gjennomføre og presentere resultater fra en utmattingstesting for prøvestaver fremstilt med og uten maskineringsfeil.

Delmål

- Innhente kunnskap fra personer som har erfaring med maskinering
- Utføre en litteraturstudie om temaet
- Produsere prøvestaver
- Utføre testing
- Utarbeide rapport

Begrensinger

- Det vil bli ikke bli undersøkt utmattingsegenskaper ved lavsykelutmatting.
- For prøvestavene som blir produsert vil undersøkelsen av overflateintegriteten fokusere på overflateruhet. Mikrohardhet, restspenninger og faseformasjoner vil ikke bli betraktet for prøvestavene.
- Det vil kun bli fokusert på maskineringsfeilene klining og sperring, flere feil kan oppstå ved dreining men vil ikke bli utdypet.

1.4 Metode og løsningsverktøy

1.4.1 Litteraturstudie

For oppgaven vil det bli gjennomført et litteraturstudium som beskriver funn ved tidligere publiserte artikler om effekten av maskinering på utmattingslevetid og temaer som sammenfaller med dette. I tillegg vil det bli initiert diskusjoner med fagpersoner innen maskinering for å innhente praktiske tips til produksjonen av prøvestaver

1.4.2 Utmattningstesting

Det vil bli gjennomført utmattningstesting ved OsloMet –Storbyuniversitetet. Testingen vil foregå i testmaskinen ZWICK Roell UBM tc

1.4.3 Programvare

- DAK programvaren Daussault Systemes SolidWorks - Modellering av prøvestaver
- DAP programvaren GibbsCAM - Utvikling av G-kode til fremstilling av prøvestaver i CNC maskin
- TestXpert V12.1 - Styring av utmattningstestmaskin
- Microsoft Office Excel - Produsere diagrammer.
- Microsoft Office Word – Utarbeide rapport.

1.6 Terminologi

Det vil bli benyttet generell fagterminologi som benyttes innen ingeniørfag i tillegg til noe terminologi fra industrien.

Tabell 1 Forkortelser

Forkortelse	Definisjon
NMBU	Norges Miljø og Biovitenskapelige Universitet
REALTEK	Fakultetet for realfag og teknologi
CNC	Computer Numerical Control
DAK	Datamaskinassister Konstruksjon
DAP	Datamaskinassistert Produksjon
BUE	Built up edge
BUL	Built up layer
SN	Spenning – Levetid
EN	Europeisk Norm

1.6.1 Symboler og enheter

Tabell 2 Symboler og enheter

Symbol	Betydning	Enhet
α	Frivinkel	Grad, °
γ	Sponvinkel	Grad, °
β	Eggvinkel	Grad, °
κ	Innstillingsvinkel	Grad, °
φ	Endeklaringsvinkel	Grad, °
ε	Spissvinkel	Grad, °
λ	helningsvinkel	Grad, °
r	Radius, generelt	Grad, °
α_E	endeklaring	Grad, °
ψ	fasevinkel	Grad °
α_p	Kuttdybde	mm
y	nedbøying, generelt	mm
d	diameter generelt	mm
Δd	diameter, gjennomsnitt	mm
b_{lim}	Kuttdybde, grenseverdi	mm
R_a	overflateruhet	μm
ΔR_a	Overflateruhet, gjennomsnitt	μm
F	Kraft, generelt	N
F_a	Kraft, aksial retning	N
F_r	Kraft, radial retning	N
M	Moment, generelt	Nm
s	matehastighet	$\text{mm}/\text{omdreing}$
V_c	Skjærehastighet	m/min
N_{dreing}	Omdreiningstall	$^\circ/\text{min}$
E	Elastitetsmodul	MPa
$\Delta\sigma$	Spenningsvidde	MPa
σ_a	Spenning, amplitude	MPa

Effekten av maskineringsfeil på utmattingslevetiden til bøyepåkjente aksler

σ_m	Spenning, middel	MPa
σ_{maks}	Spenning, maksimum	MPa
σ_{min}	Spenning, minimum	MPa
σ_N	Spenning, nominell	MPa
σ_D	Spenning, utmattingsgrense	MPa
σ_b	Spenning, bøye	MPa
R_m	Strekfasthet	MPa
R_e	Flytegrense	MPa
$G(\omega)$	Frekvens, reel part	Hz
$H(\omega)$	Frekvens, imaginær part	Hz
ω	Frekvens, sperring	Hz
T	Periode, spindel	s
A	Konstant	-
B	Logaritmisk stigningstall	-
N	Sykler, total	-
N_i	Sykler, initiering	-
N_p	Sykler, sprekkvekst	-
C_f	Faktor, overflate	-
C_s	Faktor, størrelse	-
C_l	Faktor, last	-
K_f	Faktor, kjerv	-
K_t	Faktor, spenningskonsetrasjon	-
$\text{var}(x)$	varians	-
SD	Standard avvik	-
j	vektor	-
θ	faseskift	-

1.6.2 Ligninger og betydning

Tabell 3 ligninger og forklaringer

Utrykk	Enhet	indeks	Forklaring
$V = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000}$	mm/min	1	Skjærehastighet ved sponfraskillende bearbeiding
$y = \frac{64 \cdot F_r \cdot l^3}{3 \cdot \pi \cdot E \cdot d^4}$	mm	2	Utbøyingen av arbeidsemnet under oppspenning med fri ende ⁵
$R_a = \int_0^l y dx$	µm	3	Overflateruhet definert som integralet av høydeforskjellene
$R_a = F_1 + F_2$	µm	4	Overflateruhet ved et flate element
$R_{teoretisk} = \frac{s^2}{8 \cdot r}$	µm	5	Teoretisk overflateruhet ⁷
$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{\sigma_{maks} - \sigma_{min}}{2}$	MPa	6	Amplitudespenning
$\sigma_m = \frac{\sigma_{maks} + \sigma_{min}}{2}$	MPa	7	Middelspenning
$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{maks}}$	-	8	Spenningsforhold
$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m}$	-	9	Amplitudeforhold
$\sigma_a = A \cdot N^B$	MPa	10	Amplitude spenning representert lineært i et dobbellogaritmisk diagram
$N = N_i + N_s$ (10)		11	Sykler til utmattingsbrudd

Effekten av maskineringsfeil på utmattingslevetiden til bøyepåkjente aksler

$C_F = 1 - 0,22(\log R_a)^{0,64} \cdot \log R_m + 0,45(\log R_a)^{0,53}$	-	12	Overflatefaktor for redusering av utmattingsfasthet
$C_S = \left(\frac{t_0}{t}\right)^n$	-	13	Størrelsesfaktor for redusering av utmattingsfasthet
$n = 0,10 + 0,15 \cdot \log K_t$	-	14	n-faktor for størrelse og kjerv
$K_f = 1 + q(K_t - 1)$	-	15	Kjervfaktor
$q = \frac{1}{1 + \frac{a}{r}}$	-	16	Petersons definisjon av q
$a = 0,0254 \left(\frac{2070}{R_m}\right)^{1,8}$	-	17	Empirisk sammenheng mellom a og R_m for Petersons definisjon av q
$\sigma_N = 0,9 \cdot R_m$	MPa	18	Juvinall metode for utregning av nominell spenning ved 10^3 sykler
$\sigma_D = 0,5 \cdot R_m$	MPa	19	Juvinall metode for utregning av utmattingsgrense ved 10^6 sykler
$\sigma_N = 0,9 \cdot R_m \cdot C_F \cdot C_S \cdot C_L$	MPa	20	Juvinalls metode for utregning av nominell spenning ved 10^3 sykler med modifieringsfaktorer
$\sigma_D = 0,5 \cdot R_m \cdot C_F \cdot C_S \cdot \frac{C_L}{K_f}$	MPa	21	Juvinall metode for utregning av utmattingsgrense ved 10^6 sykler med modifieringsfaktorer

$\sigma_b = \frac{M_b}{W_b} ($	MPa	22	Formel for bøyespenning i en komponent utsatt for moment
$\frac{f}{f_t} = \frac{r}{r_t} = n + \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \frac{-2\zeta_r}{1-r^2}$	-	23	Sammenheng mellom vibrasjoner og kuttdybde ved sperring
$b_{lim} = \frac{1}{2K_f G(\omega)}$	mm	24	Grenseverdi for kuttdybde ved sperring
$T = \frac{1}{\omega} (2n\pi + \theta), \quad \theta = 3\pi + 2\psi$	Hz	25	Frekvens ved sperring
$\psi = \tan^{-1} \frac{H(j\omega)}{G(j\omega)}$	-	26	Fasevinkel ved sperring
$m = \frac{\Delta\sigma \cdot \pi \cdot d_{snitt}^3}{627840}$	kg	27	Beregning av masse for spenningsvidde ved utmattingsstesting
$var(x) = \frac{\sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N}_n)^2}{n-1}$		29	
$N_{reduksjon} = \left(1 - \frac{\bar{N}_{feiltype}}{\bar{N}_{uten feil}}\right) \cdot 100$	%	30	Prosentvis reduksjon av utmattingslevetid

2. Grunnlags Teori

For at leseren bedre skal forstå begreper og temaer som blir tatt opp i oppgaven vil det i dette kapittelet bli presentert bakgrunn og definisjoner ved maskinering. Hovedelementer ved dreiebenken, overflateruhet og beskrivelse av klining og sperring.

2.1 Sponfraskillende bearbeiding

Et felles begrep for arbeidsoperasjoner som fjerner materiale fra et arbeidsemne er sponfraskillende bearbeiding, dette inkluderer Saging, filing, sliping, boring og fresing⁹. Sponfraskillende bearbeiding kan deles inn i to kategorier hvor enten arbeidsemnet roterer eller skjæreverktøyet roterer. All sponfraskillende bearbeiding vil endre overflateintegriteten lokalt der hvor bearbeidingen blir utført. Begrepet maskinering blir oftest brukt ved dreining, fresing og sliping av arbeidsemner. For bearbeiding av aksler der hensikten er å redusere arbeidsemnets diameter til en ønsket dimensjon, benyttes dreiebenker, både manuelle- og CNC styrte maskiner.

2.2 Dreining

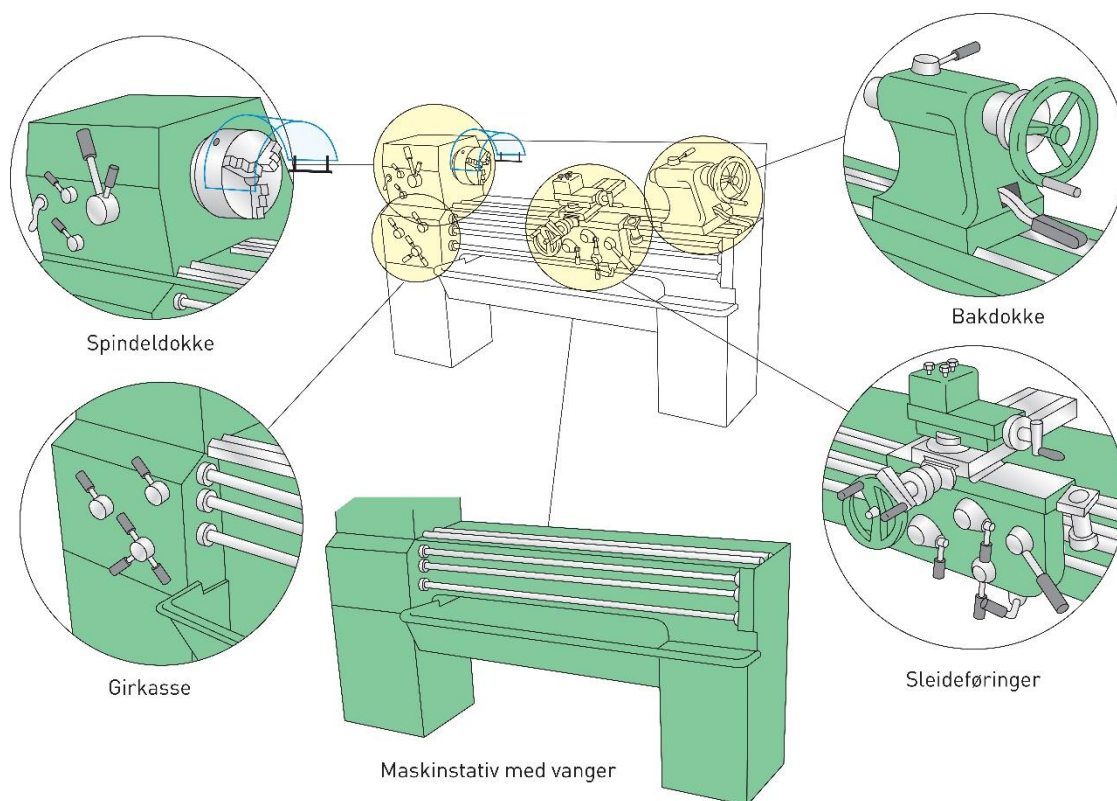
Dreining er den vanligste fremstillingsprosessen av aksler, dreining foregår ved at et arbeidsemne blir spent opp i en dreiebenk og påført en rotasjon. Ett skjærende verktøy blir matet inn i arbeidsemnet, det heter da at verktøyet er i inngrep og en avsponing finner sted. Arbeidsoperasjoner som kan gjennomføres i en dreiebenk er flere, blant annet, utvending, innvendig, plan og konus –dreining. Boring, gjenging og avstikking kan også utføres i dreiebenker⁹. For at det skal være mulig å skjære i ett materiale må skjæreverktøyet være hardere enn materialet som skal bearbeides. i tillegg til stor friksjon som skaper høye temperaturer stilles det store krav til skjæreverktøyet og derfor finnes det også et stort utvalg av skjæreverktøy.

Tabell 4 Merking av dreiestål ¹⁵

Type skjærestål	Merking	Bruksområde
Hardmetall	CT	Vanligste stålet for dreieoperasjoner, finnes med og uten et tyynnsjiktet belegg som påvirker avsponing
Cermet	CC	Titanbasert hardmetallsort som ofte brukes når det kreves fine overflater
Keramikk	CB	Blir brukt når det kreves høye skjærehaastigheter og ikke ustabile forhold
Kubisk Bornitrid	CD	Brukes ved fin-dreieing av stål og herdet stål
Polykrystalin diamant		Brukes for fin og medium fine overflater for ikke-jern holdige materialer.

2.2.1 Dreiebenkens oppbygning og funksjon

For å forstå hvordan maskineringsfeil oppstår er det viktig å forstå hvordan dreiebenken fungerer og hvilke systemer den består av. Figur 1 viser hoveddelene på en manuell dreiebenk.

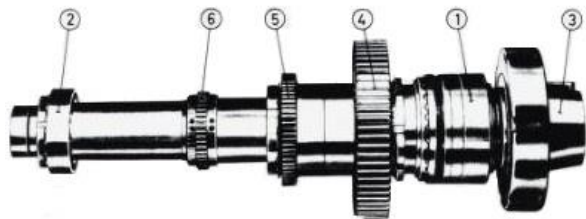


Figur 1 Hoveddelene på en dreiebenk ⁹

Spindeldokke og girkasse:

Spindelen eller dreiespindelen roterer arbeidsemnet. Konstruksjonen av spindelen varierer mellom produsenter men det er av stor betydning for bearbeidingsresultat at spindelen er balansert og stabil. For at spindelen skal kunne roteres med forskjellige omdreiningshastigheter benyttes det et girsystem. De vanligste girsystemene på manuelle dreiebenker er girboks med forskyvbare tannhjul, mekanisk turtallsvariator, trappereimskive, hydrauliske drivsystem eller elektriske drivsystem ³. Figur 2 viser et eksempel på en dreiespindel

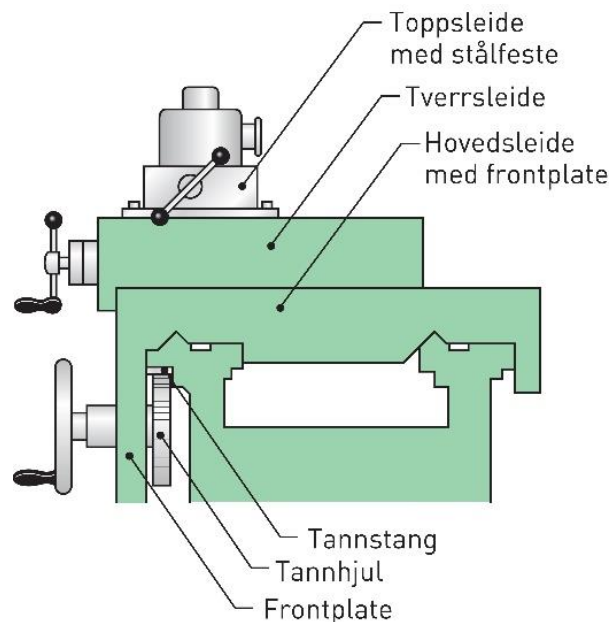
- 1 - Fremre spindellager
- 2 – Bakre spindellager
- 3 – Spindelnese
- 4 – Fast tannhjul for lave spindelurtall
- 5 – Fast tannhjul for høye spindelurtall
- 6 – Tannhjul for drift av matingsgirkassen



Figur 2 Eksempel på dreiespindel ³

Sleideføringer:

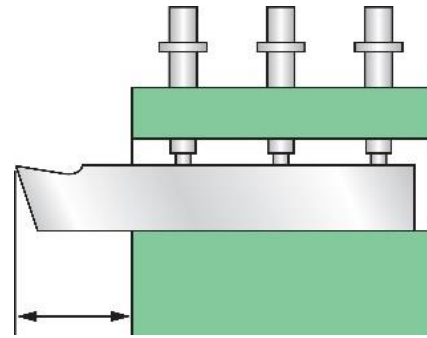
Det er tre typer sleideføringer på en dreiebenk. Toppssleide, tverrsleide og hovedsleide. Retningene disse kan føres kalles materetning. Hovedsleiden kan beveges i z-retning, parallelt med arbeidsstykket, og tverrsleiden kan beveges i x-retning normalt på arbeidsstykket. En manuell dreiebenk benytter vanligvis to akser, men toppsleiden kan roteres 360° rundt og dermed kan f.eks. konuser dreies. Hver sleide har et håndratt for å bevege sleidene, ved eldre dreiebenker vil det ofte forekomme en dødgang som må tas hensyn til ved maskineringen.



Figur 3 Sleideføringer på en manuell dreiebenk ⁹

Verktøyholder

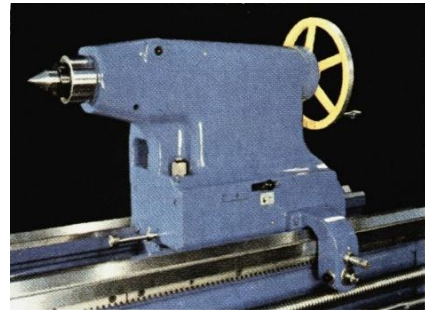
Verktøyholderen er plassert på toppen av toppsleiden. Og festes normalt med to eller flere bolter. Overhenget fra enden av verktøyholderen til enden av dreiestålet kan være en av flere årsaker til vibrasjoner i dreieprosessen. Ved et stort overheng vil det også oppstå ett større moment i verktøyet.



Figur 4 Verktøyholder på en manuell dreiebenk⁹

Bakdokka

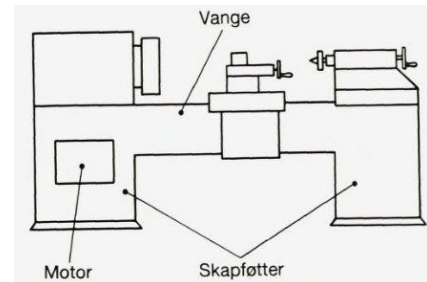
Bakdokka kan brukes til flere operasjoner, men hovedhensikten er å støtte opp lange og/eller tynne arbeidsemner og sentrere disse. I tillegg kan den brukes til bore- og innvendig gjenge operasjoner. Bakdokka kan side-forskyves for å dreie konuser.



Figur 5 Eksempel på bakdokke⁴

Maskinstativ med vanger

Maskinstativet er selve fundamentet for dreiebenken og skrues fast i gulvet ved to skapføtter. Skapføttene kan absorbere energi fra andre maskiner i verkstedet, dette kan være en årsak til at vibrasjoner oppstår under bruk av dreiebenken.



