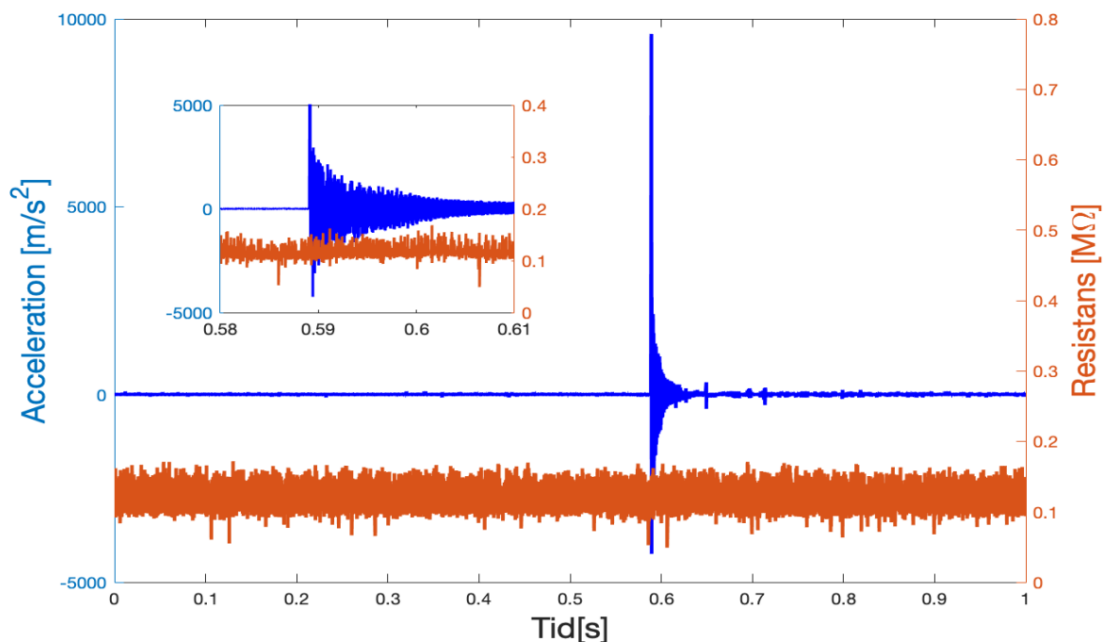




Ultravibrationer i mänskliga fingrar och hur fingrar förhåller sig till en vibrerande yta

Kandidatarbete inom mekanik och maritima vetenskaper

Marcus Alverstrand
Elin Dufvenius Esping
Jesper Lennartsson
Oskar Malm
Emelie Svensson

INSTITUTIONEN FÖR
MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER

KANDIDATARBETE 2021:06

Ultravibrationer i mänskliga fingrar och hur fingrar förhåller sig till en vibrerande yta

Kandidatarbete i mekanik och maritima vetenskaper

MARCUS ALVERSTRAND
ELIN DUFVENIUS ESPING
JESPER LENNARTSSON
OSKAR MALM
EMELIE SVENSSON

Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper

Avdelningen för dynamik

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2021

Ultravibrationer i mänskliga fingrar och hur fingrar förhåller sig till en vibrerande yta

MARCUS ALVERSTRAND, ELIN DUFVENIUS ESPING, JESPER LENNARTSSON,
OSKAR MALM, EMELIE SVENSSON

© MARCUS ALVERSTRAND, ELIN DUFVENIUS ESPING, JESPER LENNARTSSON,
OSKAR MALM, EMELIE SVENSSON, 2021

Examinator: Viktor Berbyuk, Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper

Handledare: Håkan Johansson, Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper

Handledare och klient: Hans Lindell, RISE

Kandidatarbete 2021:06

Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper

Chalmers tekniska högskola

SE-412 96 Göteborg

Sverige

Telefon: + 46 (0)31-772 1000

Omslag:

Resistansmätning för finger samt accelerationen för det vibrerande underlaget

Chalmers Digitaltryck
Göteborg, Sverige 2021

Abstract

The current standard (ISO 5349-1:2001) regarding measurements and risk assessment of vibrations from handheld machines and tools only takes account to vibrations up to 1250 Hz, meaning so-called ultra vibrations are not considered. There are uncertainties surrounding the risk of injury from these vibrations, due to the lack of data currently available. Because vibration-related injuries occurs for people, who according to the standard is subjected to a low vibration exposure, ultra vibrations are suspected to be harmful.

Previous research in this field has been done through theoretical studies which have used simulations using the finite element method (FEM). These studies have encountered two shortcomings. One being difficulties modelling the finger correctly, and to determine the condition between the vibrating surface and the finger.

To study this condition a set of resistance measurements were performed to investigate if the finger still had contact with the vibrating surface during the test. This study implies that the finger moves with the surface.

The extent of how vibrations propagate through human fingers was examined by using an LDV pointed towards the cuticles. During this period of the study various gloves was used to investigate its impact of the propagation. This was done to get an understanding of what type of gloves is best suited to protect fingers. According to our measurements the best pair of gloves are anti-vibration gloves which decreased the vibration level by 98%. Compared to nitrile gloves which decreased the level by 88%. These levels were measured at a low contact force. The suppression of vibrations refers to the combined effect of the finger and glove compared to the incoming vibration level.

Finally, the hands ability to act as a waveguide for vibrations was studied. This analysis revealed that the human hand is a bad wave guide as the vibration levels decreased rapidly with increased distance from the vibration source. This measurement was made at three points along the finger and one on the wrist.

Sammanfattning

Nuvarande standard (ISO 5349-1:2001) för mätning och riskbedömning av vibrationer tar endast hänsyn till vibrationer upp till 1250 Hz, och inte ultravibrationer. Det finns också osäkerheter kring skaderisken vid exponering av ultravibrationer på grund av bristande data på området. Då vibrationsskador uppstår hos personer som enligt standarden har en låg vibrationsexponering, misstänks ultravibrationer vara skadliga.

Tidigare studier på området har varit av teoretisk karaktär i form av simuleringar med hjälp av finita elementmetoden (FEM). Dessa har framförallt haft två brister. Det ena problemet är svårigheter med modelleringen av fingret, och det andra är att bestämma kontaktvillkoret mellan den vibrerande ytan och fingret.