Figur 6 Maskinstativ med vanger⁴

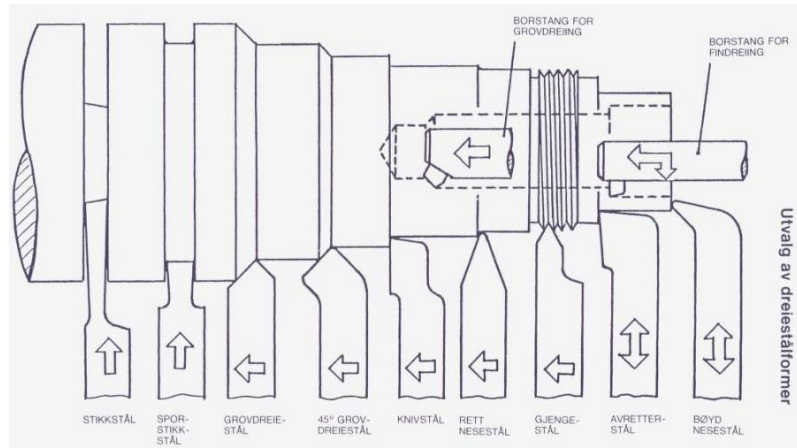
2.2.2 Skjærets form og neseradie

Neseradie:

Neseradius er betegnelsen på radiusen på den ytterste delen av dreiestålet som er i inngrep med arbeidsemnet. Neseradiusen har betydning for overflateruheten ved dreining ved at forskjellige radiuser har innvirkning på sponaviklingen.

Skjærets form og bruksområde:

Det benyttes forskjellige utforming på verktøyet for forskjellige type dreieing og hvordan overflate, som er ønskelig. Figur 7 viser et utvalg av dreiestålformer og navnene på de.



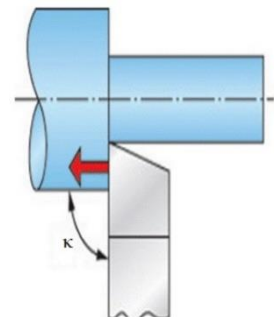
Figur 7 Utvalg av dreiestål³

Definisjon av vinkler på dreiestål:

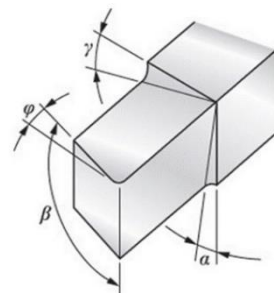
Vinklene på dreiestålet har betydning for sponbrytningen, overflateruheten og effektiviteten ved dreieoperasjoner, vinklene er navngitt under etter greske bokstaver:

Tabell 5 vinkler på dreiestål

α	Frivinkel, gjør at stålet kan skjære i materialet
γ	Vinkler på dreiestål ⁹ sponvinkel er en viktig vinkel som har betydning for sponformen, denne vinkelen er avhengig av hardheten til materialet
β	Eggvinkel, er et resultat av størrelsen på sponvinkel og frivinkel. En stor eggvinkel vil gi større styrke på skjæreeggen.
κ	Innstillingsvinkelen. skjæretrykket vil virke normalt på dreiestålet
φ	Endeclaringsvinkel, gir en klaring til arbeidsstykket for å redusere friksjon.
ϵ :	Spissvinkel, resulterende vinkel avhengig av innstillingsvinkel og endeclaringsvinkel
λ :	Helningsvinkel
α_E :	Endeclaringsvinkel



Figur 9 Vinkler på dreiestål⁹



Figur 8 Vinkler på dreiestål⁹

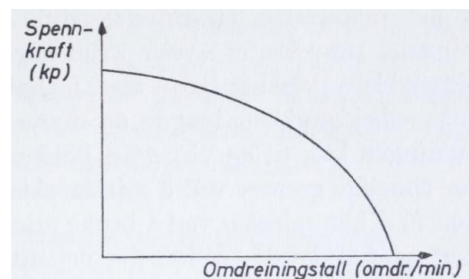
2.2.3 Skjæredata ved dreining

Skjæredata ved dreining sammen med valg av skjæreverktøy og vinkler på dreiestål er de viktigste parameterne for å oppnå ønsket kvalitet og ruhet på overflaten. Skjæredata brukes som en felles betegnelse på omdreiningstall, matingshastighet, kuttdybde og skjærehastighet. Omdreiningstallet beskriver rotasjons hastigheten til spindelen, matehastigheten beskriver dreiestålets forflytning i x eller z retning i forhold til omdreiningstallet og kuttdybde angir hvor stort inngrepet er i arbeidsemnet, for hvert kutt angis halve diameteren til arbeidsemnet dvs. en kuttdybde på 1 mm fører til en reduksjon på 2 mm for diameteren. Skjærehastigheten er et resultat av omdreiningstallet og diameteren på arbeidsemnet som sammen beskriver det antall meter spon som passerer dreiestålet pr. minutt.⁹ Skjærehastigheten er gitt av formelen

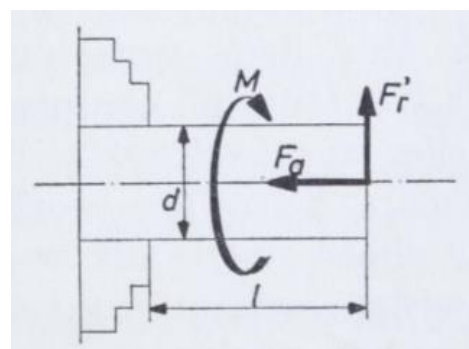
$$V_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad (1)$$

2.2.4 Oppspenning av arbeidsemnet, utforming og stabilitet

Riktig oppspenning er viktig for å få et godt resultat ved dreining, det er flere måter å spenne opp arbeidsemnet på. oppspenning i chuck med fri ende, oppspenning i chuck med bakdøkke og senterspiss. Oppspenning i bakskive eller planskive. Oppspenningen er viktig for dreieprosessen med tanke på stabiliteten i prosessen. Stabiliteten går ut på å motstå bearbeidingskreftene som opptrer ved dreining uten at det oppstår vibrasjoner i systemet eller glidninger i oppspenningen. Bakkene i chucken klemmer arbeidsemnet fast med en spennkraft. Når spindelen roterer vil bakkene oppleve en sentripetalakselerasjon som vil redusere spennkraften på arbeidsemnet⁵. Arbeidsemnet vil oppleve krefter når skjæreverktøyet er i inngrep. Disse kan deles i en aksial komponent F_a som virker inn mot chucken. Og en komponent F_r som virker normalt på arbeidsemnet.



Figur 11 Reduksjon av spennkraft ved økende omdreiningstall⁵



Figur 10 Bearbeidingskrefter på arbeidsemnet ved dreining⁵

Ett torsjonsmoment M vil oppstå når skjæreverktøyet er i inngrep. Utbøyingen til arbeidsemnet på grunn av bearbeidingskreftene kan beregnes ved formelen:

$$y = \frac{64 \cdot F_r \cdot l^3}{3 \cdot \pi \cdot E \cdot d^4} \quad (2)$$

2.2.5 CNC maskiner og G-koder



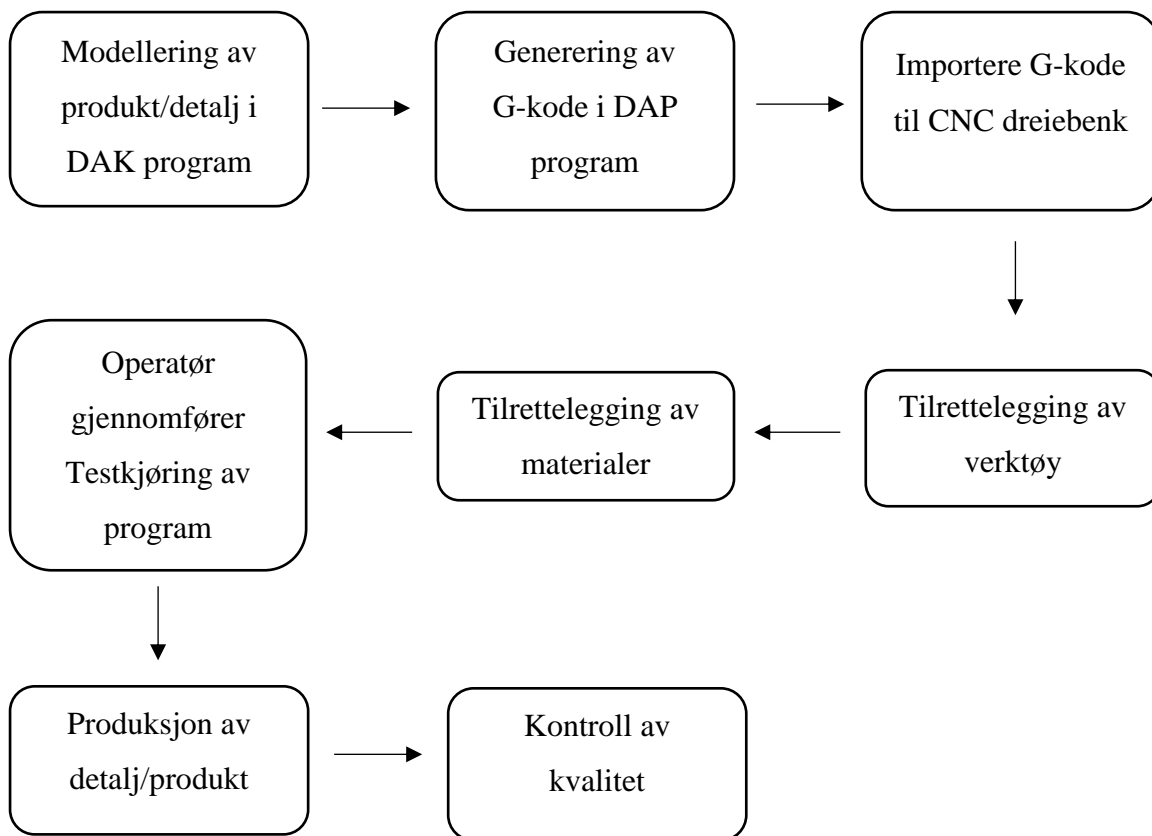
Figur 12 CNC maskinen ved NMBUs verksted

CNC dreiebenken har bidratt til en økt automatisering i verkstedindustrien og derav økt produktivitet. Den bygger på samme prinsipp som den manuelle dreiebenken. Men er mer avansert ved at den benytter numerisk kontroll for å styre maskinen. De første maskinene benyttet numerisk kontroll og ble kalt Numerical Control (NC) maskiner og ble framstilt i USA på bakgrunn av økt krav til nøyaktighet og overflatefinhet, den første NC styrte maskinen var en fresemaskin, men senere ble det utviklet også for dreiebenken. Senere ble de første maskinen med innebygget mikroprosessor i styresystemet utviklet som gjorde det mulig å gjøre endringer i ett program og automatisk foreta målinger og justeringer av skjæreparametere og verktøydata, disse ble kalt for CNC styrte maskiner. Og resulterte i at den menneskelige arbeidsinnsatsen ble begrenset til programmering, innstilling, overvåking, vedlikehold og reparasjoner i prosessen

CNC dreiebenken har samme praktiske funksjon som en manuell dreiebenk, forskjellen ligger i styringen av prosessen. Prosessen blir styrt av en kode definert på forhånd av dreieoperasjonen kalt G-kode, G-koder er et programmeringsspråk som benyttes ved numerisk kontroll og beskriver alle skjæredata for maskinen i tillegg til verktøybane og start/stopp funksjoner av motorer.

I et program for Datamaskinassistert konstruksjon (DAK) kan man tegne og målsette detaljer for produksjon. Disse tegningene kan importeres til et program Datamaskinassistert Produksjon (DAP) for å generere G-koder til dreiebenken.

Prosessen ved utarbeidelse av en detalj eller et produkt i en CNC dreiebenk kan beskrives på følgende måte:



2.3 Overflatefeil ved dreining

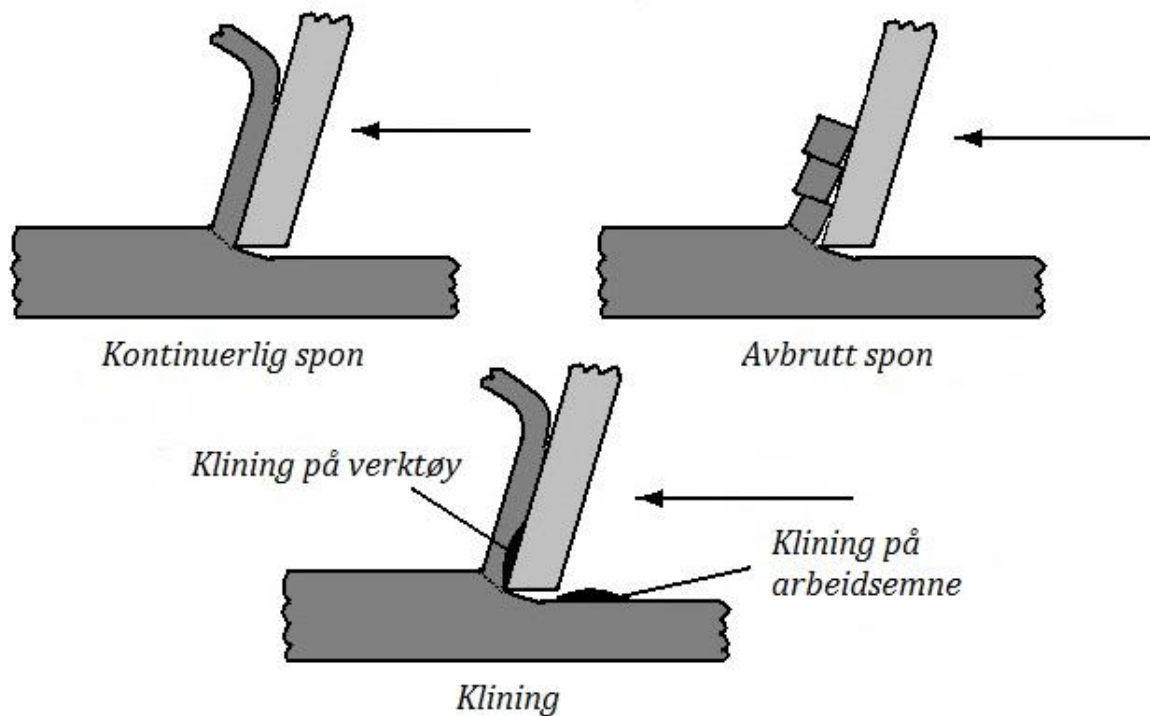
2.3.1 Klining

Klining kan forekomme ved sponfraskillende bearbeiding, dette skjer ved at sponene blir så varme ved friksjon at de fester seg til den maskinerte overflaten. Figur 13 viser et eksempel hvor dreining foregikk med feil skjæredata som resulterte i stor friksjon i kuttet og spon klinede seg fast til overflaten. Klining var ett tema det på forhånd av oppgaven var knyttet stor usikkerhet rundt. Etter å ha gjennomført diskusjoner med fagpersoner innen maskinering, ble det antydnet flere grunner til at maskineringsfeilen kunne oppstå, men det var variasjon i hvilke faktorer som påvirket mest. Fra litteraturen har det vært forsket mest på klining og innvirkningen på verktøy slitasje. Det har ikke blitt funnet tidligere litteratur angående effekten av klining på utmattingslevetiden til maskinerte produkter.



Figur 13 Klining på en maskinert overflate

Figur 14 på neste side viser klining som et resultat av at spon bygger opp et lag på skjæreeggen til dreiestålet. Det vil forekomme ved en kontinuerlige spondannelse prosess hvor sponet kliner seg fast til skjæreverktøyet på grunn av høye lokale temperaturer, generert av høyt verktøy trykk og derav stor friksjon i kuttet mellom skjæreegg og arbeidsemnet. Det vil i løpet av kuttet legge seg flere spon lag oppå hverandre. Dette er en ustabil prosess, som vil si at den ikke er kontrollerbar når den forekommer. Materialet som har klinede seg fast til verktøyet vil etterhvert som det blir ett større lag begynne å sprekke opp og enten fraktes vekk sammen med sponet eller kline seg fast til overflaten på arbeidsemnet, som vil resultere i en grovere overflateruhet.²



Figur 14 Klining ved lagvis oppbygging av spon ²

2.3.2 Sperring

Sperring skjer på grunn av vibrasjoner i dreibenk – verktøy systemet. Figur 15 viser et eksempel hvor sperring har forekommet under maskineringen av komponenten.



Figur 15 Sperring på en dreid overflate

Sperring er et norsk begrep brukt i maskineringsmiljøet for en tilstand som oppstår ved vibrasjoner i maskineringsprosessen. Fordi dreiebenk systemet består av flere elastiske komponenter, bevegelige og roterende, vil komponentene respondere til eksterne og interne krefter og vibrasjoner kan oppstå. Det har en rekke negative effekter ved maskinering blant annet dårligere overflateruhet, unødvendig slitasje på verktøy og maskinelementer i dreiebenkssystemet som indirekte kan føre til en dårligere overflateruhet, eller bidra til uønsket temperaturøkning i kuttsonen. Sperring ble først identifisert som en begrensende faktor ved sponfraskillende bearbeiding av Taylor ¹⁶. Det er et komplekst problem fordi dreiebenken består av flere systemer der ulike parametere kan påvirke flere av systemene

samtidig. Det har derfor blitt gjennomført mange studier rundt temaet, hvor det har vært mest fokus på verktøyslitasje. Ennå er deler av temaet ikke fullt ut forstått. M. Siddhpura m.fl.¹⁴ Har gjennomført et grundig studium for å kartlegge tidligere forskning vedrørende vibrasjoner ved dreie prosessen. Der vibrasjoner generelt blir delt inn i tre kategorier

Frie vibrasjoner:

Oppstår ved støt, f.eks. ved feil definert verktøybane, verktøyet kolliderer med arbeidsemnet, dette er et problem som de fleste nye CNC maskiner vil oppdage på forhånd ved simulering maskineringsforløpet i DAP programmet.

Påtvungne vibrasjoner:

Kan oppstå på bakgrunn av ubalanse i maskinelementer i dreiebenken ved f.eks. slitte eller ubalanserte lager, ubalanse i gir, spindeldokke etc.

Egenfrekvens vibrasjoner

Egenfrekvens vibrasjoner er de mest skadelige vibrasjonene for overflateruheten til den maskinerte overflaten og verktøystålet, på grunn av den ustabile oppførselen som resulterer i store relative forskyvninger mellom verktøyet og arbeidsemnet. Sperring på grunn av egenfrekvens deles generelt inn i to underkategorier, primær og sekundær. Hvor primær er forårsaket av friksjon mellom skjæreverktøy og arbeidsemene eller av thermo mekaniske effekter. Sekundær sperring oppstår ved at en bølgete overflate blir regenerert ved nye kutt. Overflaten vil forverres ytterligere ved flere nye kutt. Det har blitt fokusert mest på regenerativ chatter i dreieprosessen, regenerativ chatter opptrer ved interaksjonen mellom avspinningsprosessen og maskin-verktøy oppsettet. Der den mest dominante modusen bestemmer frekvensen. Eksitasjonen av denne modusen skaper en relativ bevegelse mellom verktøystålet og arbeidsstykket og forverres ved at verktøystålet kutter over en tidligere avspontet overflate eller allerede bølgete overflate.¹⁷

2.3.3 Andre typer av maskineringsfeil

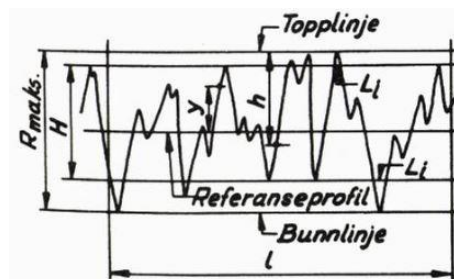
Det finnes flere typer maskineringsfeil, men det er klining og sperring som har vært fokuset i denne oppgaven. Det vil bemerkes at håndteringen etter produksjon av maskinerte detaljer/produkter, er vel så viktig. Ved ugunstig lagring av ferdige serier kan f.eks korrosjon oppstå. I tillegg kan skader på overflaten oppstå ved transport dersom lasten ikke er tilstrekkelig sikret.

2.4 Overflateruhet

2.4.1 Overflateruhet generelt

På bakgrunn av behov for forskjellig ruhet til forskjellig bruk er det blitt utviklet en standard for overflateruhet, dette er angitt i aktuell standard NS-EN ISO 1302;2002. Overflateruhet er betegnelsen på hvor grov eller fin overflaten til en gjenstand er. Det skilles mellom geometrisk ideell overflate, virkelig overflate og gjengitt overflate. Der den geometriske ideelle overflaten kan tenkes som et perfekt legeme uten ruhet. Virkelig overflate er den faktiske overflaten til arbeidsemnet. Gjengitt overflate er den overflateruheten som er målbar ut ifra valgt målenøyaktighet. Målenheten brukt i denne oppgaven er R_a , midlere profilhøyde. R_a defineres som integralet av tallverdien til toppene i topografien til en referanseprofil til overflaten over hele lengden til arbeidsemnet. ⁶

$$R_a = \int_0^l |y| dx \quad (3)$$

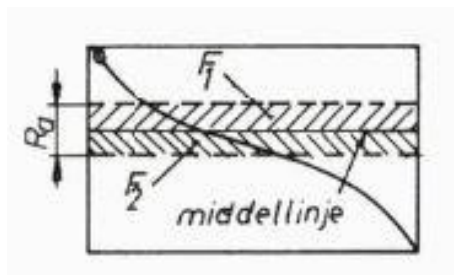


Figur 16 Overflateruhet R_a ⁶

definerer $|y|dx$ som ett flate element, R_a vil da kunne defineres som.

$$R_a = F_1 + F_2 \quad (4)$$

Hvor F_1 er arealet over middellinjen og F_2 er arealet under middellinjen.



Figur 17 Overflateruhet R_a ⁶

2.4.2 Overflateruhet og dreining

Ved overflateruhet og dreieoperasjoner menes ruheten som oppstår i aksial retning, matingsretningen. Denne ruheten vil være sammensatt av en grunnprofil og overlagrede ujevnheter. Grunnprofilen er bestemt av verktøyets geometri og matingen s . ved hjelp av Pytagoras setning hvor man betrakter et verktøy i inngrep, kan man beregne teoretisk overflateruhet ⁵

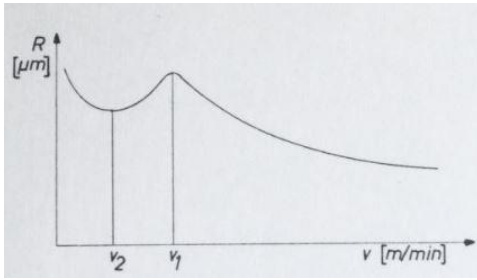
$$R_{teoretisk} = \frac{s^2}{8 \cdot r} \quad (5)$$

$$s = \text{mating}$$

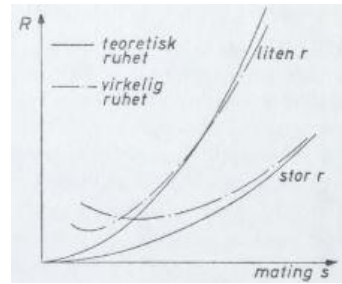
$$r = \text{nese radius}$$

Formelen har vist seg å være tilnærmet riktig for små nese radiuser og store matehastigheter. For større nese radiuser og lavere matehastigheter vil den teoretiske ruhetsverdien gradvis avvike med faktisk ruhet for overflaten, dette er på grunn av spondannelsesforløpet.

Spondannelsesforløpet krever en spontykkelse som er større enn en viss minste verdi. Blir spontykkelsen mindre enn denne verdien vil ikke spon fjernes og resultatet blir at det skapes ett trykk mellom skjæreverktøyet og arbeidsemnet. Dette vil medføre at enten arbeidsemnet eller verktøyet vil «fjære» unna og sperring eller klining kan oppstå. Slitasje på skjæreverktøyet vil også føre til at virkelig ruhet blir grovere enn en teoretisk antatt ruhet. I tillegg kan overflaten på arbeidsemnet komprimeres i ett tynt lag slik at overflaten blir hardere enn grunnmaterialet. Ved store skjærehastigheter og varmeherdende materialer kan avkjølingshastigheten, spesielt når det brukes kjølevæske bli så stor at overflatesjiktet herdes. De punktene på skjæreeggen som må skjære bort disse harde sjiktene slites mye raskere enn resten av skjæreeggen. Dette vil gi et direkte uttrykk i en økning av overflateruhet, der det vil vokse fram et rille mønster på fasen med en avstand lik matingen s . Dette er en av grunnene til at en avrunding er å foretrekke på skjæreeggen. vanligvis bør verdien på nese radiusen ikke overskride $r = 1,0 - 1,2$ mm. En nedre grense for matingen kan settes til $0,08 - 0,10$ mm/omdr. ⁵.



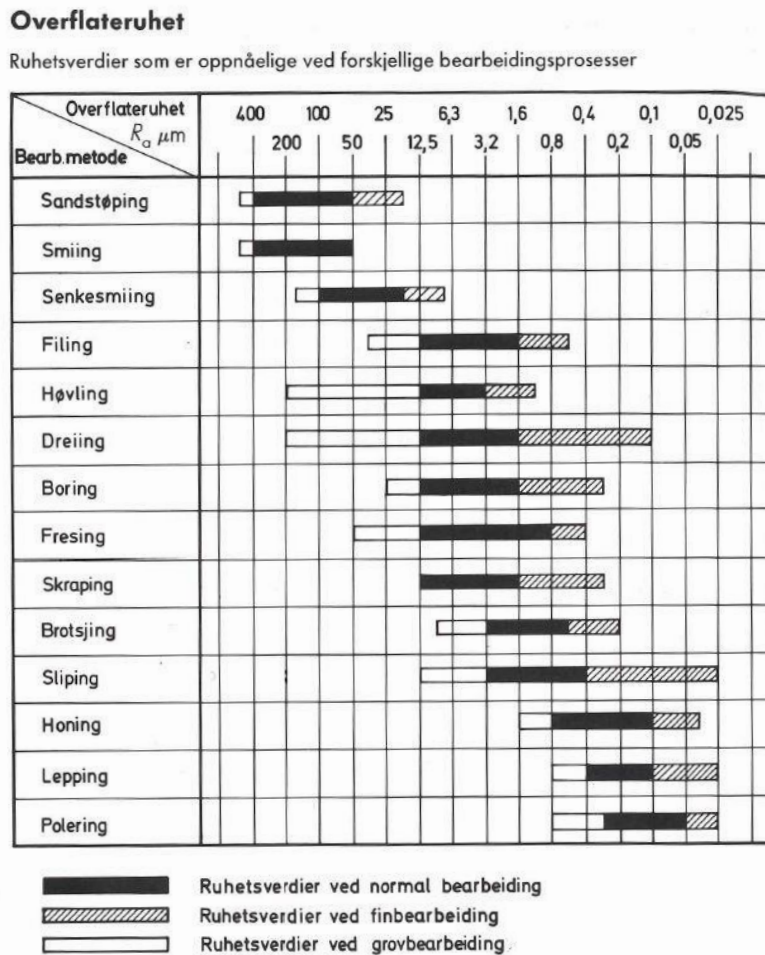
Figur 18 Overflateruhet som funksjon av skjærehastigheten⁵



Figur 19 Overflateruhet som funksjon av matinghastigheten⁵

2.4.3 Tabell for overflateruhet for bearbeidingsprosesser

Figur 20 viser ruhetsverdier som er oppnåelige ved forskjellige bearbeidingsprosesser. For dreining defineres grovdreining for overflater mellom 200 - 12,5 μm , normal bearbeiding 12,5 - 1,6 μm og findreining 1,6 - 0,1 μm

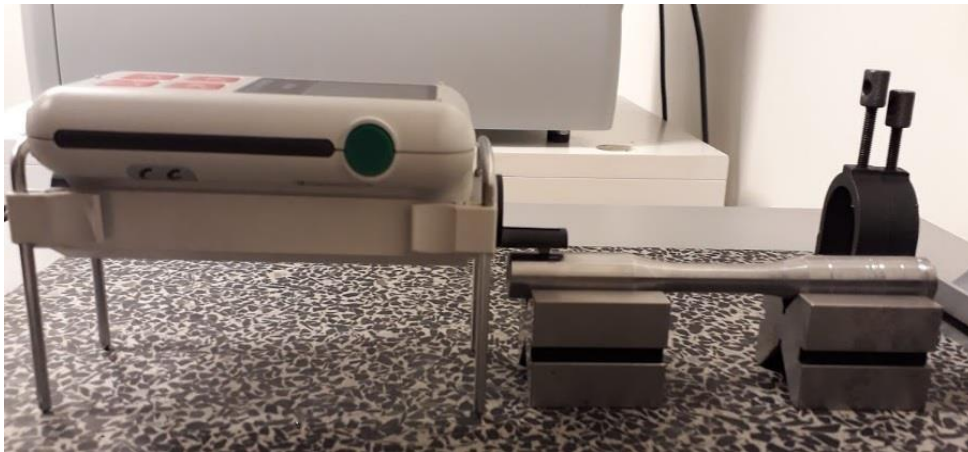


Figur 20 Mulig overflateruhet ved forskjellige bearbeidingsprosesser⁷

2.4.4 Måleutstyr

Det benyttes to metoder for å måle ruhet på overflater. En overflatenormal som inneholder fysiske eksempler på forskjellige ruheter, ruheten bestemmes ved å dra neglen langs overflaten til arbeidsstykket og deretter på overflatenormalen for å bestemme hvilket eksempel som passer best. Denne metoden vil ha en usikkerhet ved seg, den menneskelige faktoren ved at to personer kan måle forskjellig resultat for samme overflate.

En elektronisk ruhetsmåler vil være mer nøyaktig for å bestemme ruheten på overflaten. Det finnes to hovedtyper av elektroniske ruhetsmålere, slepenålsbasert og optisk. ¹⁸



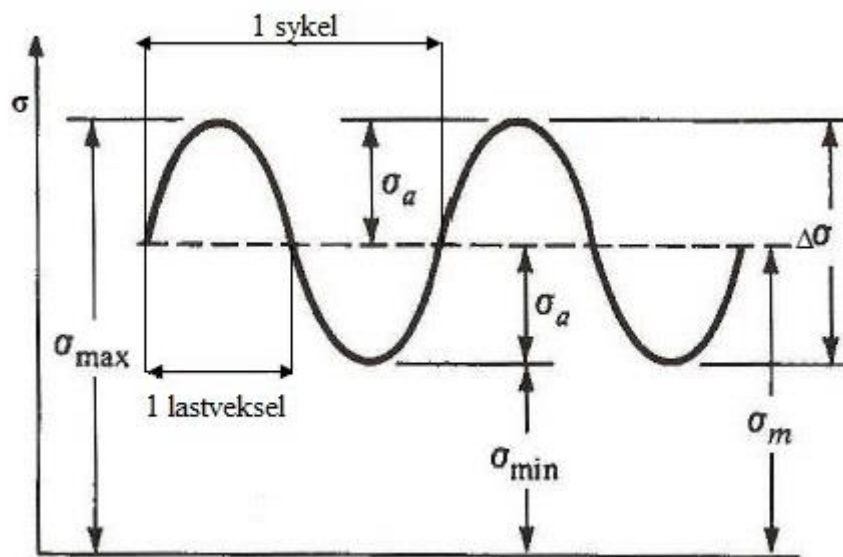
Figur 21 Slepenålsbasert ruhetsmåler

3. Utmatting

Utmatting er et bredt tema med flere metoder for å estimere utmattingssegenskaper. I dette kapittelet vil det bli presentert teori om utmatting og hvilke faktorer som påvirker utmattingssegenskapene i tillegg til en metode for å estimere utmattingsgrenser og SN kurver for en komponent.

3.1 Generelt om utmatting

Utmatting opptrer i materialer som opplever en periodisk varierende spenning som er mindre enn materialets strekkfasthet men større enn utmattingsgrensen for materialet. Utmattings er hovedårsaken til brudd i materialer og kan få fatale konsekvenser. I nyere tid kan det nevnes helikopter ulykken ved Turøy i 2016 hvor 13 personer mistet livet da et planetgir ble utsatt for utmatting og resulterte i brudd¹⁹. Begrepet oppstod som nevnt i kapittel 1.1 rundt 1850 tallet da det ble oppdaget utmattingsbrudd på sporvognaksler. Begrepet ble brukt for tilfeller der svikt oppstod på grunn av periodisk vekslende belastninger. August Wöhler har blitt ansett som den første til å systematisk gjennomføre forsøk på utmattingsbrudd. Han tok i bruk grafer som viste sammenhengen mellom spenning og levetid for å vise hvordan levetiden minsket ved høyere spenning, disse diagrammene ble kalt Wöhlerdiagrammer og SN diagrammer. Senere har flere forsket på temaet, blant annet Basquin som foreslo at SN kurvene for metaller kunne representeres som en rett linje i et dobbelt logaritmisk diagram i regionen for endelig levetid mellom $10^3 - 10^6$ sykler. Figur 22 viser definisjoner som ofte blir brukt ved utmattingsberegninger og testing.



Figur 22 Definisjoner av spenninger og sykler¹

Der de algebraiske sammenhengene er.

$$\text{Amplitudespenning: } \sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{\sigma_{maks} - \sigma_{min}}{2} \quad (6)$$

$$\text{Middelspenning } \sigma_m = \frac{\sigma_{maks} + \sigma_{min}}{2} \quad (7)$$

Ved utmattingstesting benyttes ofte R verdier for å beskrive spenningsforholdet.

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{maks}} \quad (8)$$

Amplitudeforholdet beskrives som

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} \quad (9)$$

Basquin har forslått at SN kurven kan representeres ved en rett linje i ett dobbel logaritmisk diagram. Amplitudespenningen kan dermed representeres et dobbellogaritmisk SN diagram med formelen.

$$\sigma_a = A \cdot N^B \quad (10)$$

Basquin's ligning og modifiseringer av denne blir fortsatt brukt i dag for å estimere SN kurver, men en mer foretrukket metode er å gjennomføre utmattingstester for belastningssituasjonen og materialet man er interessert i. Det finnes standarder for gjennomføringen av utmattingstester, for roterende bøyemoment gjelder ISO 1143:2010. Disse testresultatene kan statistisk analyseres for å bestemme en utmattingsgrense og SN kurver kan bli definert på bakgrunn av testingen.¹⁰.

3.2 Sprekkinitiering og sprekkvekst

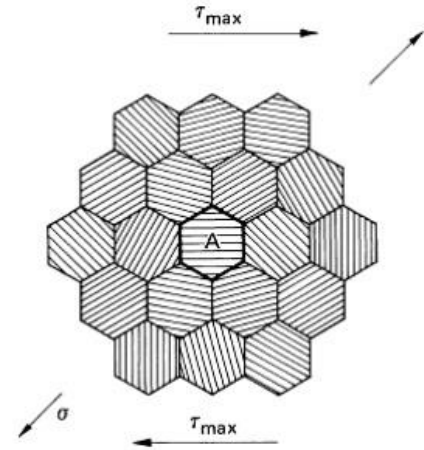
Utviklingen av et utmattingsbrudd kan deles inn i tre stadier. Sprekkinitiering, sprekkvekst og restbrudd. Sprekkinitiering er tiden frem til en sprekk oppstår på grunn av en periodisk varierende spenning. Ved defekter i materialet dannet under produksjon som sprekker, kjerver, høye spenningskonsentrasjoner etc. vil en sprekk ofte initieres fra disse. Initieringstiden blir da sterkt redusert eller faller bort dersom en sprekk allerede eksisterer. Sprekker kan også initieres uten at defekter er tilstede på overflaten. For polerte prøvestaver uten synlige defekter på overflaten vil det ta lenger tid før en sprekk initieres, men ved stor

nok spenning og nok svingninger vil mikrosprekker initieres og vokse under påvirkning av skjærspenningene som opptrer. Totalt antall syklere frem til utmattingsbrudd kan beskrives som:

$$N = N_i + N_s \quad (11)$$

Der N_i er antall syklere frem til en sprekk oppstår og N_s er det antall syklere sprekken vokser før et brudd oppstår. Antall omdreininger til brudd og utmattingslevetid brukes om hverandre i litteraturen, for ingeniører kan en faktisk tid til utmattingsbrudd ved en kjent lastfrekvens regnes ut ved Miner Palmgrens delskadehypotese, denne vil ikke bli beskrevet i denne oppgaven.

Metaller består av kornstrukturer som er bygd opp av krystallkorn med forskjellig orientering.

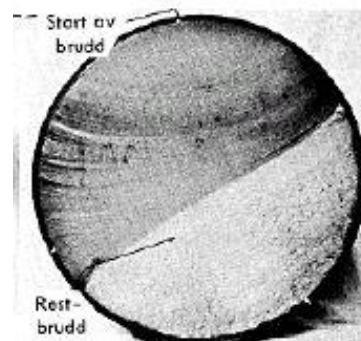


Mikrosprekker kan initieres ved syklisk belastning ved at skjærspenningen vil virke 45° på normalspenningen dette vil påvirke glidelagene. I figur 23 ligger glidelagene for krystall A parallelt med skjærspenningen. Glidelagene i krystall A vil ved hver lastsykel bevege seg litt og påvirke de omkringliggende kornene. Krystallene rundt vil oppleve en elastisk deformasjon.⁸ Ved nok lastsykler vil atomplanglidningen resultere i ekstrusjoner og intrusjoner, disse fungerer som initiering for en mikrosprekk. Etter hvert som sprekken blir større vil den fungere som en spenningskonsentrasjon og fortsette å vokse normalt på største normalspenningen, og bre seg i konsentrisk sirkler frem til et restbrudd vil oppstå på grunn av statisk overbelastning¹.

Figur 23 Glidelag i krystallkorn⁸



Figur 24 Striasjoner og restbrudd av en prøvestav



Figur 25 Striasjoner og restbrudd⁸

3.3 Reduseringsfaktorer for estimering av utmattingslevetid

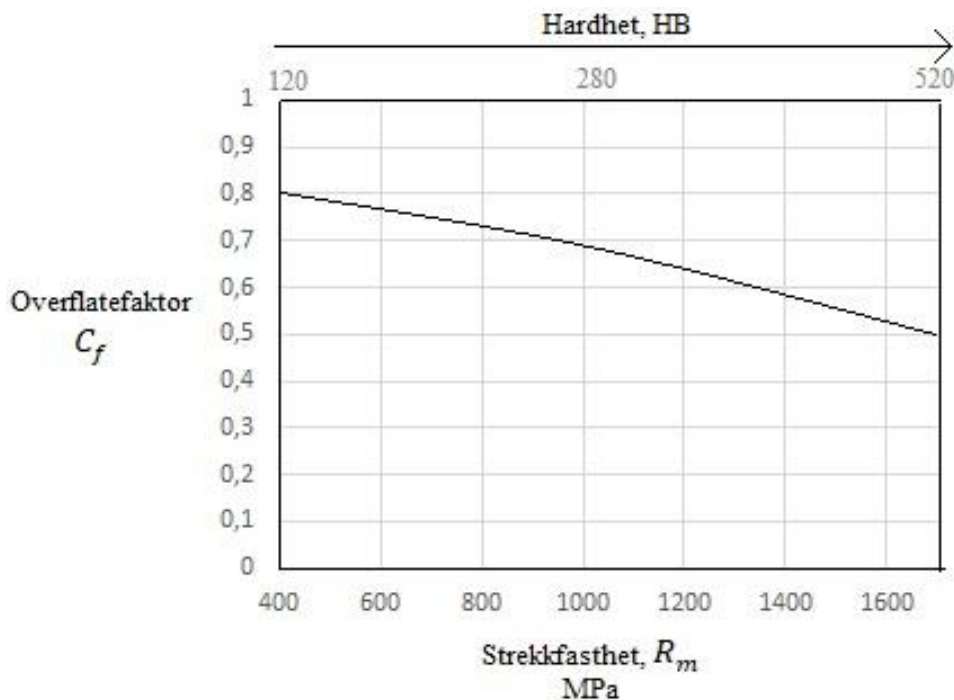
Det er flere faktorer som reduserer den estimerte utmattingsfastheten, under følger en beskrivelse av dem.

Overflatefaktor C_f

Ved maskinering har overflatefaktoren en stor innvirkning på utmattingslevetiden. Overflatefaktoren tar hensyn til ruheten på overflaten til materialet. som nevnt i kapittel 3.2 vil små mikroskopiske sprekker på overflaten fungere som sprekkiniteringssteder, Derfor vil ruheten på materialet ha en stor innvirkning på sprekkiniteringstiden¹⁰. Overflatefaktoren har en sammenheng med strekkfastheten til materialet og overflateruheten.¹

$$C_f = 1 - 0,22(\log Ra)^{0,64} \cdot \log R_m + 0,45(\log Ra)^{0,53} \quad (12)$$

R. Stevens et.al presenterte at overflatefaktoren ved maskinering ville bli redusert med en faktor på mellom 0,5 – 0,8.



Figur 26 Sammenheng mellom økning av strekkfasthet, overflatefaktor og hardhet

Størrelsesfaktoren C_s

Utmattningstester har vist at utmattingsfastheten blir redusert ved prøvestaver med større diameter. Årsaken er at sannsynligheten for et svakt punkt øker med større materialvolum. Større dimensjoner har ofte en mer ugunstig materialstruktur med større risiko for indre spenninger. For roterende bøyning vil spenningsgradienten også spille en rolle.

Størrelsesfaktoren for utmattingsfasthet kan representeres ved ¹:

$$C_s = \left(\frac{t_o}{t}\right)^n \quad (13)$$

Der

$$n = 0,10 + 0,15 \cdot \log K_t \quad (14)$$

Hvor t_o er en referanse tykkelse satt til $d = 10$ mm. Og n er en faktor som tar hensyn til en evt. spenningskonsentrasjon. For materialer uten sveis og spenningskonsentrasjoner benyttes $n = 0,20$.