För att studera kontaktvillkoret har resistansmätningar utförts för att se om fingret släpper från ytan, eller svänger med och behåller kontakt. Mätningarna indikerade att fingret inte släpper från den vibrerande ytan och uppvisar ingen tendens för att släppa vare sig helt eller delvis.

Den mån ultravibrationer utbreder genom ett fingret undersöktes genom att placera fingret på en ultravibrerande yta och mäta hastigheten på nagelbandet med en laserdopplervibrometer. Dessutom undersöktes hur väl olika typer av arbetshandskar skyddar mot vibrationerna genom att uppskatta till vilken grad handskar dämpar dem. De som bäst respektive sämst dämpar ultravibrationer enligt utförda mätningar är vibrationsisolerande handskar respektive nitrilhandskar. Dämpningsgraden uppmättes till 98% respektive 88% för låg anläggningskraft. Dämpningen syftar till den kombinerade effekten av finger och handske jämfört med den inkommande vibrationsnivån.

Till sist analyserades i vilken mån den mänskliga handen agerar som en vågledare för ultravibrationer. Det visades att vibrationerna fortplantas dålig i handen. Vibrationsnivån minskade kraftigt vid ökat avstånd från vibrationskällan vid fingerspetsen. Mätningar utfördes på tre punkter längs fingret och på handleden.

Förord

Projektet ultravibrationer i mänskliga fingrar har utförts på institutionen för mekanik och maritima vetenskaper på Chalmers tekniska högskola i samarbete med forskningsinstitutet RISE. Projektmedlemmarna kommer från programmen teknisk fysik, automation och mekatronik och samhällsbyggnadsteknik.

Vi vill börja med tacka våra handledare Hans Lindell och Håkan Johansson för all vägledning och stöd genom arbetets gång. Vidare vill vi tacka vår examinator Viktor Berbyuk för medverkan och visad entusiasm under möten. Slutligen vill vi även tacka Snaevar Gretarsson för hans hjälp samt RISE för möjligheten att utföra detta projekt hos dem.

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Syfte och problembeskrivning	1
1.2	Avgränsningar	2
1.2.1	Försöksgruppen	3
1.2.2	Fingrar	3
1.2.3	Teoretiska simuleringar	3
1.2.4	Uppställning	3
2	Bakgrund	4
3	Teori	6
3.1	Ultravibrationer och vibrationsskador	6
3.2	Fingrets anatomi	6
3.2.1	Huden och fingrets yttre materialegenskaper	6
3.2.2	Inre materialegenskaper	7
3.3	Elektrisk modell för uppskattning av ett mänskligt fingers resistans	7
3.4	Vibrationer genom en stålcylinder	8
4	Försöksuppställning	9
4.1	Excitering och lastcell	9
4.2	Kontakt mellan finger och cylinder	10
4.3	Kretschema	11
4.4	Laserdopplervibrometer	12
4.5	Signalinsamling	12
5	Mätningar	13
5.1	Förarbete	13
5.2	Mätprocedur	13
5.2.1	LDV-mätningar	13
5.2.2	Resistansmätning	15
6	Verifiering av metod	17
6.1	Kontroll av uppställning	17
6.1.1	Relatera stötförloppet till resistansförändring	17
6.1.2	Repetierbarhet	21
6.2	Statiska mätningar utan ultravibrationer	23
7	Resultat	25
7.1	Utbredning av ultravibrationer genom fingret	25
7.1.1	Behandskade fingrar	30
7.1.2	Fingret som vägledare	36
7.2	Resistansmätning för kontaktvillkor	37
8	Diskussion	41
8.1	Utbredning av ultravibrationer genom fingret	41
8.2	Bestämmelse av kontaktvillkor	42
8.3	Verifiering av metod	42
8.3.1	Kontroll av uppställningen	42
8.3.2	Statiska mätningar	43
8.4	Felanalys	43
8.4.1	Försöksgrupp	43

8.4.2	Uppställning	44
8.5	Rekommendationer till vidare studier	44
9	Slutsatser	46
	Referenser	47
A	Övriga mätningar	
B	Videor stötförlopp	
C	Härledning	
D	Försöksgruppens fingrar	

Förkortningslista

FEM: Finita elementmetoden är en numerisk metod för att lösa partiella differentialekvationer.

FFT: Fast Fourier Transform, som används för att beräkna en diskret fouriertransform.

FPX: Står för försökspersoner (**FP**), där $\mathbf{X} \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$.

HAVS: Hand-arm-vibrationssyndrom, dessa skador syftar primärt till tre olika typer: neurologiska skador, vaskulära skador och muskel-skelettskador.

HX: Står för fingrarna på höger hand. **H** står för höger och $\mathbf{X} \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$ där 1 står för tumme, 2 pekfinger, 3 långfinger, 4 ringfinger och 5 står för lillfinger.

KX: Står för lederna i ett finger. **K1** är distal interfalangeal, **K2** är proximal interfalangeal och **K3** är metacarpofalangeal.

ISO: Är den internationella standardiseringsorganisationen, som är en icke-statlig organisation.

LDV: Laserdopplervibrometer, som används för att utföra kontaktlösa vibrationsmätningar.

VX: Står för fingrarna på vänster hand. **V** står för vänster och $\mathbf{X} \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$ där 1 står för tumme, 2 pekfinger, 3 långfinger, 4 ringfinger och 5 står för lillfinger.

1 Inledning

Utgångspunkten i arbetet är att experimentellt undersöka hur vibrationer med frekvenser som överskrider 1250 Hz, så kallade ultravibrationer, utbreder sig i mänskliga fingrar. Det är av intresse då dagens ISO-standard (ISO 5349-1:2001) för mätning och riskbedömning av vibrationer inte tar hänsyn till frekvenser högre än 1250 Hz [1]. Dessutom finns det misstankar om att standardens frekvensbegränsning underskattar skaderisken för vibrationsskador vid ultrafrekventa vibrationer. Tidigare studier inom området har varit av teoretisk karaktär där simuleringar har utförts för att se hur ultravibrationer utbreder sig i fingrar. Under de studierna har det uppfattats problematiskt att modellera fingret och bestämma kontaktvillkoret mellan den stela ultravibrerande ytan och fingret under vibrationsförloppet. Alltså är det intressant att studera detta kontaktvillkor experimentellt. Resultaten kan användas för att jämföra tidigare simulerade förlopp samt för eventuella förbättringar i simuleringarna. Till sist är det viktigt att tilläggas att denna rapport inte undersöker vibrationsskor och dess effekter, utan som tidigare nämnts kommer resultatet kunna användas för att förbättra nuvarande simuleringar.