Lastfaktoren C_l :

Utmattingssegenskaper er ikke konstante og er derfor ikke like for forskjellige belastningssituasjoner forholdet mellom strekk/trykk og roterende bøyning er mellom 0,77 – 0,9.

Kjerv faktoren K_f :

Ved kjerver vil det på grunn av kjervens geometri oppstå en spenningskonsentrasjon som er høyere enn nominell spenning, den største spenningsvidden ved kjerven blir definert som geometrisk spenningsvidde $\Delta\sigma_G$. Spenningskonsentrasjonsfaktoren K_t angir forholdet mellom maksimalspenning i kjerven og den nominelle spenningen. Selv om en sprekkinitiering raskere kan oppstå ved kjerver behøver ikke sprekkveksten korrelatere med spenningsintensitetsfaktoren derfor blir det beregnet en egen kjervfaktor relatert til reduisering av utmattingsfastheten.

Kjervfaktoren kan beregnes ved å teste forskjeller på en kjervet og en ukjervet prøvestav eller estimeres ved formelen:

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) \quad (15)$$

Hvor:

$$q = \frac{1}{1 + \frac{a}{r}} \quad (16)$$

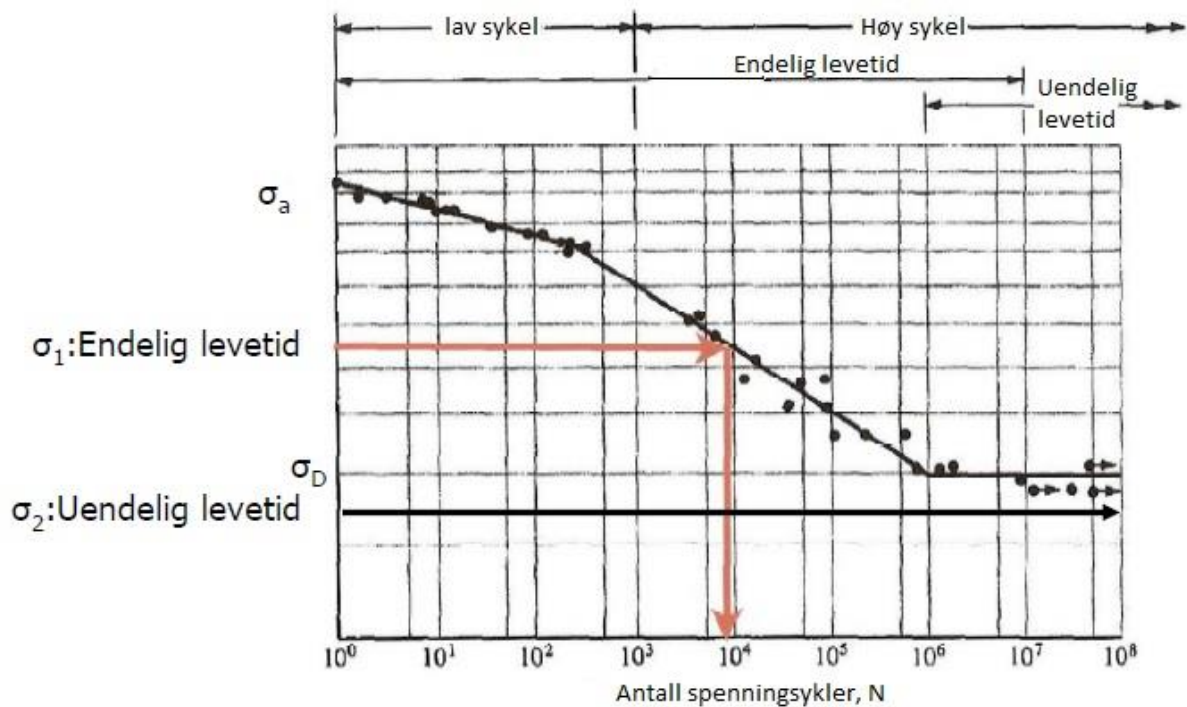
$$a = 0,0254 \left(\frac{2070}{R_m} \right)^{1,8} \quad (17)$$

Miljø og egenspenningsfaktoren C_e :

Flere faktorer kan påvirke utmattingsfastheten, blant annet temperaturen og egenspenninger/restspenninger som kan redusere eller styrke utmattingsfastheten. Under gjennomføring av utmattningstesting kan det ved høy frekvens oppnås en temperaturøkning som reduserer utmattingssegenskapen under gjennomføringen av selve testen. Ved maskinering generelt kan det oppstå restspenninger i overflatelaget, på grunn av mekaniske, termiske eller kjemiske prosesser ¹⁰. Det behøver ikke være negativt dersom trykkspenninger oppstår, fordi de vil motvirke sprekkveksten, men strekkspenninger vil føre til en lavere utmattingslevetid ved at sprekkveksttiden reduseres.

3.4 S-N metoden

Spenning levetid metoden benyttes for høysykel utmatting som dekker lastsykler som ligger over ca 10^4 sykler. Ved testing av utmattingslevetiden til flere prøvestaver kan resultatene plottes inn i S-N diagrammet og det kan trekkes en middellinje for å estimere utmattingsgrensen. Dette vil representere en 50 prosent sannsynlighet for at komponenten skal vare ett visst antall sykler for spenningen den opplever. Verdien der kurven flater ut ved 10^6 sykler kalles for utmattingsgrensen som er den høyeste spenningen komponenten kan oppleve uten at et brudd vil oppstå. Fra diagrammet kan man lese av hvor mange sykler en komponent vil tåle ved en gitt spenning.



Figur 27 SN diagram og definisjoner

3.5 Juvinalls metode for estimering av SN kurven

Det er mulig å estimere SN kurven på bakgrunn av utmattingsforholdet mellom utmattingsgrensen og strekkfastheten for et materiale. Utmattingsforholdet ligger i området 0,35 – 0,6, for materialer med strekkfasthet under 1400 MPa. Juvinalls metode for estimering av SN kurven går ut på at utmattingsgrensen ved 10^3 sykler kan estimeres ved.

$$\sigma_N = 0,9 \cdot R_m \quad (18)$$

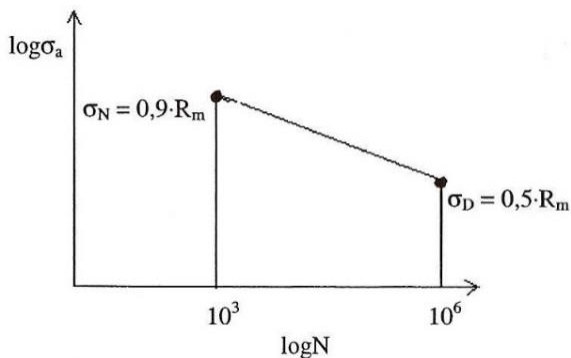
Og utmattingsgrensen ved 10^6 sykler kan estimeres ved.

$$\sigma_D = 0,5 \cdot R_m \quad (19)$$

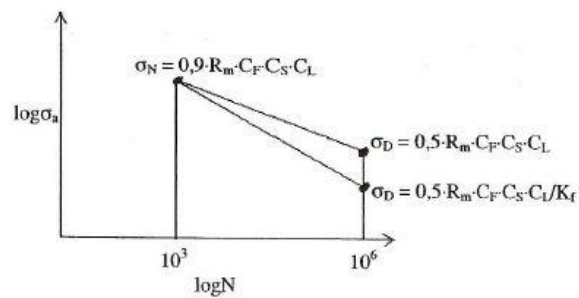
Betingelsen for estimeringen av utmattingsgrensen σ_D er at SN kurven representerer roterende bøyeutmatting for en prøvestav som er polert uten kjerver, diameteren er mindre eller lik 10 mm, strekkfastheten ligger under 1400 MPa og vil være 50 prosent sannsynlighet for overlevelse. For materialer som har andre egenskaper kan utmattingsfastheten reduseres ved å multiplisere faktorene nevnt i kapittel 3.3 hvor unntaket er kjervfaktoren som divideres.

$$\sigma_N = 0,9 \cdot R_m \cdot C_F \cdot C_S \cdot C_L \quad (20)$$

$$\sigma_D = 0,5 \cdot R_m \cdot C_F \cdot C_S \cdot \frac{C_L}{K_f} \quad (21)$$



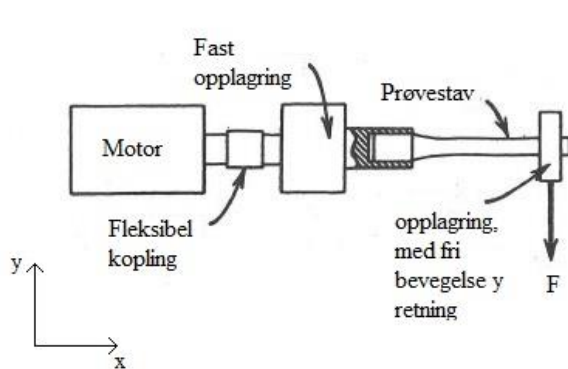
Figur 30 SN kurve estimert ved Juvinalls metode for en polert prøvestav



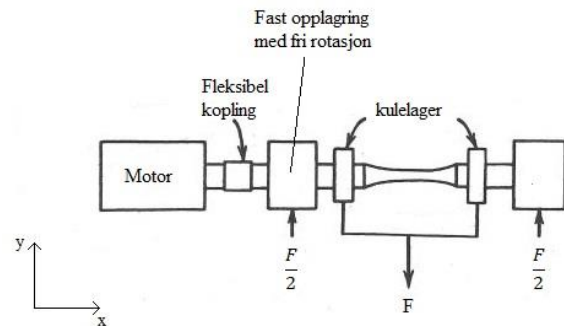
Figur 29 Estimering av SN kurven med modifieringsfaktorer¹

3.6 Testmaskiner og metoder

Det finnes flere testmaskiner for utmattings testing. Ved roterende bøyning med konstant spenningsamplitude er det to maskinoppsett som er vanlig å benytte. Testmaskin med prøvestav som uthengene last, produserer et ikke-uniformt fordelt bøyemoment langs akselen. Prinsippet går ut på at en prøvestav er montert i ett opplager som er koplet sammen med en motor som roterer prøvestaven, i den andre enden er prøvestaven opplagret med en last som påfører bøyemomentet.²⁰



Figur 31 Testmaskin for ikke uniformt fordelt moment

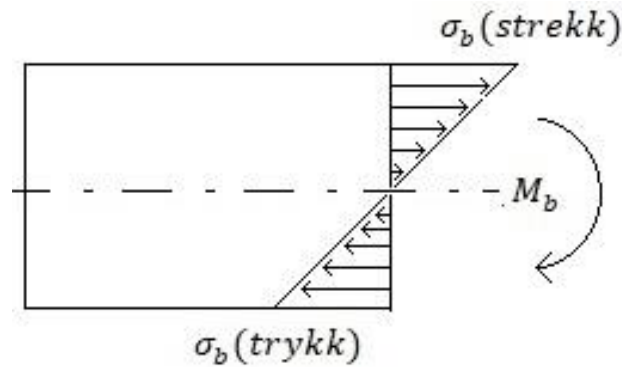


Figur 32 Testmaskin for uniformt fordelt moment

Testmaskin med fire opplagringer produserer et uniformt fordelt bøyemoment langs akselen der to like laster blir belastet på de to opplagrene nærmest senter av prøvestaven²⁰. Ved testing av utmattingsfasthet finnes det standarder for utføringen av utmattings tester. For roterende bøyning er dette beskrevet i ISO 1143:2010

Når en prøvestav utsettes for et moment vil det oppstå bøyespennning i prøvestaven. Bøyespenningen i prøvestaven som er tilstede ved et moment som påsatt er gitt av formelen for bøyespennning

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W_b} \quad (22)$$



Figur 33 Bøyespennning i prøvestaver

3.7 Utmattingsdata for stål S355J2 + M kvalitetene

Det har ikke vært mulig å oppdrive SN kurver eller utmattingsdata for materialet S355J2+M ved roterende bøyning som vil bli benyttet ved produksjon av prøvestavene. Utmattingsgrensen for stålet DIN st-52-3 som tilsvarer S355J2+N ved roterende bøyning har blitt oppgitt til $\sigma_D = 0 \pm 280$. Disse to materialene har en relativt lik kjemisk sammensetning og oppgitte verdier for strekkfasthet, men S355J2+M er antatt å ha en høyere utmattingsgrense enn dette fordi det er et mikrolegert finkornstål ¹⁰

4. Innvirkning av maskinering på utmattingssegenskaper ved maskinerte komponenter.

Ved litteraturstudiet har det kommet frem tidligere forskning på innvirkningen av maskinering på utmattingslevetid. Artiklene publisert har forskjellige tilnærming der noen fokuserer på utmattingslevetid, overflate integritet og restspenninger. Dette kapitlet er delt opp etter de forskjellige vinklinger selv om noen av temaene direkte eller indirekte har en innvirkning på hverandre

4.1 Skjæredata og påvirkning på overflateintegritet.

Mange av forskningsartiklene som er publisert ser på dreining av hardt stål som er definert for ett-punkts dreining av materialer med hardhet over 45 RC ²¹. Årsaken til dette antas å være fordi materialer med større hardhet på overflaten antas å bli mer påvirket av kjerver, og derav også overflateruheten. Overflateintegriteten defineres som de resulterende egenskapene ved en bearbeidet overflate og er av stor betydning både for de mekaniske egenskapene og utmattingsegenskapene for maskinerte produkter. Med overflateintegritet menes alle karakteristikker ved den bearbeidede overflaten som et resultat av at overflaten er blitt maskinert.²²

- Geometriske karakteristikker
 - Overflatens tekstur
 - Overflatens topograf
- Fysiske og kjemiske egenskaper
 - Krystallografi
 - Mikrohardhet
 - Restspenninger
 - Plastisk deformerte eller sprekker i nærheten av overflatelaget
 - Korrosjons bestandighet

Siden det er så mange karakteristikker som innvirker på overflateintegriteten kan den ha både negative og positive effekter på utmattingslevetiden for roterende bøyepåkjente aksler. Det har blitt publisert flere forskningsartikler om skjæredata ved maskinering og effekter på overflateintegriteten. Jacobsen m.fl. ²³ undersøkte effekten av skjærehastighet ved dreining på overflateintegriteten for herdet stål med bainittisk struktur. Det ble funnet at restspenningsprofilen konsistent ble den samme under en viss dybde fra overflatelaget etter

maskineringen og under denne dybden ble det ikke observert restspenninger som var generert ved det avsluttende kuttet. Den største trykkspenningen ble funnet 10µm under overflatelaget. Det ble konkludert med at skjærehastigheten hadde en stor innvirkning på overflateruheten hvor formelen for teoretisk overflateruhet nevnt i kap. 2.4.2 viste seg å stemme bra for den brukte nesoradiusen på skjærestålet. Analysen av mikrostrukturen viste lite eller ingen forandring på overflaten.

Y. Matsumoto m.fl.²⁴ undersøkte overflateintegriteten generert ved dreining av hardt stål. Ved en individuell test for bestemmelse av skjæredata under forsøket viste det seg at det kunne dannes en martensittisk struktur ved overflaten når et slitt dreieverktøy ble brukt, dybden på dette laget var mindre enn 3 µm. For de avsluttende kuttene ved resten av forsøket ble det benyttet nye dreiestål, det ble funnet at skjæregg-geometrien var den dominerende faktoren for å bestemme restspenningsprofilen, kuttdybden hadde lite eller ingen effekt på restspenninger som oppstod ved dreining av hardt stål. Matehastigheten endret kun restspenninger på overflaten men ikke dypere inn i materialet.

4.2 Skjæredata og effekter på utmattingslevetid.

Selv om overflateintegriteten og utmattingslevetid samsvarer med hverandre har det blitt publisert litteratur som forsøker å undersøke sammenhengen mellom skjæredata ved maskinering og utmattingsgrensen for forskjellige typer materialer. Mest forskning er gjennomført på metaller med høy strekkfasthet.

Karina S.S Lopez m.fl.¹¹ Undersøkte effekten av skjæredata ved maskinering på og effekten på utmattingsfastheten for stålet AISI 4140 som tilsvarer EN 42CrMo4 legering. Overflateruheten ble målt ved forskjellige verdier for kuttdybde, matehastighet og skjærehastighet. Det ble funnet at utmattingsgrensen som antatt ville synke ved økende overflateruhet, men et interessant funn var at skjæredataen påvirket utmattingsgrensen i mindre grad enn overflateruheten. Sammenhengen mellom restspenninger, fastning og overflateruhet ble antydning å spille en stor rolle for utmattingslevetiden. Det ble forsøkt spenningsgløding for å redusere restspenningen på overflaten, som ga en positiv effekt for prøvestaver med grovere overflateruhet. Men for polerte prøvestaver ble resultatet en lavere utmattingsgrense.

Vanjari m.fl.²⁵ undersøkte roterende utmattingslevetid utsatt for et konstant moment for stålet AISI 52100, som er et lavlegert martensittisk krom stål, det er ikke funnet en europeisk standard for materialet. Det ble konkludert med at utmattingslevetiden var lenger ved finere overflateruhet, det ble også her observert at skjæredata hadde en større innvirkning på overflateruhet enn utmattingsfasthet. Ved bruk av variansanalyse ANOVA, presenterte de en fremstilling av parametere for skjæredata og hvilken prosentvis effekt det hadde på utmattingslevetiden, det ble funnet at skjærehastighet påvirket utmattingslevetiden med 75,27 %, matehastighet 15,39% og kuttdybde 5,34%

A.L. Mantle. m.fl.²⁶ undersøkte sammenhengen mellom overflateintegritet og utmattingslevetid for dreid gamma-titanium-aluminid utstatt for roterende bøyemoment. For prøvene ble det funnet feil i overflaten blant annet, Sprekkdannelse og økning i mikrohardhet. Sprekkene hadde en dybde på mindre enn 20 µm. Antakelsen var at disse sprekkene ville resultere i en lavere utmattingsgrense, men det viste seg at sprekkene som oppstod hadde lite å si for utmattingslevetiden. Det ble bemerket at det ikke var mulig å produsere sprekkfrie-overflater når typiske anbefalte skjæredata for avsluttende kutt ble benyttet. I tillegg inneholdt S-N kurvene en stor spredning som tydet på en stor variasjon blant forsøkene.²⁶

A.pramanik. m.fl.¹² utførte et litteraturstudium i 2016 for å prøve å redegjøre, forstå og sette i sammenheng tidligere studier vedrørende utmattingslevetid for maskinerte produkter. Det ble konkludert med at forskningen på temaet rundt maskinering og utmattings egenskaper fortsatt var på et tidlig stadium, utmattingsfastheten avhenger av type materiale som blir maskinert, maskineringsprosess, og under hvilke forhold testene blir utført. På bakgrunn av studiet oppsummerte han flere nøkkelfaktorer vedrørende temaet. For titan baserte legeringer finnes det ingen klar trend mellom effekter av matehastighet og utmattingslevetid, med det er funnet at polering av overflaten vil redusere overflateruheten men det vil også medføre å polere vekk trykkspenninger generert i overflatelaget og dermed redusere utmattingslevetiden fordi restspenninger i overflatelaget ble registrert å ha en større effekt på utmattingsfastheten enn overflateruhet. For stål kan det oppstå faseendringer ved maskineringen, dette bidrar til dannelse av restspenninger på de maskinerte overflatene, overflatelaget kan inneholde både strekk og trykkspenninger. For stål vil en lavere matehastighet generelt føre til at det dannes trykkspenninger, der trykkspenningene vil føre til en høyere utmattingsbestandighet fordi overgår overflateruhet i forhold til utmattingsfasthet. En økning av neseradius på dreiestålet vil føre til lavere

trykkspenninger. En økning i skjærehastighet øker den lokale temperaturen ved kuttet, som vil føre til strekkspenninger. Er temperaturen høy nok og avkjølingen tilstrekkelig kan det dannes martensitt i overflate laget som vil generere høye trykkspenninger.¹²

4.3 Skjæredata og effekten på restspenninger

Restspenninger kan ha en negativ og positiv effekt for utmattingslevetiden. Strekkspenninger vil redusere utmattingslevetiden mens trykkspenning generelt vil føre til en lengre levetid. Leppert m.fl.²⁷ har sett på restspenninger som oppstår på overflaten ved tørr dreining av stål med 0,45% karbon innhold, EN C45. Det viste seg at strekkspenning oppstod ved alle tilfellene uavhengig av valg av skjæredata, verdiene varierte stort fra 20 til 550 MPa. Kjøling direkte på kuttet og smøring hadde en stor innvirkning på restspenningen som ble generert på overflaten. skjæredata, kjølemetode og smøremetode hadde begge stor betydning for restspenningene som oppstod både ved tørr og våt dreining. Innvirkningen av skjærehastighet var mer intens for lavere skjærehastigheter.

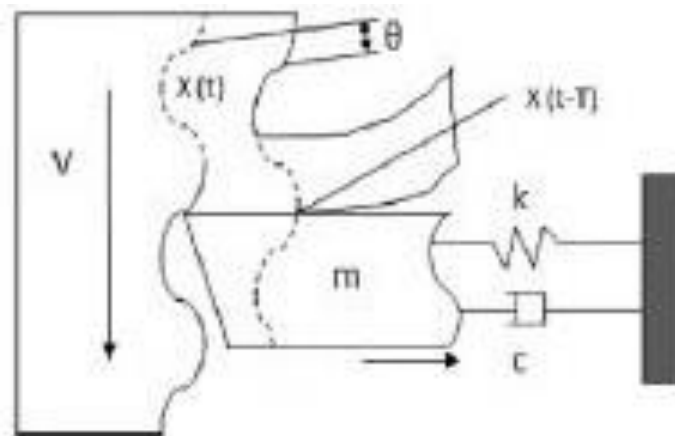
5. Årsaker til maskineringsfeil

Ved definering av oppgaven ble det bestemt at det skulle gjennomføres et litteraturstudium for å finne relevant forskning om årsaker til klining i maskineringsprosessen og metoder for å oppdage dette. Temaet ble utvidet til å undersøke effekten av sperring. Årsaken til sperring er beskrevet i kapittel 2.3.1 og 2.3.2. Det har ikke blitt funnet litteratur som spesifikt knytter disse maskineringsfeilene opp mot utmattingsfasthet men det vil i dette kapittelet bli beskrevet hvordan sperring kan oppdages og identifiseres ved inspeksjon.

5.1 SLD diagrammer

I litteraturen blir SLD (Stability Lobe Diagram) ansett som den mest beleilige metoden for å forutsi sperring. SLD viser grafisk grensen mellom et stabilt kutt og et ustabilt kutt, hvor et ustabilt kutt innebærer vibrasjoner. SLD estimerer sammenhengen mellom spindelhastighet og kuttdybde for å generere diagrammene. For å utvikle et SLD diagram må en begrensende kuttdybde i forhold til omdreiningstall på spindelen beregnes ¹⁷.

For beregne den begrensende kuttdybden som funksjon av omdreiningstallet benyttes det et system med en frihetsgrad på en ortogonal dreieprosess, med ett fleksibelt verktøy og et stivt arbeidsstykke vist i figur 34.



Figur 34 Regenerativ sperring av en bølgete overflate

Ligning 23 relaterer kuttdybden med frekvensen til sperrings vibrasjonene ²⁸ :

$$\frac{f}{f_t} = \frac{r}{r_t} = n + \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \frac{-2\zeta_r}{1-r^2} \quad (23)$$

Relaterer grenseverdien for spontykkelsen og omdreiningstallet til spindelen i dreiebenken. Der ζ_r er dempningskoeffisienten for vibrasjonene, r er et forholdstall mellom den naturlige frekvensen og sperringsfrekvensen. n er antall lober.

Der grenseverdien for kuttdybde er gitt av formel 24

$$b_{lim} = \frac{1}{2K_f G(\omega)} \quad (24)$$

Og frekvensen til dreiespindelen er representert ved ligning 25

$$T = \frac{1}{\omega} (2n\pi + \theta), \quad \theta = 3\pi + 2\psi \quad (25)$$

Der fasevinkelen er definert som

$$\psi = \tan^{-1} \frac{H(j\omega)}{G(j\omega)} \quad (26)$$

5.2 Kontroll teknikker ved sperring

Sperring kan kontrolleres ved to metoder passiv og aktiv. For den passive metoden er målet å begrense chatter ved å endre oppførselen til systemet. Enten ved å endre designet på maskin-verktøy oppsettet eller å ta i bruk ekstra komponenter som kan absorbere energi. Ved den aktive metoden blir vibrasjoner aktivt eliminert ved å følge med på prosessen og kontinuerlig diagnostisere den, og dermed gjøre inngrep i de ledd hvor det trengs når vibrasjoner detekteres.¹⁷

Ved den aktive metoden kan det benyttes sensorer i prosessen for å oppdage eller verifisere stabiliteten i systemet. Blant annet sensorer som kan måle krefter, forskyvning, hastighet, akselerasjon eller lydsignaler. Kraft og vibrasjonsmålinger har vært de mest brukte metodene hittil, det har i tillegg blitt utviklet metoder for sponanalyse for å bestemme stabiliteten i prosessen, ulempen med denne metoden er at deteksjonen vil finne sted etter at sperring har oppstått. Det finnes også teknikker med kunstig intelligens som kan identifisere sperring disse er basert på ¹⁷

Artificial neural network (ANN): denne identifiserte 98 prosent av harmoniske signaler.

Hidden Markow Models (HMM): brukt for å detektere slitasje på verktøy.

6. Produksjon og testing av Prøvestaver

Dette kapitlet beskriver produksjonen av prøvestavene for utmattningstesting og gjennomføringen av utmattningstesting samt resultatene.

6.1 Fremprovosere maskineringsfeilene.

På forhånd av produksjonen ble det innledet samtaler med fagpersoner ved verktedet på NMBU og i tillegg sendt ut spørsmål via en facebook gruppe for bestående av personer innen maskineringsyrket eller interessert i maskinering. Hensikten var å innhente praktiske tips til fremstillingen av prøvestavene. Svarene / samtalene var preget av usikkerhet for hvilke parametere som kunne ha mest å si for å fremprovosere feilene, men noen parametere ble nevnt flere ganger. Samtalene og svarene fungerte som en veiledning til en prøve og feile metode for produksjonen av prøvestavene. Tabell 6 viser parametere som var antatt å kunne fremprovosere maskineringsfeilene.

Tabell 6 Parametere for fremstilling av maskineringsfeil

Maskineringsfeil	Årsak	Parametere som kan hjelpe for å fremprovosere maskineringsfeilen.
Klining	Friksjon, lokalt temperatur økning som fører til at spon kliner seg fast til den maskinerte overflaten.	<ul style="list-style-type: none"> ○ Tørr dreining ○ Høyt omdreiningstall ○ Lav matingshastighet ○ Benytte et slitt verktøy ○ Benytte ett dreiestål med løsegg ○ Stor neseradius på dreiestål ○ Ikke senter justere høyden på dreiestålet
Sperring	Vibrasjoner i systemet	<ul style="list-style-type: none"> ○ Langt utheng på verktøystål ○ Feil forhold mating / omdreiningstall ○ Langt utheng på arbeidsemnet uten bruk av senterpiss og bakdøkke ○ Feil oppspenning av arbeidsemnet

6.2 Produksjon av prøvestaver

6.2.1 Valgt materiale for testingen

Prøvestavene ble fremstilt i stålqualiteten S355J2 + M fra et Ø40mm rundstål. Materialet S355J2 + M er et mikrolegert stål, det blir nevnt fra leverandør at stålet har dokumentert god sveisbarhet og gode maskineringssegenskaper. Tabell 7 viser materialeegenskapene til stålet og tabell 8 viser den kjemiske sammensetningen i materialet

Tabell 7 Materialeegenskaper for S355J2+M ²⁹

Diameter	Flytegrense R_e	strekkfasthet R_m	Bruddforlengelse A5 min %	Hardhet HB	Slagseighet J
40	380	490 – 630	22	170	27

Tabell 8 Kjemisk sammensetning for S355J2+M ²⁹

C	Si	Mn	P max	S	V	Ca
< 0,20	< 0,55	< 1,6	< 0,025	< 0,02 – 0,04	< 0,09	< 0,002

6.2.2 Fremgangsmåte

Prøvestavene ble maskinert ved NMBUs verksted i samarbeid med verkstedets ansatte. Det ble brukt to dreiebenker for fremstillingen en CNC styrt dreiebank Okuma Multus U4000 og en manuell dreiebank Tos Trencin SN40B-50B.

Prøvestavene ble først konstruert i DAK programmet SolidWorks og deretter importert til DAP programmet Gibbscam ver. 12.0.2 for å generere G-kode til CNC dreiebenken. Det ble gjort innkjøp av en seks meters lengde Ø20 rundstål i stålqualiteten S355J. Det viste seg ved oppspenningen i dreiebenken at rundstålet ikke var mulig å spenne opp i chucken på maskinen uten at det ble et ustabil system som førte til sperring. Prøvestavene ble derfor maskinert fra et Ø40mm rundstål. Prøvestavene uten maskineringsfeil og med sperringsfeil ble fullt ut produsert i CNC dreiebenken etter G-koden. For at sperring skulle oppstå ble matehastigheten manuelt justert av operatør under det avsluttende kuttet mellom 50 – 200% av forhåndsinnstilt matehastighet.

Tabell 9 Skjæredata avsluttende kutt CNC maskin Okuma Multus U4000

Spindelhastighet	2000
matehastighet	0,15
kuttdybde	0,4 mm
Skjærestål	TaeguTEC VBMT 160404 FA TT8125

For prøvestavene med klinefeil var det ikke mulig å fremprovosere klining i CNC dreiebenken. Prøvestavene ble derfor grovdreid i CNC benken hvor et område på 25 mm ble spart for maskinering i manuell dreiebank for å fremprovosere feilen. Det ble på forhånd gjort flere eksperimentelle forsøk for å fremprovosere klining i dette området, med forskjellig typer verktøy og systematisk endring av skjæredata, basert på samtalene nevnt i kapittel 6.1 det viste seg at dette var vanskelig å fremprovosere. Den beste metoden for å fremprovosere klinefeilen for disse prøvestavene ble funnet ved tørrdreieing og spindelretning mot klokken med høy spindelhastighet i forhold matingshastigheten se tabell 9. Det ble observert at spon klinte seg fast til overflaten av den maskinerte overflaten. ved maskineringen av klinefeilen i manuell dreiebank var det ikke mulig å dreie helt ned til 10,00 mm, grunnen til dette var at for å fremprovosere klinefeilen ble det dreiet med spindelretning motsatt av hva som er normalt, som medførte at stålet slepte langs overflaten og det ble observert at avsponing ikke var fullkommen. Ved bruk av måleskiven på tverrsleiden var det en differanse på mellom 0,2 – 0,3 mm i forhold til å dreie med normal spindelretning. Dersom dette hadde blitt korrigert for, ville det resultert i en kjerv med dybde på 0,2-0,3 mm inn stålet ved siden av området hvor det ble fremprovosert klining. I overgangen mellom fin overflate og overflate med klinefeil ble det ikke observert en krapp kjerv men det bemerkes at det ble en total en resulterende gravdvis opptrapping på 0,2-0,3 mm opp til partiet med klining.

Tabell 10 Skjæredata avsluttende kutt manuell dreiebank Tos Trencin SN40B-50B

Spindelhastighet	1000
matehastighet	0,08
kuttdybde	0,2 mm
Skjærestål	Vendeskjær TNMA 200504

Det ble maskinert totalt ni prøvestaver for testingen. Prøvestavene ble laget i tre kategorier der den første kategorien var prøvestaver uten feil i prosessen, den andre kategorien med

fremprovosert sperring i maskineringen og den tredje kategorien med fremprovosert klinefeil. Tabell 11 viser merkingen av stavene.

Tabell 11 Nummerering av prøvestaver

Nummer	Type prøvestav
1,1 - 1,3	Prøvestaver uten maskineringsfeil
2,1 - 2,3	Med sperringsfeil
3,1 - 3,3	Med klinefeil

Tabell 12 De tre kategoriene for prøvestavene og nærbilde av overflatefeilene.

Kategori 1	
Kategori 2	
Kategori 3	
Nærbilde av kategori 2 Sperring	
Nærbilde av kategori 3 klining	

6.3 Kontroll av kvalitet

Diameteren på prøvestavene ble målt med et mikrometer. Det ble gjort tre målinger av diameteren og beregnet gjennomsnittsdiameteren som ble den representative diameteren for prøvestavene.

Tabell 13 Gjennomsnittlig diameter av prøvestavene

Prøvestav	1,1	1,2	1,3	2,1	2,2	2,3	3,1	3,2	3,3
Δd mm	10,00	9,99	9,99	10,39	10,64	10,39	10,30	10,18	10,28

Som tabell 13 viser ble det noe variabel diameter mellom prøvestavene, spesielt for kategori 2. Det ble diskutert med CNC operatøren og kommet fram til at dette var det beste resultatet som var mulig når sperring oppstod, fordi det var en ustabil prosess som ikke gav mål slik programmet var stilt til. Dreiebenken benytter fastsatte koordinater for verktøybevegelse som vil si at dersom arbeidsemnet vibrerer og opplever en utbøyning vil ikke den forhåndsatte diameteren være mulig å oppnå. Det var ikke tid til å produsere nye prøvestaver på grunn av avtalt tid for utmattingstesting.

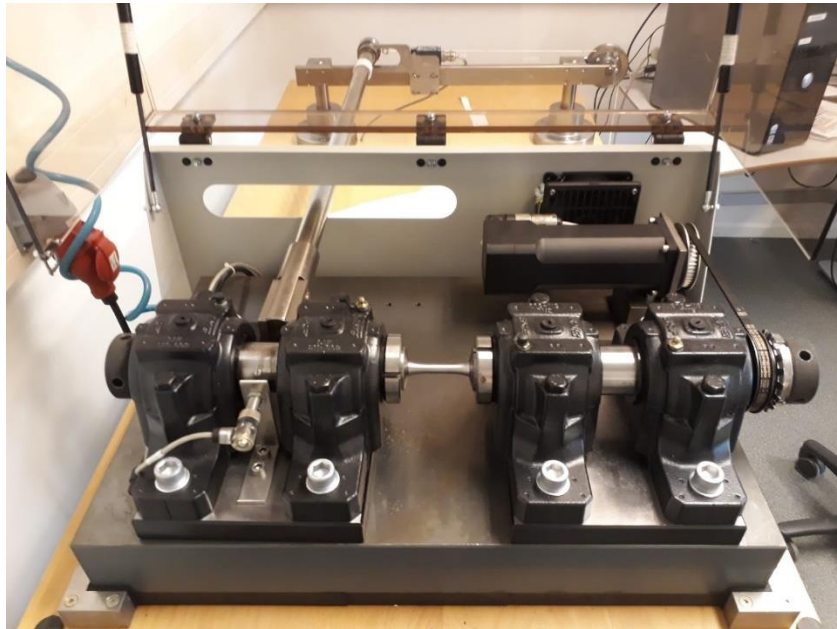
Prøvestavene ble målt med ruhetsmåler av typen MAR Marsurf PS1. ruhetsverdiene vises i tabell 14. Prøvestavene viste samlede resultater for kategoriene med unntak av prøvestav 2,1 som hadde en ruhet lavere enn de to andre i kategorien.

Tabell 14 Gjennomsnittlige ruhetsverdier for prøvestavene

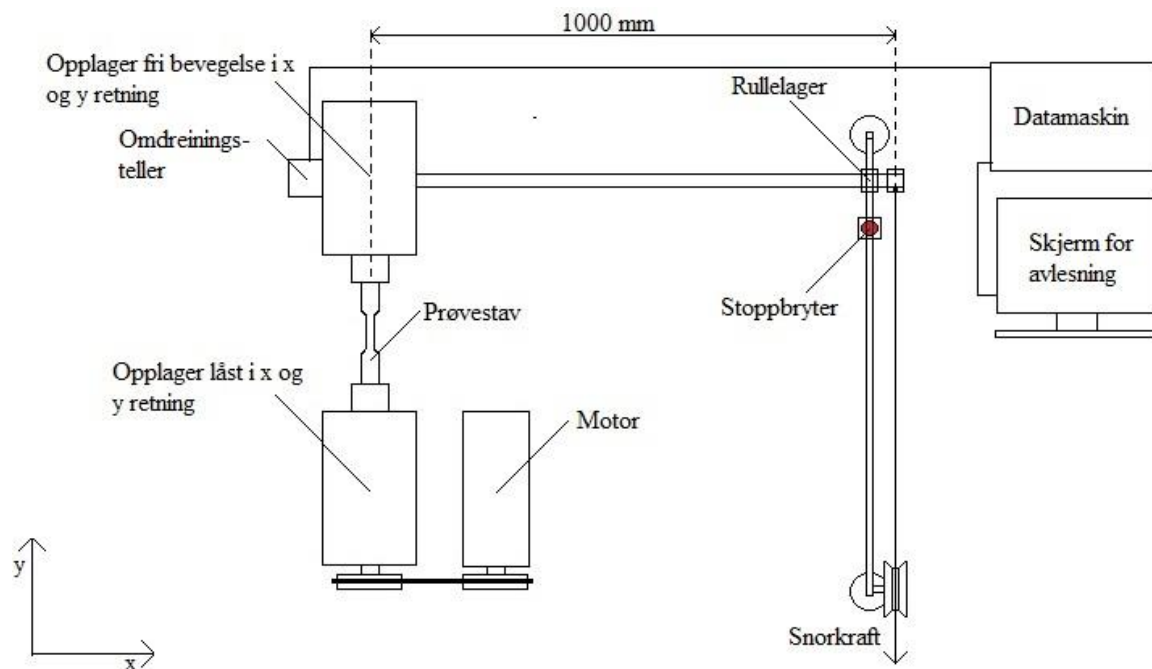
Prøvestav	1,1	1,2	1,3	2,1	2,2	2,3	3,1	3,2	3,3
$R_{a(snitt)}$ μm	1,688	1,780	1,740	4,761	7,173	7,680	4,207	3,818	4,194

6.4 Gjennomføring av test

Utmattningstesten ble gjennomført i utmattningstestmaskinen Zwick Roell UBM 200 tc for roterende bøyning ved OsloMet. Testmaskinen var sammenkoblet med dataprogramvaren testXpert V12.1. figur 35 viser prøvestaven oppsent i utmattningstestmaskinen.



Figur 35 Prøvestav montert i utmattningstestmaskin



Figur 36 Testoppsettet ved utmattningstesting

Testoppsettet bestod av to opplagringer for prøvestaven. Hvor den ene opplagringen var fast innspent og kun tilgjengelig for rotasjons bevegelse. I den andre enden var det ett opplager som tillot rotasjon og bevegelse i x og y retning, en stang var fastmontert normalt på opplageret og en snor var festet i andre enden. For å justere spenningsvidden ble vekten veid opp i en bøtte og hengt i snoren som påførte et moment på prøvestaven. Massen ble beregnet ut ifra formelen.

$$m = \frac{\Delta\sigma \cdot \pi \cdot d_{snitt}^3}{627840} \quad (27)$$

Det ble valgt å kjøre med lik nominell spenningsamplitude på 780 MPa fordi det var antatt at levetiden ville variere noe innenfor hver av de tre kategoriene, spenningsvidden hadde tidligere blitt prøvd på prøvestaver av materialtypen S355J0 for innlæring av maskinen og det ble funnet at dette ga en fornuftig tidsbruk frem til utmattingsbrudd pr prøvestav. Massen for å skape en spenningsvidde på 780 MPa ble regnet ut for hver prøvestav.

Tabell 15 nødvendig vekt til ønsket spenningsvidde

Prøvestav	1,1	1,2	1,3	2,1	2,2	2,3	3,1	3,2	3,3
<i>masse</i>									
g	3899	3895	3813	4381	4701	4381	4269	4114	4240

Prøvestav 2,2 skilte seg ut med en høyere masse i bøtta på grunn av en større diameter. Gjennomføringen av testen ble gjort med rotasjonshastigheten 3000 *omdr/min*. Det har tidvis vært mye feil med utmattingsstestmaskinen som på grunn av koblingen mellom datamaskinen og utmattingsstestmaskinen, denne feilen skjedde ved gjennomkjøringen av prøvestav 1,1. Maskinen stoppet etter å ha kjørt 6182 sykler, dette ble addert til de totale syklene som ble gjennomført ved ny oppstart.