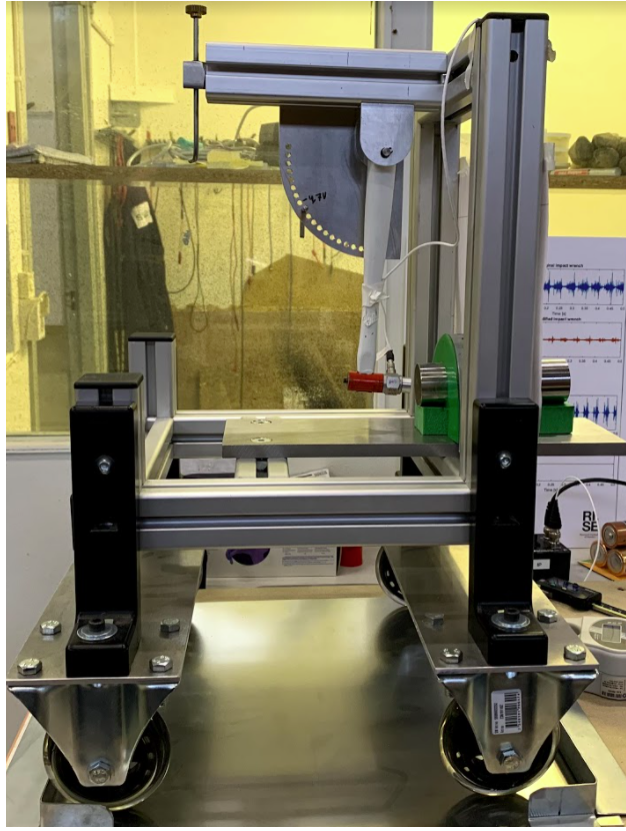
1.1 Syfte och problembeskrivning

Syftet är att studera i vilken utsträckning ultravibrationer dämpas av mänsklig vävnad, med fokusering på fingrar och undersökning hur olika parametrar och arbetshandskar påverkar utbredningen. Mer specifikt är syftet att testa hypotesen som uppkommit från simuleringarna om att fingret kan släppa från en stel yta vid stötvågor med högt frekvensinnehåll samt bestämma amplituden av accelerationen på transienten av dessa högfrekventa vibrationer. På sikt skulle resultaten från projektet kunna användas för att påverka standarderna som finns idag för vibrerande verktyg och sprida kunskap om vibrationsskador som kan uppstå.

Om en ny uppdaterad standard kan framtas skulle det ge incitament till tillverkare av maskiner och verktyg att förbättra sina produkter i ett vibrationsavseende, vilket eventuellt kan minska förekomsten av arbetsskador orsakade av vibrationer.

Målet med studien är att experimentellt undersöka hur ultravibrationer överförs till mänsklig vävnad från en stel yta och hur kontaktvillkoret mellan finger och yta påverkas av olika parametrar. Ultravibrationerna alstras med förslagen försöksuppställning från RISE genom att excitera vibrationella moder hos en stålcylinder med högfrekventa egenfrekvenser. Uppställningen utnyttjar stötförloppet mellan en fallande hammare och cylindern och presenteras i figur 1. Genom att mäta resistansen mellan cylindern och ett finger under stötförloppet kan kontakten däremellan uppskattas. Om fingret släpper sker ett elektriskt avbrott och resistansen går mot oändligheten. För att mäta amplituden av vibrationerna används en laserdopplervibrometer.

Studien genomförs experimentellt då det inte finns tillräckligt med kunskap inom området, vilket gör modeller och simuleringar med FEM otillräckliga på grund av osäkerheten hos kontaktvillkor och modellparametrar.



Figur 1: Fotografi taget på föreslagen försöksuppställning för att alstra ultravibrationer genom att med stöten från en fallande hammare excitera vibrationella moder i en stålcyllinder. Uppställningen är monterad på hjul för att kunna mäta effekten av olika anläggningskrafter på cylinderns buk.

Kontaktvillkoret mellan två ytor kan antas bero på parametrar som ytråhet och belastning. Utbredningen av vibrationer beror på parametrar som vågmediets elasticitetsmodul och densitet. Likvärdiga parametrar applicerade för att studera ett finger i kontakt med en stel vibrerande yta kommer därför att försöka varieras.

Studien ämnar till att svara på följande frågor via experimentell undersökning:

- I vilken mån ultravibrationer utbreder genom ett finger för olika belastningar och materialparametrar?
 - Hur utbreder ultravibrationer genom ett behandskat finger, olika typer av arbetshandskar, nitrilhandskar och vibrationsisolerande handskar? Bidrar handskar till att dämpa ultravibrationers propagerande genom fingret?
- Hur ser kontaktvillkoret ut mellan finger och stel vibrerande yta? Släpper fingret från ytan?
 - Hur påverkas kontaktvillkoret av olika belastningar och amplituder av ultravibrationer samt fingrets olika materialparametrar som fuktighet, hudtjocklek och fingerdimensioner?

1.2 Avgränsningar

För att kunna genomföra projektet under den givna tiden och att ha hög repeterbarhet för mätningarna behöver följande avgränsningar göras.

1.2.1 Försöksgruppen

Försöksgruppen består av fem icke-slumpvalda personer, två kvinnor och tre män i 20-årsåldern. Gruppen kan därmed inte representera befolkningen i stort då den innehåller få personer samt att åldersspannet är smalt. Det finns inte heller några nämnvärda sjukdomar som skulle kunna påverka resultatet.

1.2.2 Fingrar

Fingrar med olika temperaturer hade varit av intresse att studera då vissa arbetar utomhus, vilket innebär temperaturvariationer från dag till dag. Det är dock problematiskt att variera fingrets temperatur på ett repeterbart sätt under olika mätningar på grund av att kroppen strävar efter att hålla kroppstemperaturen på en jämn nivå. Dessutom så bidrar värmeöverföring från omgivningen till temperaturvariationer som inte kan kontrolleras. Att ta hänsyn till temperaturen skulle bidra till stora osäkerheter och minska repeterbarhet vid mätningarna. Det bestämdes därmed att fingrets temperatur inte skulle varieras utan hållas vid kroppstemperatur.