6.5 Resultater

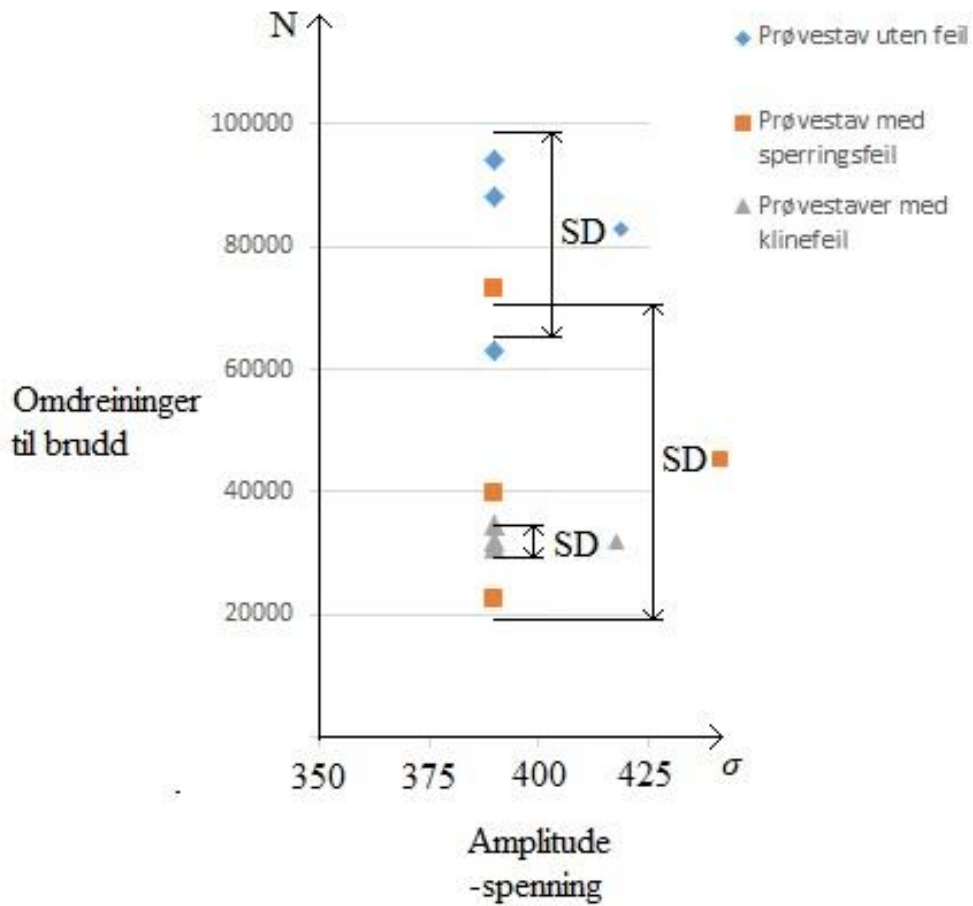
Resultatene etter utmattingstesting er presentert i tabell 16. Prøvestav 2,2 skilte seg ut med lavest antall omdreininger til brudd, det bemerkes at prøvestav 2,2 ble kjørt med den høyeste massen ved testgjennomføringen, på bakgrunn av utregning av nødvendig masse for å oppnå spenningsvidden. Prøvestav nummer 2,3 skilte seg ut med et høyt antall omdreininger til brudd med 73066 sykler. bortsett fra dette var det relativt samlede resultater. Standardavviket ble beregnet via variansen med formlene for varians og standardavvik Hvor n er antall tester gjennomført. N_i er antall omdreininger til brudd for hver prøvestav og \bar{N}_n er gjennomsnittlig antall omdreininger til brudd innen kategorien.

$$var(x) = \frac{\sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N}_n)^2}{n - 1} \quad (28)$$

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N}_n)^2}{n - 1}} \quad (29)$$

Tabell 16 omdreininger til brudd og standardavvik

Prøvestav	Nominell spenningsvidde, $\Delta\sigma$	Antall omdreininger til brudd	Gjennomsnitt verdi av omdreininger til brudd \bar{N}	Standardavvik
Nummer	MPa	N		SD
1,1	780	88271	81806	16625
1,2	780	94227		
1,3	780	62920		
2,1	780	39654	45150	25613
2,2	780	22732		
2,3	780	73066		
3,1	780	31762	32348	2072
3,2	780	30633		
3,3	780	34650		



Figur 37 Spredning av testresultatene med grafisk fremstilling av standardavvik

Reduksjon av utmattingslevetiden basert på gjennomsnittverdier ved testingen kan bli beregnet prosentvis med formelen $N_{reduksjon}$.

$$N_{reduksjon} = \left(1 - \frac{\bar{N}_{feiltype}}{\bar{N}_{uten feil}}\right) \cdot 100 \quad (30)$$

Tabell 17 Prosentvis reduksjon av utmattingslevetid ved maskineringsfeilene

Feiltype	Prosentvis reduksjon
Sperring	44,8 %
Klining	60,5 %

7. Diskusjon og evaluering

I dette kapitlet vil det bli diskutert rundt funnene i litteraturen, produksjonen av prøvestavene, testresultater og oppgaven og resultater fra utmattingstestingen og vist trukket frem et eksempel ved en kjervet prøvestav.

7.1 Produksjonen av prøvestavene.

Produksjonen av prøvestavene ble gjennomført etter prøving og feiling for å fremprovosere maskineringsfeilene. Sperringen ble fremprovosert ved å endre matingshastigheten som ga en karakteristisk overflate som oppstår ved sperring, men som Siddphura m.fl.¹⁷ har kartlagt er det flere muligheter for hvordan sperring kan oppstå, slik at resultatene i denne oppgaven ikke nødvendigvis er representabel for sperring generelt men for sperring oppnådd ved endring av matingshastigheten. Klinefeilen ble som nevnt i kapittel 6.2.2 fremprovosert ved høy friksjon mellom skjæreverktøy og overflaten til arbeidsemnet slik at spon klinet seg fast til overflaten, det ble dreid tørt og det antas høy temperatur i kuttsonen, på bakgrunn av dette er det grunn til å tro at restspenninger ble generert på overflaten som vil ha en påvirkning på utmattingslevetiden. Fra litteraturen ble det antydnet at for karbonstålet C45 ville det genereres strekkspenninger uavhengig av valg av skjæredata²⁷. Samtidig som A. Pramanik m.fl.¹² antyder at det for stål generelt ved lave matehastighet føre til at det dannes trykkspenninger. Prøvestavene i denne oppgaven ble dreid ved den laveste grensen for anbefalt matingshastighet som beskrevet i kap. 2.4.2 på 0,08 mm/omdr. En spenningsanalyse eller måling av spenning med røntgen diffraksjon burde vært utført i overflatelaget for å bestemme dette.

7.2 Gjennomføring av test.

Gjennomføringen av testen ble ikke gjennomført etter standarder for utføring av utmattingstester ved roterende bøyning, årsaken var at det var ønskelig å generelt undersøke effekten av klining og sperring og at masteroppgaven har ett lavt budsjett som medvirket til at det var ønskelig å produsere et lavt antall prøvestaver for testingen. Selve test gjennomføringen ble gjennomført med lik spenningsvidde for alle prøvestavene. Det er derfor trygt å anta at forskjeller i resultatene ikke har kommet av forskjeller i selve testingen men heller ved materialets egenskaper etter maskinering. Allikevel kunne det vært hensiktsmessig å kjørt tester ved flere spenningsvidder for å bedre forstå hvordan endringen av utmattingslevetid blir påvirket ved høyere levetider, dette ville også gitt

muligheten til å produsere SN kurver for maskineringsfeilene og sett en faktor for redusering av utmattingsgrensen.

7.3 Litteratur

Litteraturen som har blitt gjennomgått har vært sprikende, ved at tester har blitt gjennomført på forskjellige materialer og ved forskjellige utmattningstester, det har blitt valgt å utelate flere artikler som undersøkte utmattningstesting ved rullekontakt og strekk-trykk testing, fordi fokuset har vært på roterende bøyning. Allikevel er det en kunne flere strekk – trykk tester blitt betraktet, da spenningen blir generert i aksial retning for begge tilfellene. Ut ifra litteraturen undersøkt er forskningen på området overflateintegritet ved maskinering og utmattingslevetid fortsatt på et tidlig stadium, som gjør at oppgaven i seg selv er et relevant tema ¹². Av artiklene funnet vil Karina S.S Lopes¹¹ undersøkning av skjæredata på utmattingsgrensen til stålet AISI 4140 trekkes frem som et godt eksempel for hvordan en undersøkning av temaet kan utføres der effekten av skjærehastighet, matehastighet og kuttdybde individuelt ble undersøkt for effekten på overflateruhet, og deretter for effekten på utmattingslevetid. Det ble presisert at skjæredata påvirket overflateruheten i større grad enn utmattingslevetiden. Lignende fremtidige eksperimentelle forsøk bør ta sikte på å undersøke temaet som en helhet, der restspenninger og mikrostruktur bør inngå på samme måte som overflateruheten ble undersøkt. Dette ville i større grad gjort det mulig kunne utvikle en egen faktor for redusering av utmattingslevetid ved maskinering. Det ble foreslått en fremstilling av parametere for skjæredata og hvilken prosentvis effekt det hadde på utmattingslevetiden, dette ble gjennomført på stålet AISI 52100. Det ble funnet at skjærehastighet påvirket utmattingslevetiden med 75,27 %, matehastighet 15,39% og kuttdybde 5,34% ²⁵. skjæreegggeometrien har blitt antydnet til å være den dominerende faktoren for bestemmelse av restspenningsprofilet ved maskinering²⁴. Lignende undersøkelser bør utføres på flere metaller som reagerer ulikt på høye temperatur og plastiske deformasjoner i kuttsonen. Artikkelen «fatigue life of machined components» A.Pramanik m.fl. ¹² Trekkes frem som en artikkel som beskriver godt hvor langt forskningen har kommet vedrørende utmattingslevetiden på maskinerte produkter.

7.4 Evaluering av testresultatene

Testresultatene som ble presentert viste en god samling ved klinefeilen, men det ble observert at to av prøvestavene med klinefeil gikk til brudd ved overgangen mellom fin overflate og området med klinefeil. Det vil være grunn til å anta at det har vært en høyere spenningskonsentrasjon i dette punktet som kan ha bidratt til en lavere utmattingslevetid. For den tredje prøvestaven i kategorien ble bruddet observert inne på området med klinefeil. Resultatene velges derfor å tas med for å gi en antydning til reduksjon av utmattingslevetid ved klining siden restresultatene var så samlet for prøvestavene med klinefeil. Siden testene ikke er kjørt etter standard for testing av utmattingslevetid, vil det ikke være mulig eller hensiktsmessig å produsere SN kurver som representerer utmattingsegenskapene til prøvestavene. Men det kan være hensiktsmessig for å undersøke prøvestavene opp imot hverandre. Som en referanse til utmattingsgrensen σ_D velges en oppgitt utmattingsgrense for stålet st 50-2 som tilsvarer EN S355J2 + N. Disse stålene har veldig lik kjemisk sammensetning og verdier for strekkfasthet.

Tabell 18 Strekkfasthet ved stålet S355J2 + N og S355J2 + M

Stålkvalitet	Strekkfasthet R_m MPa
S355J2 + N	490 - 680
S355J2 + M	490 - 630

For stålet S355J2 + N er utmattingsgrensen ved roterende bøyning oppgitt til

$$\sigma_D = \pm 280 \text{ MPa}$$

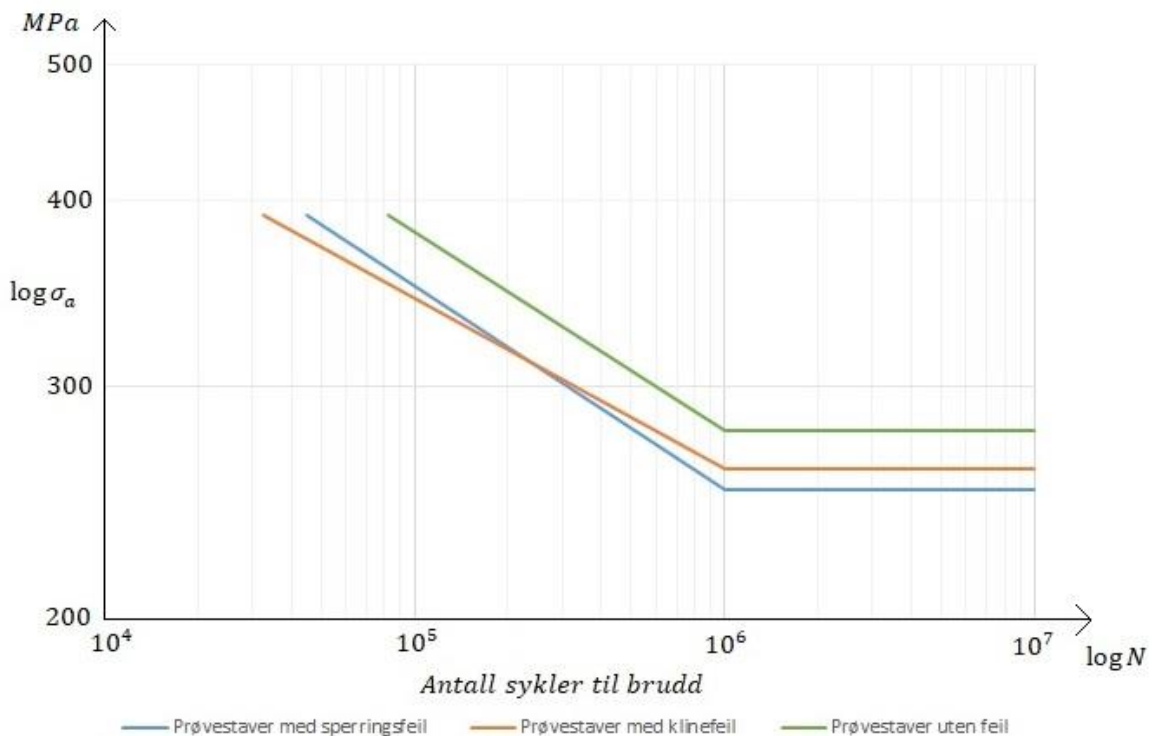
En utmattingsgrense for prøvestavene i forhold til overflateruheten kan da bli estimert ved å multiplisere utmattingsgrensen med reduseringsfaktoren for overflatene. Gjennomsnittlig ruhetsverdi for kategoriene av prøvestavene er gitt i tabell 19.

Tabell 19 Gjennomsnittsverdier for prøvestavene

Kategori Prøvestav	Prøvestaver uten feil	Prøvestaver med sperringsfeil	Prøvestaver med klinefeil
$R_{a(\text{snitt})}$	1,736	6,538	4,073

Utmattingsgrensen til prøvestavene kan da bli estimert med Juvinall's metode mulitplisert med overflatefaktor og basquins ligning for en rett linje i SN diagrammet.

På bakgrunn av denne reduksjonen av utmattingsgrensen ble tre SN kurver estimert ved gjennomsnittsverdier av antall sykler til brudd fra testingen for de tre kategoriene. Det understrekes at disse SN kurvene ikke representerer de faktiske utmattingssegenskapene til prøvestavene, men kun er estimater på bakgrunn av testresultater sammen med Juvinalls metode og redusering av utmattingsgrensen til stålet S355J2+N.



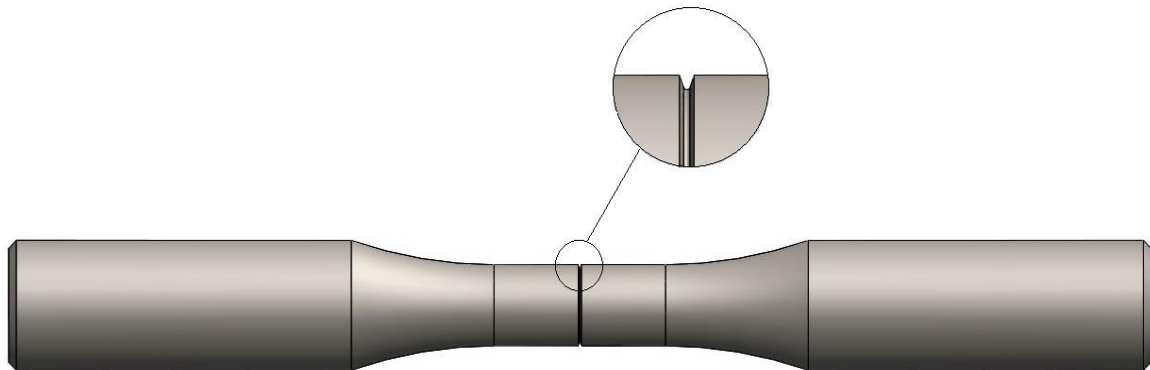
Figur 38 Estimerte SN kurver for prøvestavene

Figur 38 viser vil de estimerte SN linjene for begge feiltypene ligge lavere enn prøvestaven uten feil. En interessant oppdagelse er at SN kurven for prøvestav med sperrings feil vil krysse prøvestav med klinefeil dersom utmattingsgrensen blir utregnet ved redusering basert på overflatefaktoren. Som figur 38 viser vil prøvestav uten feil og prøvestav med sperringsfeil følge hverandre godt, det vil si at de har tilnærmet likt stigningstall. Dette er en god indikasjon på at det er flere faktorer enn overflatefaktor og formfaktor påført i maskineringsprosessen som påvirker utmattingslevetiden. Slik som også Karina S.S Lopes m.fl. ¹¹ antydte.

7.5 Redusering av utmattingsgrense ved maskin/operatørfeil i dreieprosessen

Iløpet av arbeidet med oppgaven har det kommet fram at flere maskineringsfeil/operatørfeil kan oppstå i prosessen. I samtaler med Øyvind Hansen ved verkstedet til NMBU, ble det diskutert bruk av slitt dreiestål, og eventuelle ødelagte dreiestål. Dette er en reel problemstilling som kan oppstå og ikke nødvendigvis oppdages, og kan medføre økt friksjons i kuttet eller lavere overflateruhet på grunn av skjærets geometri. Et annet tenkt scenario er operatørfeil ved manuell maskinering. Dersom operatøren av dreiebenken, ved det avsluttende kuttet skulle skru feil vei på måleratt til tverrsleiden eller toppsleiden når det avsluttende kuttet skal gjennomføres kan det oppstå et spor i akselen. Dette er en reel problemstilling som vil ha en drastisk reduksjon i utmattingslevetid. For å fremheve konsekvensen av dette har det blitt beregnet et eksempel som viser reduksjonen i utmattingsgrensen ved en kjervet prøvestav.

Eksempel på reduksjon av utmattingsgrense ved en kjervet prøvestav.



Figur 39 Modellert prøvestav med kjerv

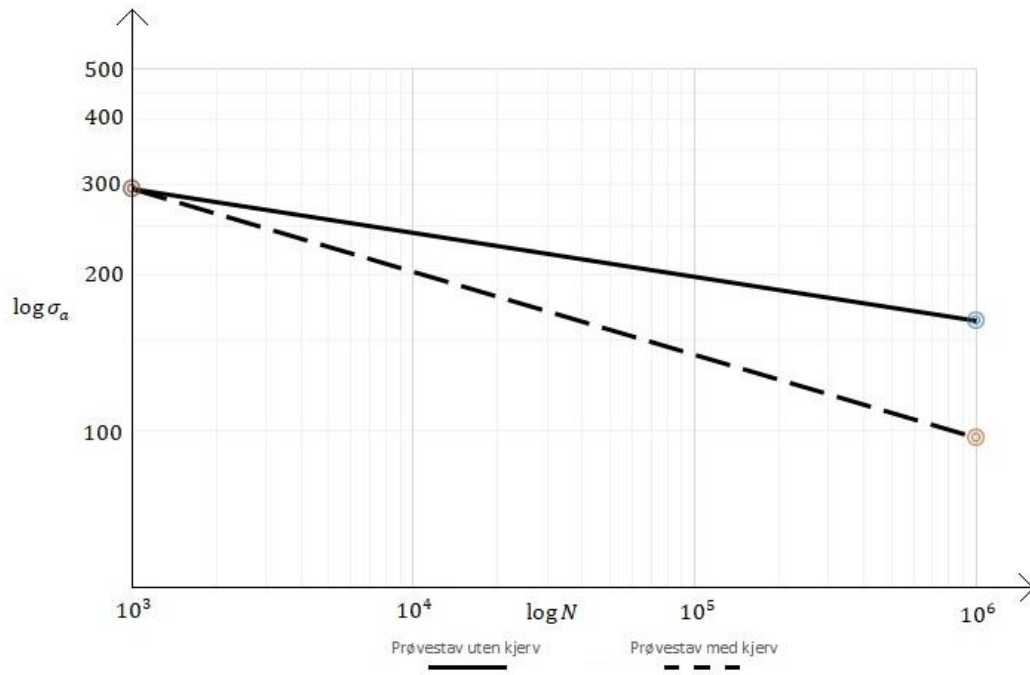
Strekfasthet $R_m = 510 \text{ MPa}$

Overflateruhet $R_a = 10 \text{ }\mu\text{m}$

nesreradius dreistål = 0,2 mm

diameter bunn av kjerv = 9 mm

Spenningskonsentrasjonsfaktor $K_t = 2,76$ (ref til vedlegg).



Figur 40 Reduksjon av utmattingsgrense ved kjervet prøvestav

8. Konklusjon og videre arbeid

Konklusjon

I denne oppgaven er det gjennomført et litteraturstudium og diskusjoner med fagpersoner innen maskinering for å innhente informasjon om maskineringsfeilene sperring og klining. I tillegg til gjennomgåelse av publiserte artikler med eksperimentelle forsøk vedrørende skjæredata og utmattingslevetiden til maskinerte komponenter. Og skjæredata og innvirkning på overflateintegritet. Det har blitt produsert totalt ni prøvestaver som ble delt inn i tre grupper med forskjellige overflatefeil fremprovosert i dreieprosessen. Det er gjennomført testing av utmattingslevetiden ved roterende bøyning ved spenningsforholdet $R = -1$.