1.2.3 Teoretiska simuleringar

Då projektet är en experimentell studie, studerades inte teoretiska modelleringar av fingrar. Dock kommer framtida modelleringar och simuleringar förhoppningsvis kunna baseras på de resultat som denna studie presenterar.

En stor osäkerhetsfaktor i de teoretiska simuleringarna är hur kontakt mellan den vibrerande maskinen och fingret skall modelleras. Mer precis handlar det om fingrets kontaktvillkor mot den vibrerande ytan. För att förenkla framtida modelleringar studeras endast en del av fingret, den distala falangen, med statisk tryckkraft mot en stel yta.

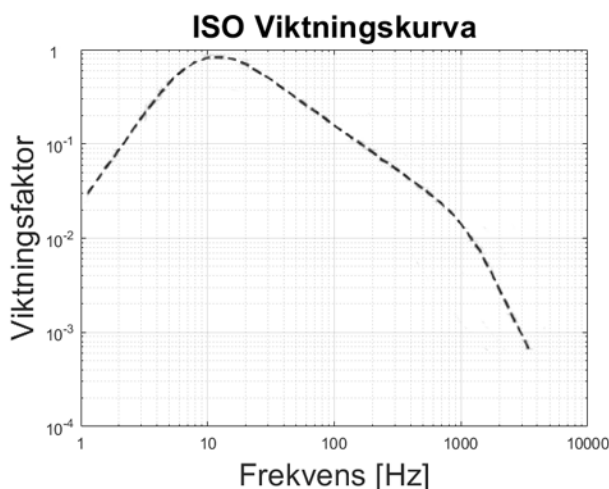
1.2.4 Uppställning

Den elektriska kontaktytan mellan finger och cylinder kommer hållas liten, det görs för att inte ta hänsyn till fingrets kurvation och för att användas i FEM-simuleringar. Den cirkulära ledande ytan är placerad i mitten av cylinderns buk.

2 Bakgrund

Enligt en rapport från Arbetsmiljöverket från 2018 framkommer det att cirka 10% av alla sysselsatta i Sverige utsätts för vibrationer från handhållna maskiner [2]. Mer specifikt innebär det personer som använder dessa redskap under åtminstone en fjärdedel av sin arbetstid. Yrken där vibrerande redskap förekommer är exempelvis snickare, bilmekaniker och tandläkare. En typ av vibrationskador som kan uppstå efter användandet av vibrerande verktyg och maskiner är så kallade hand-arm-vibrationssyndrom, ofta förkortat HAVS. Dessa skador är primärt av tre typer: neurologiska, vaskulära och muskel-skelett-skador [3].

Anledningen till att det är av intresse att studera ultravibrationers påverkan på mänskliga fingrar är på grund av det faktum att de faller utanför den nuvarande ISO-standard (ISO 5349-1:2001) som endast tar hänsyn till vibrationer med frekvenser upp till 1250 Hz [1]. Som det framgår i figur 2, viktas sedan högre frekvenser mycket lågt.



Figur 2: Återskapad viktningskurva för ISO 5349-1:2001.

Det tas alltså liten hänsyn till högre frekvenser, vilka eventuellt skulle kunna vara skadliga. Orsaken till att det finns misstankar om att ultravibrationer kan vara skadliga trots denna standard är för att det fortfarande uppstår vibrationsskador hos arbetare som enligt standarden har låg vibrationsexponering, vilket stärker misstankarna att nuvarande standard är otillräcklig. Nämnvärt är att vibrationsskador oftast uppkommer först efter flertalet år av exponering.

Tidigare studier har undersökt skjuvmodulen för ett fingeravtryck och simulerat hur transienta chockvågor propagerar genom fingervävnaden [4] [5]. Tidigare simuleringar baseras ofta på finita elementmodeller av fingrarna. I de studier som simulerat hur vibrationer propagerar in i fingrarna har randvillkoret mellan den vibrerande ytan och fingret varit osäkert. Större kunskap kring randvillkoret och mer experimentell data skulle kunna bidra till att förbättra dessa simuleringar och föra utvecklingen framåt.

I hopp om att uppdatera standarden startades RISE:s projekt noll vibrationsskador. April 2021 togs ett stort första steg då ultravibrationer omnämns i förslaget till revisionen av EU:s maskindirektiv. Projektet gav underlag till Arbetsmiljöverkets skrivning som gick vidare. För handhållna maskiner instrueras amplituden av accelerationen för transienter att uppmätas. Revisionen inkluderar även krav för att bättre kunna mäta maskinernas vibrationer. [6]

En tidigare studie som utförts på området har teoretiskt simulerat hur transienta vibrationer propagerar i mänsklig vävnad genom att använda en FEM-modulering [5]. Där kunde det visas att olika anläggningsstryck påverkar propageringen av vibrationerna igenom fingret men också att dess bulkmodul inte har stor påverkan. Även studien [7] har utfört simuleringar av fingret med hjälp av FEM. Då dessa tidigare studier är av teoretisk karaktär är experimentella studier viktiga för att kunna verifiera simuleringarna som tidigare utförts. Genom att utföra mänskliga försök finns möjligheten att kunna observera individuella skillnader mellan olika människor och hur detta påverkar vibrationernas propagering. Det har också funnits osäkerheter kring hur fingrets kontakt ser ut mot metallytan när den vibrerar.

Både individuella skillnader och kontaktvillkoret för fingret har som tidigare nämnts varit bristande i föregående studier. Detta är något som behandlas i denna studie. Kontaktvillkoret studeras genom att utföra resistansmätningar mellan cylindern och fingret, där den uppmätta resistansen speglar fingrets kontakt.

3 Teori

Följande avsnitt beskriver begreppet ultravibrationer och skador som kan uppstå på grund av dem. Vidare behandlas fingrets yttre och inre materialegenskaper samt den elektriska modellen som används för att uppskatta fingrets resistans.

3.1 Ultravibrationer och vibrationsskador

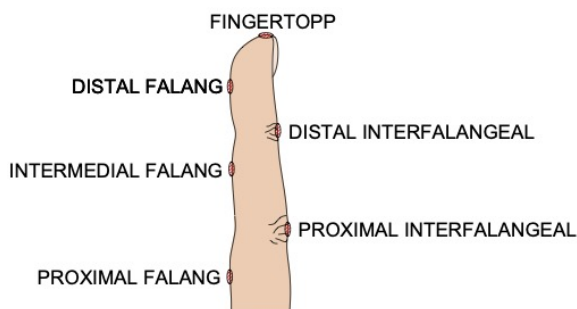
Begreppet ultravibrationer syftar till vibrationer vars frekvens överstiger frekvensen som specificeras i ISO-standarden, det vill säga 1250 Hz. Vilket kan relateras till ultraljud som har frekvenser över 20 kHz vilket motsvarar gränsen för människans hörsel.

De vanligaste skadorna som kan uppstå efter exponering för vibrationer faller under kategorin hand-arm-vibrationssyndrom, förkortat HAVS. Dessa skador delas in i tre underkategorier: vaskulära, neurologiska och muskel-skelett-skador. Det mest etablerade symptomet av HAVS är de vaskulära skadorna. Dessa skador är kända som Raynauds fenomen, även kallat vita fingrar, som orsakar minskat blodflöde vilket kan ge svår smärta i drabbade områden. För att minimera konsekvenserna av dessa skador bör man minska exponering för vibrationer, samt kyla. Även rökning kan förvärra symptomen. [8]

Vanligen är det fingertopparna på ett eller flera fingrar som får det typiska utseendet för vibrations-skador, det vill säga vita fingrar. Tummen klarar sig bättre från dessa skador jämfört med andra fingrar. Följden av skadorna innefattar bland annat nedsatt känsel, reducerad handkraft och försämrad finmotorik. [8]

3.2 Fingrets anatomi

Fingret sammanfogas av ligament, senor och tre falanger, den distala, intermediale samt proximala. Tummen saknar den intermediale falangen. Samtliga falanger är markerade i figur 3. Vävnaden på det mänskliga fingret är komplex. Huden är sannolikt viskoelastisk, icke-linjär, anisotrop och heterogen. En modell som reflekterar alla dessa egenskaper skulle bli mycket komplicerad inte minst om fingrets flerdelade anatomi tas i beaktelse. Utöver karakteriseras fingret typografiskt av fingeravtrycket och används frekvent taktilt då det är delen av huden med näst högst koncentration känselreceptorer.



Figur 3: Illustration av ett finger med falangerna, fingertoppen och lederna markerade.

3.2.1 Huden och fingrets yttre materialegenskaper

Fingrets hud kan förenklat ses som treskiktat, överhuden epidermis, läderhuden och underhuden. Det yttersta skiktet av epidermis är stratum corneum. Stratum corneum är likt en barriär som skyddar underliggande vävnad från infektioner, uttorkning, kemikalier och mekaniska spänningar [9].

Det saknas allmänt accepterade och entydiga materialdata för fingrets hudlager. Orsaken ligger i de väldigt spridda materialegenskaperna vars fastställande är ytterst individuellt. Hudlagrens tjocklek

varierar stort mellan olika personer, översiktligt kan stratum corneum ha en tjocklek varierande mellan 25-40 μm och epidermis mellan 80-210 μm [5]. Som en yttersta barriär påverkas materialegenskaperna av likväl genetik som omgivning. Stratum corneum kan generellt beskrivas som icke-linjär och viskoelastisk. I ett torrt stadium och vid tillräckligt hög belastning kan hudlagret approximeras som elastoplastiskt men då fuktigt blir hudlagrets elasticitetsmodul lägre och beskrivs mer som elastisk eller viskoelastisk [10].

En torr hands resistans kan vara mer än 100 k Ω på grund av det tjocka lagret av döda celler i stratum corneum. Resistansen kan sjunka vid skador som penetrerar huden samt av fuktig hud, exempelvis svett vilket resulterar i att ström lättare kan förbipassera hudens resistans. [11]

3.2.2 Inre materialegenskaper

Den elektriska konduktiviteten hos blod är beroende av ett antal faktorer. De två beståndsdelarna som påverkar detta är röda blodkroppar samt plasman i blodet. För stillastående blod påverkas konduktiviteten av andelen röda blodkroppar, temperatur, osmolalitet och joninnehåll hos plasman. Utöver presenterade faktorer är även konduktiviteten hos blodet beroende på dess hastighet genom kroppen. [12]

Den elektriska konduktiviteten hos blod minskar bland annat vid långsammare blodflöde och då antalet röda blodkroppar ökar. På samma sätt ökar konduktiviteten då blodflödet ökar och antalet röda blodkroppar minskar. Det finns även kliniska tillstånd som påverkar konduktiviteten hos blodet. Exempelvis kan leukemi och diabetes i samband med högt blodsocker resultera i att konduktiviteten minskar. Tillstånd som kan förbättra ledningsförmågan är anemi samt en ökad volym av plasma i blodet. [13]

3.3 Elektrisk modell för uppskattning av ett mänskligt fingers resistans

Resistansen genom en cylindrisk ledare ges av,

$$R_{ledare} = \rho \frac{L}{A} \quad (1)$$

där ρ är materialets resistivitet, L längden och A tvärsnittsarean [14]. En stålcynders resistans kan då bestämmas som

$$R_{cyl} = \rho_{stål} \frac{L_{cyl}}{D_{cyl}^2 \frac{\pi}{4}} \quad (2)$$

där $\rho_{stål}$ är stålets resistivitet, L_{cyl} avståndet mellan kontaktytan och ledaren på cylindern och D_{cyl} cylinderns diameter.

Under avsnitt 3.2 beskrivs fingrets hudlager som treskiktat. Ur en elektrisk synpunkt kan det förenklat ses som två skikt, en isolator och ett ledande lager [15]. En modell av fingret ger då att det isolerande lagret, stratum corneum, kan representeras av en resistans R_{sc} parallellkopplad med en kapacitans C_{sc} i serie med resistansen R_{finger} för resterande delar av fingret och det ledande lagret vilket totalt blir en impedans Z_{tot} [16]. På samma sätt för cylindern bestäms då resistansen för stratum corneum som

$$R_{sc} = \rho_{sc} \frac{d_{sc}}{A_{kontakt}} \quad (3)$$

där ρ_{sc} är resistiviteten av stratum corneum, d_{sc} dess tjocklek och $A_{kontakt}$ kontaktytan mellan fingret och en ledare. Liknande kan kapacitansen för stratum corneum uttryckas som

$$C_{sc} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{sc} A_{kontakt}}{d_{sc}} \quad (4)$$

där ϵ_0 och ϵ_{sc} är permittiviteten i vakuum respektive den relativa för stratum corneum [16]. Den totala resistansen R_{finger} av fingret kan på samma sätt uttryckas som

$$R_{finger} = \rho_{finger} \frac{L_{finger}}{D_{finger}^2 \frac{\pi}{4}} \quad (5)$$

där ρ_{finger} är fingrets resistivitet, L_{finger} avståndet mellan kontaktytan och ledaren på fingret och D_{finger} fingrets diameter.

3.4 Vibrationer genom en stålcyllinder

Egensvängningar, eller egenmoder hos en stålcyllinder eller ett allmänt oscillerande system är ett rörelsemönster där alla delar av systemet rör sig sinusformat och med samma frekvens. Frekvenserna vilket systemet svänger med är diskreta och kallas resonansfrekvens eller egenfrekvens och beror på dimension, material och randvilkor med mera. Den mest generella rörelsen hos ett system sker som en superposition av dess egenmoder.

Då en extern kraft appliceras på en cylinder kan flera olika typer av vibrationella moder exciteras, stelkropp, böj, tvist och longitudinella. Mekaniska longitudinella vågor kallas även för kompressionsvågor. Då en extern kraft appliceras normalt en cylinderbuk kommer de longitudinella moderna dominera i superpositionen av olika exciterade moder.

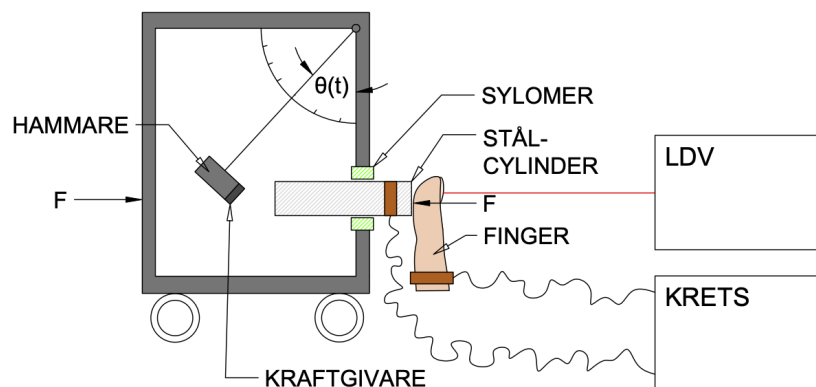
För en stålcyllinder med en diameter på 36 mm och längd 120 mm presenteras i tabell 1 simuleringsresultat över egenmoder och respektive egenfrekvens erhållet från en finita element modell.

Tabell 1: Egenmoder och respektive egenfrekvens för en 120 mm stålcyllinder, FEM-simulering [17].

Egenmod	Modnummer	Egenfrekvens [Hz]
Böj	1	9547,95
	2	21195,3
	3	34055,9 & 34056,1
	4	45743,2 & 45743,9
Longitudinell	1	21318,8
	2	41919,9

4 Försöksuppställning

Figur 4 visar schematiskt uppställningen som användes för att studera kontakten mellan finger och en yta utsatt för ultravibrationer samt utföra LDV-mätningar. Ingående komponenter beskrivs i följande avsnitt.

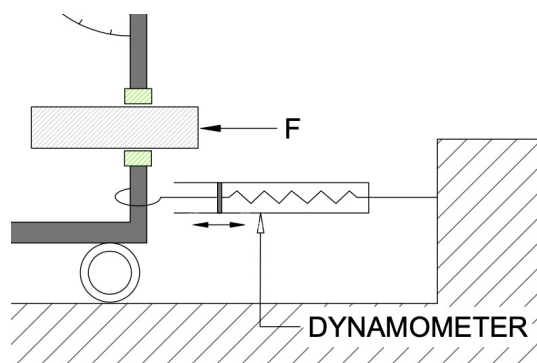


Figur 4: Schematisk figur över försöksuppställningen och ingående komponenter, vagn med fallande hammare och kraftgivare, fastmonterad stålcylinder, LDV och elektrisk krets vilket stålcylinder och finger kopplas till.

4.1 Excitering och lastcell

För att alstra en ultravibrationell impuls utnyttjades stötförloppet hos en fallande hammare. I hammarens pendelrörelse, vid $\theta = 0^\circ$, monterades en stålcylinder med en diameter på 36 mm och längd 120 mm i anordningen delvis klädd i sylomer. Sylomer är en form av skummad polyuretan. Då hammaren slår mot cylindern exciteras vibrationella böj och longitudinella moder vars högfrekventa egenfrekvenser presenteras i tabell 1. Cylinderns vibration uppvisar i begynnelsen av exciteringen en transient acceleration. Hammarhuvud och hammarvikt hade möjlig variation mellan stål, aluminium och gummi respektive 28 g, 76 g och 104 g. För att relatera fallhöjd och kraften hos stötförloppet installerades en accelerometer på hammaren i form av en pizokristall.

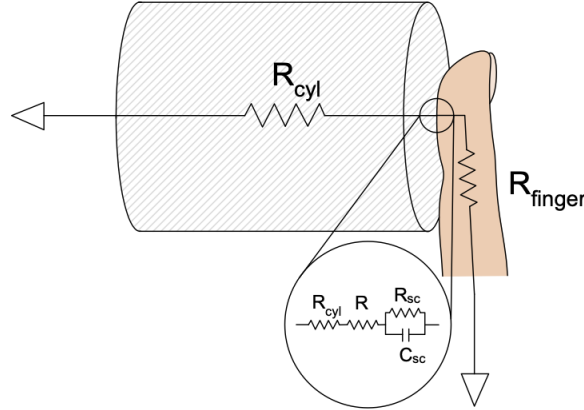
För att mäta en anläggningskraft F på cylindern monterades anläggningen på hjul. Kraften mättes med en dynamometer förankrad i anläggningen under cylindern likt i figur 5. På grund av sina hjul kunde anläggningen förflyttas av slagkraften från hammaren, därför placerades en motvikt (804 g) på uppställningen vilken dynamometern tarerades mot.



Figur 5: Schematisk figur över placering av dynamometer för att mäta en anläggningskraft F .