Skjæredata har en stor innvirkning på utmattingslevetiden ved maskinerte komponenter, overflatefaktoren kan reduseres til området 0,5-0,8 for reduisering av estminert utmattingsgrense. Dette kommer av at overflateintegriteten endrer egenskaper etter det avsluttende kuttet i prosessen. Overflateintegriteten som en helhet har en stor påvirkning på utmatinningslevetiden da spesielt ved sammenhengen mellom overflateruhet og restspenninger. Skjæredata ved maskinering av komponenter vil ha en større påvirkning på overflateruheten enn utmattingslevetiden. Restspenninger generert ved det avsluttende kuttet i maskineringsprosessen vil være lokalisert helt overflatelaget, under en viss dybde vil restspenningsprofilen være likt gjennom materialet. Skjæregg geometrien vil være den dominerende faktoren for å bestemme restspenningsprofilen ²⁴ Ved polering av en maskinert overflate vil overflateintegriteten endres. Dersom strekk spenninger er tilstede i overflatelaget vil en polering bidra til å øke utmattingslevetiden, mens dersom trykkspenninger er tilstede vil polering føre til en redusert utmattingslevetid.

Klining og sperring er ustabile prosesser som vil være lett å detektere ved visuell inspeksjon, maskineringsfeilene kan oppstå uten forvarsel, men riktige skjæredata vil i stor grad motvirke dette. Aksler maskinert med fremprovosering av sperring ved justering av matingshastigheten vil redusere utmattingslevetiden med 44,8%. Aksler med klinefeil vil oppleve også oppleve en reduksjon i utmattingslevetid, det er registrert en reduksjon på 60,5 prosent men det bemerkes at lokale spenningskonsentrasjoner kan ha påvirket resultatet. Da bruddene fant sted i overgangen mellom fin overflate og overflate med klinefeil. Testresultatene viste en stor spredning for sperringsfeilen mens kliningsfeilen viste en god samling.

Videre arbeid.

Temaet om maskinering og utmattingslevetid er fortsatt i en tidlig fase og det oppfordres til videre arbeid med temaet, dersom en lignende oppgave skal initieres anbefales det å gjennomføre en ny litteratur studie, fordi temaet er relevant og ikke ferdig definert, og nye artikler blir publisert. Noen punkter som er observert gjennom arbeidet vil bli nevnt for det videre arbeidet.

- En studie som bygger videre på fenomenet bør fokusere på overflateintegriteten som en helhet og innvirkning på utmattingslevetid, der faktorene restspenninger generert ved maskinering, fasetransformasjoner på grunn av oppvarming og overflateruhet bør sees på som en samlet faktor for reduksjon av utmattingslevetiden.
- Gjennomføre utmattingstest etter en standard for utmattingstesting for å teste materialet og skjæredata ved flere spenningsvidder for å kunne definere SN kurver for materialet og en reduksjonsfaktor, deretter bør reduksjonsfaktoren testes for andre typer materialer.
- Kliningsfeilen kan produseres ved oppbygging av lagvise spon BUE/BUL fremfor klining med høy friksjon og temperatur, da dette er en mer reel metode for fremprovosering av klining slik det fremgår i maskineringen. Det oppfordres til å benytte CNC styrt maskin og definere en G-koder for at prøvestavene skal bli mest mulig like.
- Sperringsfeil kan undersøkes ved andre metoder for fremprovosering, da sperringsfeilen er kompleks er det rimelig å anta at overflateintegriteten vil ha forskjellige egenskaper for ulike sperringsfeil.

9. Litteraturreferanser

1. REALTEK/NMBU. (2017). *Grunnleggende om utmatting i metaller*: Geir Terjesen.
3. Lâromedel, B. A. G. o. L. (1983). *Tilvirkningsteknikk 4*. Sponfraskillende bearbeiding.
4. Bergland, H. (2000). *Mekaniker Permen*. Sponfraskillende bearbeiding: Universitetsforlaget.
5. Humberstet, B. (1972). *Dreining*. Sponskjærende bearbeiding 3. Bergen: Universitetsforlaget.
6. K.A. Nilsson, E. R., N.Chr. Tømmeraas, N. Ebbesen. (1970). *Overflateruhet*. Informasjon nr 1. Norsk Verkstedindustri Standardiseringsentral (NVS). Oslo.
7. Hartvig Hartvigsen, R. L., Knut Michelsen, Sverre Seljevoll. (2006). *Verkstedhåndboka*. I, s. 26-27: Gyldendal Norsk Forlag AS.
8. Johansen, H. Mekaniske egenskaper og testing av dem.
9. Jørn Kenneth Andersen, H. B., Rune Frestad, Eyoulf Herø, Rolf Rønning. (2006). *Produksjon*. I: *Dreining, TIP-SERIEN, VG1 teknikk og industriell produksjon, Faktabok*, s. 64 - 99: Gyldendal Norsk Forlag AS.
10. Ralph I. Stevens, A. F., Robert R. Stevens, Henry O. Fuchs. (2001). *Metal fatigue in engineering*. Canada: John Wiley and Sons Inc.
11. Karina S.S. Lopes, W. F. S., Ernani S.Palma. (2008). Influence of Machining Parameters on Fatigue Endurance Limit of AISI 4140 Steel. *Journal of the brazilian society of mechanical sciences and engineering*.
12. A.Pramanik, A. R. D., S. Chatteopadhyaya, M.S Uddin, Yu Dong, A.K Basak, G. Littlefair. (2016). Fatigue life of machined components. *Advances in manufacturing*, 5 (1): 17.
14. Guillem Quintana, J. C. (2011). Chatter in machining processes: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*: 14.
15. Industriskolen. (2009). Sponfraskillende bearbeiding og skjæreteknikk. I: *VG2 Industriteknologi*.
16. Taylor, F. W. (1907). *On the art of cutting metals*. New York: The American Society of Mechanical Engineers.
17. M. Siddhpura, R. P. (2012). A review of chatter vibration research in turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* (61): 21.
19. transport, S. h. f. (2017). *Norsk Sammendrag av foreløpig rapport om luftfartsulykken ved Turøy, Øygarden i Hordaland, 29.april 2016 med Airbus helicopters EC225 LP. LN-OJF, Operert av CHC helikopter service AS*. Lillestrøm.
20. W.Weibull. (1961). *Fatigue testing and analysis of results*: Pergamon Press.
21. GOSIGER. (2012). *An indepth look at the process*. Fundamentals of hard turning.
22. Georgios P. Petropoulos, C. N. P., J. Paulo Davim. (2010). Surface Integrity in Machining. *Research gate*, January 2010: 30.
23. Michael Jacobson, P. D., Fredrik Gunnberg. (2002). Cutting Speed influence on surface integrity of hard turned bainite steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 128: 318-323.
24. Y.Matsumoto, F. H., G.Lahoti. (19999). Surface integrity generated by precision hard turning.
25. Vijay Vanjari, A. S., Satish chinchhanikar. (2016). Prediction of Effect of Cutting Parameter on Fatigue Life of AISI 52100 Steel. *Materials Today*, 5: 922-928.

26. A.L. Mantle, D. K. A. (1997). Surface integrity and fatigue life of turned gamma titanium aluminide. *Journal of Materials Processing Technology*, (1997) (72): 413-420.
27. Tadeusz Leppert, R. L. P. (2009). Surface Residual stresses in dry turning of 0,45% C steel. *Advances in X-ray Analysis*, 52.
28. Yue, J. (2006). Creating a stability lobe diagram.

Internettkilder

2. types of chips, Mechanicalengineering.blog.com , Tilgjengelig fra: <http://www.mechanicalengineeringblog.com/4613-types-of-chips-chips-that-are-formed-during-machining/#.Wvkt32giNaQ> (lest 29.03.2018.)
13. Walton, G. (2016). *Versailles Railway Accident 1842*. Tilgjengelig fra: <https://www.geriw Walton.com/versailles-railway-accident-of-1842/>(lest 10.04.2018).
18. How a profilometer works, Nanoscience.com, Tilgjengelig fra: <https://www.nanoscience.com/technology/optical-profiler-technology/how-profilometer-works/> (lest 20.03.2018)
29. AB, B. g. S. (2018). *Materialgenskaper S355J2+M*. Tilgjengelig fra: <http://www.begroup.com/sv/BE-Group-sverige/Produkter/Specialstal/Produktinformation/Stalsorter/S355J2-520-MSS-2142-M/> (lest 25.04).

10. Vedlegg

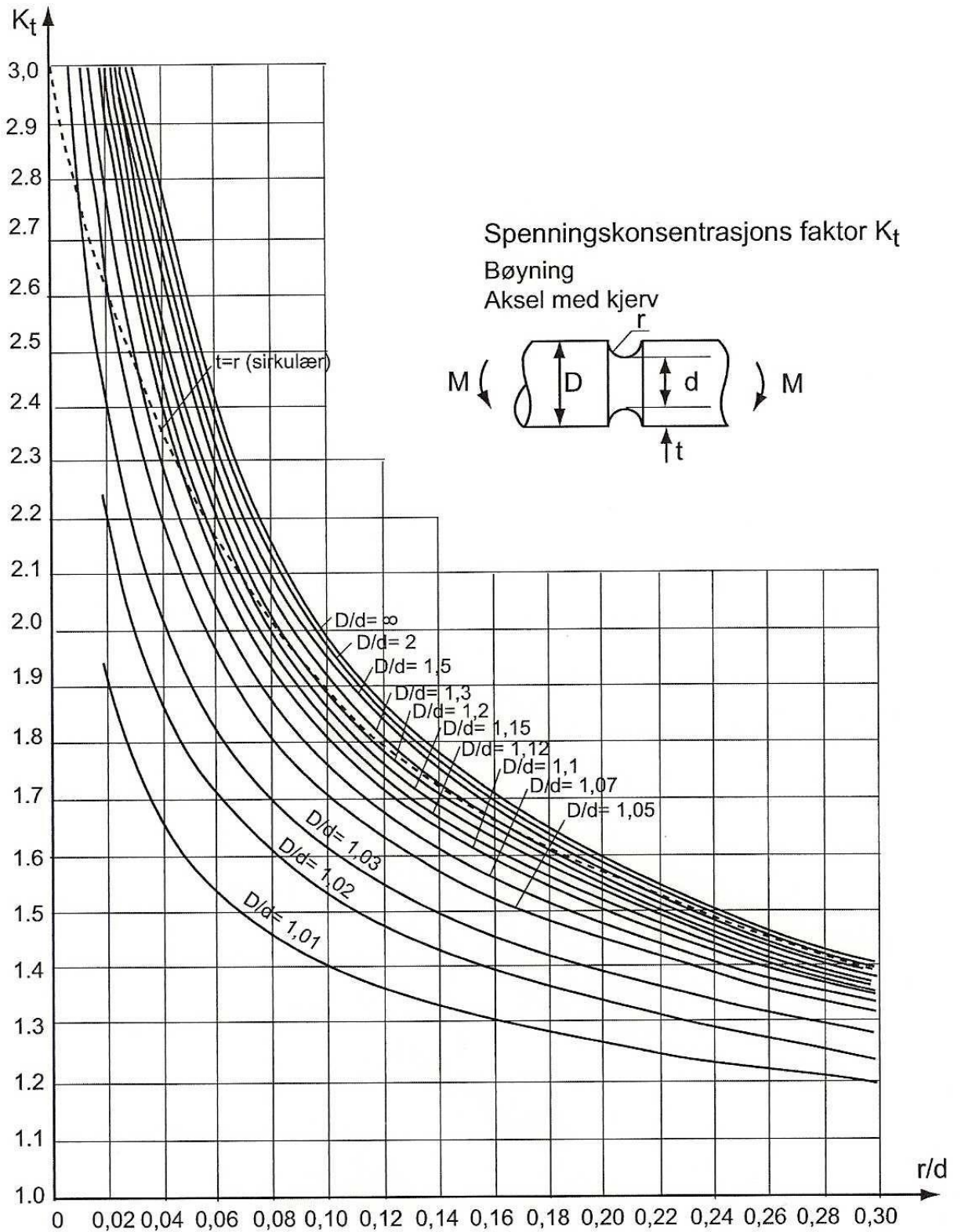
A – TABELLER OG DIAGRAMMER

B - BEREGNINGER

C – G-KODER

D - KONSTRUKSJONSTEGNINGER

A-1 SPENNINGSKONSENTRASJONSFAKTOR FOR AKSEL MED KJERV



A-2 MÅLTE DIAMETER FOR PRØVESTAVER

Nummer	d_1 mm	d_2 mm	d_3 mm	Δd mm
1,1	9,99	10,00	10,00	9,997
1,2	9,99	9,99	10,00	9,993
1,3	9,99	9,99	9,99	9,990
2,1	10,35	10,40	10,43	10,393
2,2	10,54	10,70	10,68	10,640
2,3	10,38	10,40	10,40	10,393
3,1	10,31	10,30	10,30	10,303
3,2	10,20	10,18	10,15	10,177
3,3	10,29	10,27	10,28	10,280

A-3 MÅLT OVERFLATERUHET FOR PRØVESTAVENE

Nummer	R_{a1} μm	R_{a2} μm	R_{a3} μm	$R_{a(\text{snitt})}$ μm
1,1	1,872	1,709	1,483	1,688
1,2	1,658	1,698	1,983	1,780
1,3	1,736	1,718	1,767	1,740
2,1	4,996	4,884	4,404	4,761
2,2	7,128	7,607	6,783	7,173
2,3	7,763	8,009	7,269	7,680
3,1	3,660	4,790	4,171	4,207
3,2	3,890	3,663	3,902	3,818
3,3	4,252	3,954	4,376	4,194

B - BEREGNINGER

B-1 UTREGNINGER AV MASSE FOR UTMATTINGSTESTING.

Nødvendig masse ved utmattingsstest for prøvestaver uten feil

$m_{1,1} = \frac{780 \cdot \pi \cdot 9,997^3}{627840}$ $m_{1,1} = 3899 \text{ g}$	$m_{1,2} = \frac{780 \cdot \pi \cdot 9,993^3}{627840}$ $m_{1,2} = 3895 \text{ g}$	$m_{1,3} = \frac{780 \cdot \pi \cdot 9,990^3}{627840}$ $m_{1,3} = 3813 \text{ g}$
---	---	---

Nødvendig masse ved utmattingsstest for prøvestaver med sperrings feil

$m_{2,1} = \frac{780 \cdot \pi \cdot 10,393^3}{627840}$ $m_{2,1} = 4381 \text{ g}$	$m_{2,2} = \frac{780 \cdot \pi \cdot 10,640^3}{627840}$ $m_{2,2} = 4701 \text{ g}$	$m_{2,3} = \frac{780 \cdot \pi \cdot 10,393^3}{627840}$ $m_{2,3} = 4381 \text{ g}$
--	--	--

Nødvendig masse ved utmattingsstest for prøvestaver med kline feil

$m_{3,1} = \frac{780 \cdot \pi \cdot 10,303^3}{627840}$ $m_{3,1} = 4269 \text{ g}$	$m_{3,2} = \frac{780 \cdot \pi \cdot 10,177^3}{627840}$ $m_{3,2} = 4114 \text{ g}$	$m_{3,3} = \frac{780 \cdot \pi \cdot 10,280^3}{627840}$ $m_{3,3} = 4240 \text{ g}$
--	--	--

B-2 UTREGNING PROSENTVIS REDUKSJON AV UTMATTINGSLEVETID VED MASKINERINGSFEILENE.

$$N_{\text{reduksjon}} = \left(1 - \frac{\bar{N}_{\text{feiltype}}}{\bar{N}_{\text{uten feil}}} \right) \cdot 100$$

$$N_{\text{reduksjon(sperring)}} = \left(1 - \frac{45150}{81806} \right) \cdot 100$$

$$N_{\text{reduksjon(sperring)}} = 44,8 \%$$

$$N_{\text{reduksjon(klining)}} = \left(1 - \frac{32348}{81806} \right) \cdot 100$$

$$N_{\text{reduksjon(klining)}} = 60,5 \%$$

B-3 UTREGNING AV UTMATTINGSGRENSER FOR PRØVESTAVENE BASERT
PÅ UTMATTINGSGRENSEN TIL STÅLET S355J2 + N

Overflatefaktor for prøvestaver uten feil

$$C_{f1} = 1 - 0,22 \cdot (\log(1,736))^{0,64} \cdot \log(490) + 0,45 \cdot (\log(1,736))^{0,53}$$

$$C_{f1} = 0,973856$$

Overflatefaktor for prøvestaver med sperringsfeil

$$C_{f2} = 1 - 0,22 \cdot (\log(6,538))^{0,64} \cdot \log(490) + 0,45 \cdot (\log(6,538))^{0,53}$$

$$C_{f2} = 0,884483$$

Overflatefaktor for prøvestaver med klinefeil

$$C_{f3} = 1 - 0,22 \cdot (\log(4,073))^{0,64} \cdot \log(490) + 0,45 \cdot (\log(4,073))^{0,53}$$

$$C_{f3} = 0,914963$$

Deretter kan spenningsamplituden beregnes

$$\sigma_D = 280 \cdot C_f$$

Estimert utmattingsgrense for prøvestaver uten feil

$$\sigma_D = 280 \cdot 0,973856$$

$$\sigma_{D1} = 272,68 \text{ MPa}$$

Estimert utmattingsgrense for prøvestaver med sperringsfeil

$$\sigma_D = 280 \cdot 0,884483$$

$$\sigma_{D2} = 247,66 \text{ MPa}$$

Estimert utmattingsgrense for prøvestaver med klinefeil

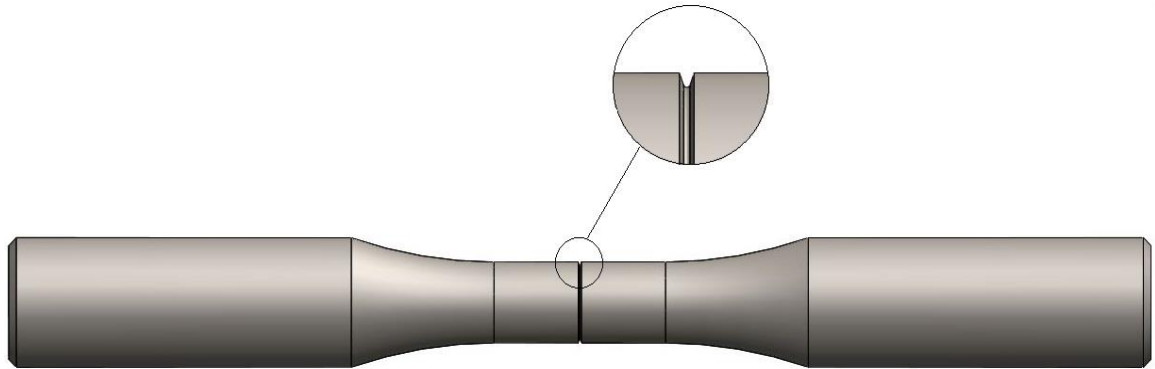
$$\sigma_D = 280 \cdot 0,914963$$

$$\sigma_{D3} = 256,19 \text{ MPa}$$

B-4 BEREGNING AV EKSEMPEL FOR REDUSERING AV SN KURVE FOR EN KJERVET PRØVESTAV

Beregningseksempel ved kjervet prøvestav:

Eksempel på reduksjon av utmattingsgrense ved en kjervet prøvestav.



Strekfasthet $R_m = 510 \text{ MPa}$

Overflateruhet $R_a = 10 \text{ }\mu\text{m}$

nesreradius dreistål = 0,2 mm

diameter bunn av kjerv = 9 mm

Spenningskonsentrasjonsfaktor $K_t = 2,76$ (ref til vedlegg).