4.2 Kontakt mellan finger och cylinder

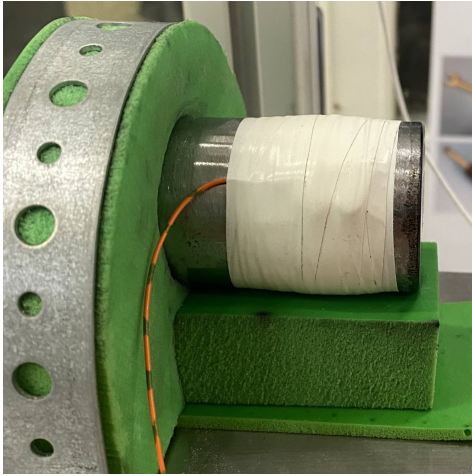
För att studera kontakten mellan ett finger och en stel vibrerande yta, mer specifikt avståndet däremellan, kan resistansförändringen uppmätas. Kontakten går att modellera genom en seriekoppling av stålcylinders resistans R_{cyl} , en resistans R och fingrets totala impedans Z_{tot} . Kontakten illustreras schematiskt i figur 6. Härledning och utförligare beskrivning för R_{cyl} och Z_{tot} finns under 3.3.



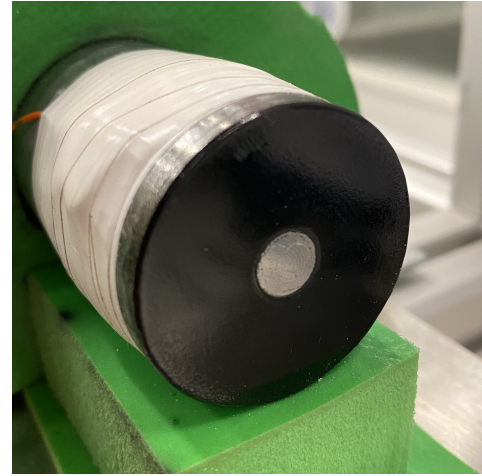
Figur 6: Elektrisk modell för kontakten mellan en ledande cylinder och ett finger. R_{cyl} är cylinderns resistans, R_{finger} fingrets interna resistans och R_{sc} samt C_{sc} är resistansen respektive kapacitansen för fingrets yttersta lager stratum corneum.

Förändringen av R indikerar tillståndet av kontakten mellan cylindern och fingret. Om kontakten mellan finger och yta bryts sker ett elektriskt avbrott vilket leder det till att R går mot oändligheten. För att uppmäta resistansförändringen kopplades cylindern och fingret in till en elektrisk krets, figur 9, genom att linda koppartråd runt cylindern respektive mässingsfolie runt fingret.

Då fingrets utbredning påverkas av dess anläggningskraft avgränsades kontaktytan mellan fingret och cylindern genom att isolera en större del av cylinderns buk. Ytan isolerades genom att först täcka den med ett tunt lager färg och sedan klarlack. Ytans ledningsförmåga kontrollerades mot Z_{tot} med multimeter och dess resistans uppmättes till större än maximalt utslag på multimetern vilket indikerade en resistans av storleksordning minst 10^2 relativt fingrets. Ytan approximerades därför som isolerande. Det isolerande lagret var tunt för att efterlikna villkoren använda i simuleringarna, och därför inte placera kontaktytan i en inbuktning. Kontaktytan hölls även liten, diameter 8.11 mm, för att försumma effekten av fingrets runda krökning. Kontakt till krets och isolerad yta framfår i figur 7 respektive 8.



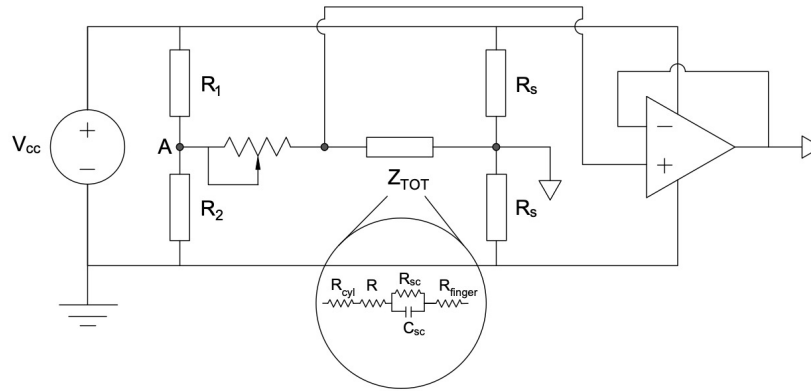
Figur 7: Fotografi taget på stålcyldern monterad i anläggningen från sidan med kopplartejp lindat runt och eltejp skyddande från omgivning.



Figur 8: Fotografi taget på cylinderns elektriskt isolerande yta med ett ledande cirkulärt tvärsnitt med diameter 8,11 mm.

4.3 Kretschema

Markerat i figur 4 som *KRETS* är kopplingen som användes för att indirekt mäta resistansförändringen av R genom att mäta spänningen över Z_{tot} . Kretsens kopplingsschema framgår i figur 9. Kretsen består av en spänningsdelning mellan en potentiometer ($0\ \Omega - 5\ \text{M}\Omega$) som referensspänning och Z_{tot} vars signal kopplades vidare till en spänningsföljare. Spänningsföljaren kopplades med en operationsförstärkare, LM324N, och med en matningsspänning $V_{cc} = 30\ \text{V}$. Signaljord infördes mellan resistorna R_s och därmed vid $\frac{1}{2}V_{cc}$. Resistanskedjan R_1 och R_2 infördes för att skydda operationsförstärkaren för överspänning orsakat av avbrott mellan finger och cylinder ($R \rightarrow \infty$).



Figur 9: Kretschema över kretsen för resistansmätning av fingeret.

Samtliga mätningar utfördes relativt signaljorden vid 15 V relativt jord mellan motstånden R_s (10 k Ω). De två resistorna R_1 och R_2 dimensionerades sådant att utspänningen från operationsförstärkaren inte översteg 10 V relativt signaljorden. Detta krävdes då den A/D-omvandlaren som användes har ett mätområde på $\pm 10\ \text{V}$.

4.4 Laserdopplervibrometer

En laserdopplervibrometer (LDV) är ett instrument som används för att beröringsfritt mäta vibrationen hos en yta. Laserstrålen riktas mot ytan, vibrationens amplitud och frekvens extraheras från dopplershiftningen av den reflekterade laserstrålens frekvens orsakat av ytans rörelse. Utsignalen från en LDV är typiskt en spänning proportionell till vibrationens hastighetskomponent i den riktning lasern rikts.

För att mäta hastigheten av vibrationen på cylindern och fingret användes en Polytec OFV 302 laserdopplervibrometer. LDV:n ställdes in på "fast tracking filter", hastighetsintervall 125 mm/s/V, hastighetsfilter 100 kHz och "displacement range" på 80 $\mu\text{m}/\text{V}$.

4.5 Signalinsamling

Utsignalen (spänning) från *KRETS* och LDV:n (spänning) kopplades till en A/D-omvandlare som anslöts till ett LabVIEW-program. Programmet kördes med en samplingfrekvens på 1 MHz och filtrerade kretsens utsignal med ett sjätte ordningen Bessel-lågpåssfilter vid brytfrekvensen 100 kHz.

5 Mätningar

För att bestämma kontaktvilkoret mellan fingret och en ultravibrerande yta samt ge en uppskattning av hur vibrationerna utbreder sig i fingret utfördes experimentella mätningar. I följande kapitel beskrivs försöksutförandet uppdelat i förarbete som utförs innan påbörjad mätning och mätprocedur för LDV-mätning respektive resistansmätning. Tre huvudsakliga faktorerers påverkan undersöktes, olika anläggningskrafter, fingrar och personer samt olika arbetshandskar.

5.1 Förarbete

För utförande av en mätning med LDV:n behövs en högreflexiv yta. En bra signal uppmättes genom att utnyttja fingernageln. Nageln målades med vitt nagellack och doppades i ett pulver av små glaskulor. Då kulorna är retro-reflektiva kommer den infallande ljusstråle reflekteras tillbaka med endast en liten spridning. Fingret placerades sedan mot cylinderns isolerade buk, se figur 8, på det sätt som visas i figur 6 och LDV:n riktades mot den reflektiva fingernageln så nära nagelbandet som möjligt.

För att studera isoleringseffekten av olika arbetshandskar klipptes en bit av ovansidan av fingret på handsken av för att demaskera den glasbelagda nageln.

Resistansmätningarna krävde kontakt mellan finger och den elektriska krets som finns beskriven under 4.3. Detta gjordes genom att linda mässingsfolie runt nedre delen av fingret med elektrodgel mellan finger och folie för ökad kontakt. Till mässingsfoliet var en kabel fastlöst för att koppla in i kretsen.

Den elektriska signalen hade en brusnivå på några millivolt och då utslagen som var intressanta motsvarade en stigning på upp till tio volt genomfördes ingen bakgrundskorrigerings av bruset.

5.2 Mätprocedur

Den empiriska undersökning som utfördes innefattade följande delmoment:

- LDV-mätning
- Resistansmätning

Efter avslutad förberedelse, utförligare beskrivet under 5.1, kunde mätning påbörjas. Provberedning visade att en variation av parametervärden gav marginellt utslag, därutav utfördes alla mätningar med hammarens maximala fallhöjd och stålhuvud för transienta vibrationer med största möjliga acceleration och amplitud. För att påbörja en mätning startades LabVIEW-programmet och hammaren släpptes därutefter. Efter avslutad mätning sparades utsignalen från LDV:n och den elektriska kretsen. Person, finger, anläggningskraft, fingerfuktighet eller -behandskning och hammartyngd för utförd mätning noterades. För mätningar då hammartyngden ej varierades användes 76 g som standard. Varje mätning utfördes generellt två till tre gånger eller tills samma antal mätningar påvisat ett tillräckligt liknande resultat.

5.2.1 LDV-mätningar

För att empiriskt undersöka hur ultravibrationer propagerar genom ett finger utförs samma förarbete och parametrarna varierades i ungefär samma grad som för resistansmätningarna, men för fler anläggningskrafter. Vid LDV-mätningar är det inget krav att samtidigt mäta resistansen men det rekommenderas för en ytterligare indikation om vad som händer under stötförloppet. Detta gäller ej för behandskade fingrar som omöjliggör resistansmätningar, dessa mätningar utfördes utan att registrera spänningen.

Nio jämförande mätningar utfördes då LDV:n riktades i centrum av cylindern för att studera hur enbart denna vibrerade vilket diskuteras ytterligare under avsnitt 6.1.2. För att få en förståelse över

hur ultravibrationer propagerar genom ett finger och applicera den kunskapen för att förhindra arbetsskador mättes procenten av ultravibrationerna som försvinner. Genom att mäta amplituden hos accelerationen på det vibrerande underlaget, de ingående vibrationerna, och jämföra med amplituden hos accelerationen mätt på fingret med LDV:n, utgående vibrationer, kunde denna procentuella dämpningen fastställas och jämföras med olika parametrars påverkan.

Anläggningskraften varierades mellan 0,4 N till 15 N. 0,4 N var den lägsta kraft som säkert kunde hållas konstant med den uppställning samt dynamometer som användes och relaterar ungefär till att lätt placera fingret på ytan. 15 N ansågs vara den största kraft som gick att hålla konstant och relaterar till att trycka fingret mycket hårt mot ytan. För att variera fingrets fuktighet användes aceton för uttorkning. Vidare undersöktes effekten från två olika hammartyngder. Olika tyngder påverkar vibrationernas amplitud.

Provtagningschema Parametervärden som varierades framgår i tabell 2. För dimensioner och ytterligare information om de fingrar som undersöktes se tabell 7.

Tabell 2: Parametrar och respektive intervall för parametervärden som användes för LDV-mätningar.

Parameter	Varierat intervall
Anläggningskraft	0,4 N, 5 N, 10 N & 15 N
Olika fingrar, samma person	H1, H2 & H5
Samma fingertyp, höger/vänster hand	H2/V2
Samma fingertyp, olika personer	FP1, FP3 & FP5
Fuktighet	Uttorkad & normal
Hammartyngd	76 g & 104 g
Behandskning	nitrilhandske, ny montagehandske, använd montagehandske, vibrationsisolerande handske, stenindustrihandske, neopren cellgummi 2 mm och 3 mm
Cylinderlängd (egenfrekvens)	L120 mm