Overflatefaktor:

$$C_F = 1 - 0,22(\log 10)^{0,64} \cdot \log 510 + 0,45(\log 10)^{0,53}$$

$$C_F = 0,8544$$

Størrelsesfaktor:

Størrelsesfaktoren vil bli 1 siden tykkelsen på prøvestaven og refereransetykkelsen er lik.

$$n = 0,10 + 0,15 \cdot \log 2,76$$

$$n = 0,1661$$

$$C_S = \left(\frac{10}{10}\right)^{0,1661}$$

$$C_S = 1$$

Lastfaktoren:

Forholdet mellom utmattingsgrensen for roterende bøyning og strekk – trykk ligger mellom 0,77 – 0,9. En konservativ verdi på 0,75 benyttes ofte ved dimensjonering av utmattingspåkjennte maskinelementer

$$C_L \approx 0,75$$

Kjervfaktoren:

$$a = 0,0254 \left(\frac{2070}{510}\right)^{1,8}$$

$$a = 0,3162$$

$$q = \frac{1}{1 + \frac{0,3162}{0,2}}$$

$$q = 0,3874$$

$$K_f = 1 + 0,3874(2,76 - 1)$$

$$K_f = 1,6818$$

Utmattingsgrensen ved 1000 sykler estimeres til:

$$\sigma_N = 0,9 \cdot 510 \cdot 0,8544 \cdot 1 \cdot 0,75$$

$$\sigma_N = 294,13 \text{ MPa}$$

Utmattingsgrensen ved 10^6 sykler kan estimeres til:

$$\sigma_D = 0,5 \cdot 510 \cdot 0,8544 \cdot 1 \cdot 0,75$$

$$\sigma_D = 163,40 \text{ MPa}$$

Utmattingsgrensen ved 10^6 sykler med kjerv:

$$\sigma_{D'} = 0,5 \cdot 510 \cdot 0,8544 \cdot 1 \cdot \frac{0,75}{1,6818}$$

$$\sigma_{D'} = 97,16 \text{ MPa}$$

MASKINERING CNC

ISO – Kodebokstaver (adressebokstaver)

A Rotasjon rundt x-aksen
B » » y-aksen
C » » z-aksen

F Matingsfunksjon (matningshastighet)

G Forberedende funksjon

I x-inkrement til sirkelsentrum

J y-inkrement til sirkulasjonssentrum

K z-inkrement til sirkulasjonssentrum

M Hjelpfunksjon

N Blokknummerering

S Spindelhastighet (r/min)

T Verktøyfunksjon

X Koordinatverdi i x-retningen

Y ____ » ____ i y- »

Z ____ » ____ i z- »

W Betegner en akse parallell med z-aksen

G-funksjonen (forberedende funksjon)

G 00 Forflytning med hurtiggang

G 01 Lineær bevegelse (F må oppgis)

G 02 Sirkulær bevegelse med urviseren (cw)

G 03 Sirkulær bevegelse mot urviseren (ccw)

G 04 Ventetid

G 08 Akselerasjon

G 09 Retardasjon

G 17 Valg av bearbeidingsplan xy

G-funksjoner

G 18 Valg av bearbeidingsplan zx

G 19 _____ » _____ yz

G 33 Gjengeskjæring, konstant stigning

G 40 Verktøykompensasjon slutt

G 41 Verktøykompensasjon venstre

G 42 Verktøykompensasjon høyre

G 54–59 Nullpunktets forflytning

G 63 Gjenging med tapp

G 70 Mål i tommer

G 71 Mål i millimeter

G 74 Forflytning til utgangsposisjon

G 80 Fast syklus slutt (for eksempel borsyklus)

G 81–89 Faste sykluser

G 90 Absolutt programmering

G 91 Inkrementell programmering

G 92 Innstilling av register (nullpunktforflytning)

G 94 Mating i mm/min

G 95 Mating i mm/omdreininger (mm/r)

G 96 Konstant skjærhastighet

M-funksjoner (hjelpfunksjoner)

M 00 Programstopp

M 01 Valgbar programstopp

M 02 Program slutt

M 03 Start spindel med urviseren

M 04 Start spindel mot urviseren

M 05 Spindel stopp, kjølevann av

M 06 Verktøybytte

M 07 Kjølevann på

M 08 Kjølevann på

M 09 Kjølevann av

M 10 Fastspenning av arbeidsstykke

M 11 Frigjøring av arbeidsstykke

M 13 Spindel start medurs, kjølevann på

M 14 Spindel start moturs, kjølevann på

M 19 Spindel stopp med orientering

av spindel i en bestemt vinkel

M 30 Programslutt, klar til ny start

M 59 Konstant spindelurtall

M 60 Bytte av arbeidsstykke

C-2 G-KODE FOR PRØVESTAVER

(UTMATTING-STAL-4-1.MIN)

(OUTPUT IN ABSOLUTE MILLIMETERS)

(GIBBSCAM VERSION, 12.0.2 64 BIT)

(FORMAT, OKUMA MULTUS U4000 OSP P300S 5AS NMBU BYIAML4734.59.10IM.POST)

(MDD, OKUMA MULTUS U4000 P300 4167.MDD REV, 3)

(VMM, OKUMA_MULTUS_U4000_4167.X64.VMM REV, 1.3.0.2)

(5-AXIS POST ENGINE REV, 0.)

(4/24/2018 AT 10:29 AM)

DRAW

VCHKX=40. (BAR DIA.)

VCHKZ=-150. (STOCK LENGTH)

NAP1

(OPERATION 1, TURN ROUGH)

(WORKGROUP)

(TOOL ID 0001, 0.8 RAD. 55-DEG. DIAMOND)

(DREI UTV GROV ST L)

(CS#1 - ZX PLANE)

G20 HP=1

MT=000101

TD=130001 M323

M01

BA=45.

MT=050101

NAT1 M109

G50 S3000

G97 S1459 M4 M42 M8 M142

G0 G90 G95 Z3.

X43.631

G18

Z1.209

G96 S200

G1 X43.212 Z1. F.3

Z.5

X-1.6

Z1.
G0 X43.212
G1 Z.5
Z0.
X-1.6
Z.5
X1.689 Z2.145 F6.
G0 Z3.
G20 HP=1
M5
M1
NAP2
(OPERATION 2, TURN HOLES)
(WORKGROUP)
(TOOL ID 501, 6.8 DIA. DRILL)
(6,8MM BOR, MAKS DYBDE 50MM)
(CS#1 - ZX PLANE)
G20 HP=1
TD=010501 M323
M01
BA=0.
MT=000101
G20 HP=1
NAT2 M109
G97 S800 M3 M41 M8 M142
G0 G90 G95 Z5.
X0.
G18
G1 Z9. F.254
G0 Z10.27
G1 Z8.
G0 Z9.27
G1 Z7.
G0 Z8.27
G1 Z6.
G0 Z7.27

G1 Z5.
G0 Z6.27
G1 Z4.
G0 Z5.27
G1 Z3.
G0 Z4.27
G1 Z2.
G0 Z3.27
G1 Z1.
G0 Z2.27
G1 Z0.
G0 Z1.27
G1 Z-1.
G0 Z.27
G1 Z-2.
G0 Z-.73
G1 Z-3.
G0 Z-1.73
G1 Z-4.
G0 Z-2.73
G1 Z-5.
G0 Z-3.73
G1 Z-6.
G0 Z-4.73
G1 Z-7.
G0 Z-5.73
G1 Z-8.
G0 Z5.
G20 HP=1
M5
M1
NAP3
(OPERATION 3, TURN ROUGH)
(WORKGROUP)
(TOOL ID 001, 0.8 RAD. 55-DEG. DIAMOND)
(DREI UTV GROV ST L)

(CS#1 - ZX PLANE)

G20 HP=1

TD=130001 M323

M01

BA=45.

MT=001101

G20 HP=1

NAT3 M109

G50 S3000

G97 S1592 M4 M42 M8 M142

G0 G90 G95 Z-.19

X45.

G18

G1 X40. F.3

G96 S200

X39.

Z-47.292

X40.

G0 Z-.19

G1 X39.

X38.

Z-47.292

X39.

G0 Z-.19

G1 X38.

X37.

Z-47.292

X38.

G0 Z-.19

G1 X37.

X36.

Z-47.292

X37.

G0 Z-.19

G1 X36.

X35.

Z-47.292
X36.
G0 Z-.19
G1 X35.
X34.
Z-47.292
X35.
G0 Z-.19
G1 X34.
X33.
Z-47.292
X34.
G0 Z-.19
G1 X33.
X32.
Z-47.292
X33.
G0 Z-.19
G1 X32.
X31.
Z-47.292
X32.
G0 Z-.19
G1 X31.
X30.
Z-47.292
X31.
G0 Z-.19
G1 X30.
X29.
Z-47.292
X30.
G0 Z-.19
G1 X29.
X28.
Z-47.292

X29.
G0 Z-.19
G1 X28.
X27.
Z-47.292
X28.
G0 Z-.19
G1 X27.
X26.
Z-47.292
X27.
G0 Z-.19
G1 X26.
X25.
Z-47.292
X26.
G0 Z-.19
G1 X25.
X24.
Z-47.292
X25.
G0 Z-.19
G1 X24.
X23.
Z-47.292
X24.
G0 Z-.19
G1 X23.
X22.
Z-47.292
X23.
G0 Z-.19
G1 X22.
X21.
Z-47.292
X22.

G0 Z-.19
G1 X21.
X20.
Z-47.292
X21.
G0 Z-.19
G1 X20.
X19.
Z-47.292
X20.
G0 Z-.19
G1 X19.
X18.
Z-47.292
X19.
G0 Z-.19
G1 X18.
X17.
Z-47.292
X18.
G0 Z-.19
G1 X17.
X16.
Z-1.271
G3 X16.4 Z-1.8 L.8
G1 Z-47.292
X17.
G0 Z-.19
G1 X16.
X15.
Z-.769
X15.931 Z-1.234
X16. Z-1.271
G0 Z-.19
G1 X15.
X14.

Z-.269
X15. Z-.769
G0 Z-.19
G1 X14.
X13.843
X14. Z-.269
G0 X60.
G97S3000
G20 HP=1
NAP4
(OPERATION 4, TURN ROUGH)
(WORKGROUP)
(TOOL ID 001, 0.8 RAD. 55-DEG. DIAMOND)
(DREI UTV GROV ST L)
G20 HP=1
TD=130001 M323
NAT4
G50 S3000
G97 S1605 M4 M42 M8 M142
G0 G90 G95 Z-45.176
X44.64
G18
X39.675
G96 S200
G1 X39.64 Z-45.186
X38.64
Z-106.26
X39.64
G0 Z-45.186
G1 X38.64
X37.64
Z-106.26
X38.64
G0 Z-45.186
G1 X37.64
X36.64

Z-106.26
X37.64
G0 Z-45.186
G1 X36.64
X35.64
Z-106.26
X36.64
G0 Z-45.186
G1 X35.64
X34.64
Z-106.26
X35.64
G0 Z-45.186
G1 X34.64
X33.64
Z-106.26
X34.64
G0 Z-45.186
G1 X33.64
X32.64
Z-106.26
X33.64
G0 Z-45.186
G1 X32.64
X31.64
Z-106.26
X32.64
G0 Z-45.186
G1 X31.64
X30.64
Z-106.26
X31.64
G0 Z-45.186
G1 X30.64
X29.64
Z-106.26

X30.64
G0 Z-45.186
G1 X29.64
X28.64
Z-106.26
X29.64
G0 Z-45.186
G1 X28.64
X27.64
Z-106.26
X28.64
G0 Z-45.186
G1 X27.64
X26.64
Z-106.26
X27.64
G0 Z-45.186
G1 X26.64
X25.64
Z-106.26
X26.64
G0 Z-45.186
G1 X25.64
X24.64
Z-106.26
X25.64
G0 Z-45.186
G1 X24.64
X23.64
Z-106.26
X24.64
G0 Z-45.186
G1 X23.64
X22.64
Z-106.26
X23.64

G0 Z-45.186
G1 X22.64
X21.64
Z-106.26
X22.64
G0 Z-45.186
G1 X21.64
X20.64
Z-106.26
X21.64
G0 Z-45.186
G1 X20.64
X19.64
Z-106.26
X20.64
G0 Z-45.186
G1 X19.64
X18.64
Z-106.26
X19.64
G0 Z-45.186
G1 X18.64
X17.64
Z-106.26
X18.64
G0 Z-45.186
G1 X17.64
X16.64
Z-106.26
X17.64
G0 Z-45.186
G1 X16.64
X16.382
G2 X15.64 Z-46.31 L59.2
G1 Z-104.822
G2 X16.599 Z-106.26 L59.2

G1 X16.64
G0 Z-46.31
G1 X15.64
G2 X14.64 Z-47.96 L59.2
G1 Z-103.172
G2 X15.64 Z-104.822 L59.2
G0 Z-47.96
G1 X14.64
G2 X13.64 Z-49.813 L59.2
G1 Z-101.318
G2 X14.64 Z-103.172 L59.2
G0 Z-49.813
G1 X13.64
G2 X12.64 Z-51.963 L59.2
G1 Z-99.169
G2 X13.64 Z-101.318 L59.2
G0 Z-51.963
G1 X12.64
G2 X11.64 Z-54.601 L59.2
G1 Z-96.53
G2 X12.64 Z-99.169 L59.2
G0 Z-54.601
G1 X11.64
G2 X10.64 Z-58.348 L59.2
G1 Z-92.783
G2 X11.64 Z-96.53 L59.2
G0 Z-58.348
G1 X10.64
G2 X10.04 Z-64.301 L59.2
G1 Z-86.831
G2 X10.64 Z-92.783 L59.2
G1 X14.459 Z-91.681 F6.
G0 X59.64

NAP5

(OPERATION 5, TURN ROUGH)

(WORKGROUP)

(TOOL ID 001, 0.8 RAD. 55-DEG. DIAMOND)

(DREI UTV GROV ST L)

NAT5

M8 M142

G0 G90 G95 Z-104.276

X44.64

X38.64

G1 Z-151.232 F.3

X39.64

G0 Z-104.26

X37.64

G1 Z-151.232

X38.64

G0 Z-104.26

X36.64

G1 Z-151.232

X37.64

G0 Z-104.26

X35.64

G1 Z-151.232

X36.64

G0 Z-104.26

X34.64

G1 Z-151.232

X35.64

G0 Z-104.26

X33.64

G1 Z-151.232

X34.64

G0 Z-104.26

X32.64

G1 Z-151.232

X33.64

G0 Z-104.26

X31.64

G1 Z-151.232

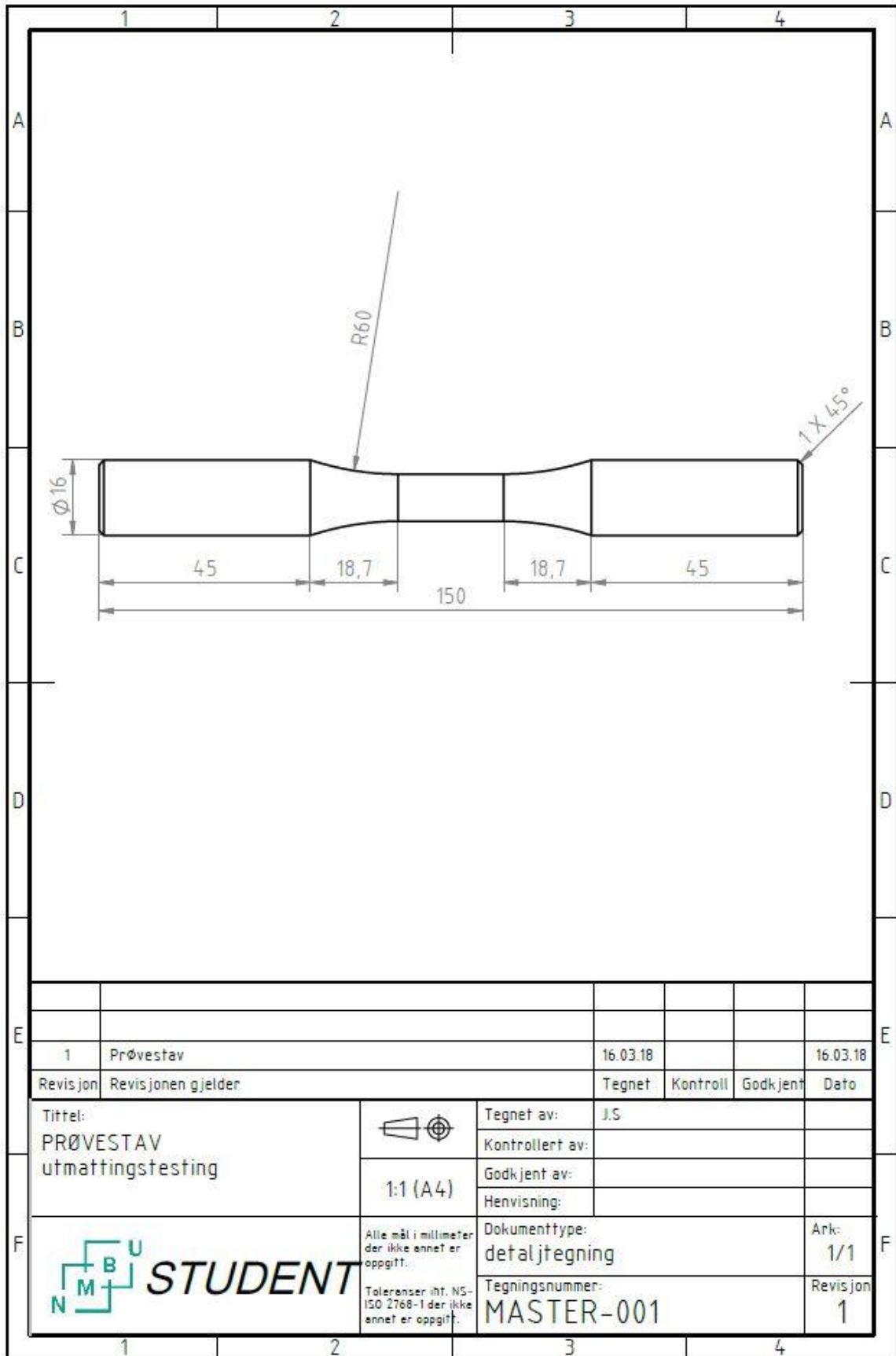
X32.64
G0 Z-104.26
X30.64
G1 Z-151.232
X31.64
G0 Z-104.26
X29.64
G1 Z-151.232
X30.64
G0 Z-104.26
X28.64
G1 Z-151.232
X29.64
G0 Z-104.26
X27.64
G1 Z-151.232
X28.64
G0 Z-104.26
X26.64
G1 Z-151.232
X27.64
G0 Z-104.26
X25.64
G1 Z-151.232
X26.64
G0 Z-104.26
X24.64
G1 Z-151.232
X25.64
G0 Z-104.26
X23.64
G1 Z-151.232
X24.64
G0 Z-104.26
X22.64
G1 Z-151.232

X23.64
G0 Z-104.26
X21.64
G1 Z-151.232
X22.64
G0 Z-104.26
X20.64
G1 Z-151.232
X21.64
G0 Z-104.26
X19.64
G1 Z-151.232
X20.64
G0 Z-103.95
X18.64
G1 Z-151.232
X19.64
G0 Z-103.637
X17.64
G1 Z-151.232
X18.64
G0 Z-103.493
X16.64
G1 Z-151.232
X17.64
G0 Z-103.47
X16.04
G1 Z-149.566
G3 X15.797 Z-149.99 L.8
G1 X15.64 Z-150.115
Z-151.232
X16.64
G0 Z-150.115
G1 X15.64
X14.64 Z-150.915
Z-151.232

X15.64
G0 Z-150.915
G1 X14.64
X14.245 Z-151.232
X14.64
X21.575 Z-149.23 F6.
G0 X59.64
G20 HP=1
M146
M5
M1
NAP6
(OPERATION 6, TAIL STOCK IN)
(WORKGROUP)
M5
NAT6
M56
M1
NAP7
(OPERATION 7, TURN CONTOUR)
(WORKGROUP)
(TOOL ID 011, 0.4 RAD. 35-DEG. DIAMOND)
(CS#1 - ZX PLANE)
G20 HP=1
TD=040011 M323
M01
BA=45.
MT=000101
G20 HP=1
NAT7 M109
G50 S3000
G97 S3000 M4 M42 M8 M142
G0 G90 G95 Z-.511
X45.
G18
G1 X16. F.15

G96 S2000
Z-45.4
G3 X15.96 Z-45.525 L.4
G2 X10. Z-64.135 L59.6
G1 X50. Z-56.856
G0 X60.
NAP8
(OPERATION 8, TURN CONTOUR)
(WORKGROUP)
(TOOL ID 011, 0.4 RAD. 35-DEG. DIAMOND)
NAT8
M8 M142
G0 G90 G95 Z-86.665
X45.
G1 X10.
G2 X15.96 Z-105.275 L59.6
G3 X16. Z-105.4 L.4
G1 Z-149.4
X56. Z-142.121
G0 X60.
G97S3000
G20 HP=1
M5
M2
(FILE LENGTH, 7824 CHARACTERS)
(FILE LENGTH, 65.20 FEET)
(FILE LENGTH, 19.87 METERS)


D-1 KONSTRUKSJONSTEGNING AV PRØVESTAV



1	Prøvestav	16.03.18			16.03.18

Revisjon	Revisjonen gjelder	Tegnet	Kontroll	Godkjent	Dato
----------	--------------------	--------	----------	----------	------

Tittel: PRØVESTAV utmattingstesting	 1:1 (A4)	Tegnet av: J.S	
		Kontrollert av:	
		Godkjent av:	
		Henvisning:	

	Alle mål i millimeter der ikke annet er oppgitt. Toleranser iht. NS- ISO 2768-1 der ikke annet er oppgitt.	Dokumenttype: detaljtegning	Ark: 1/1
		Tegningsnummer: MASTER-001	Revisjon 1



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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway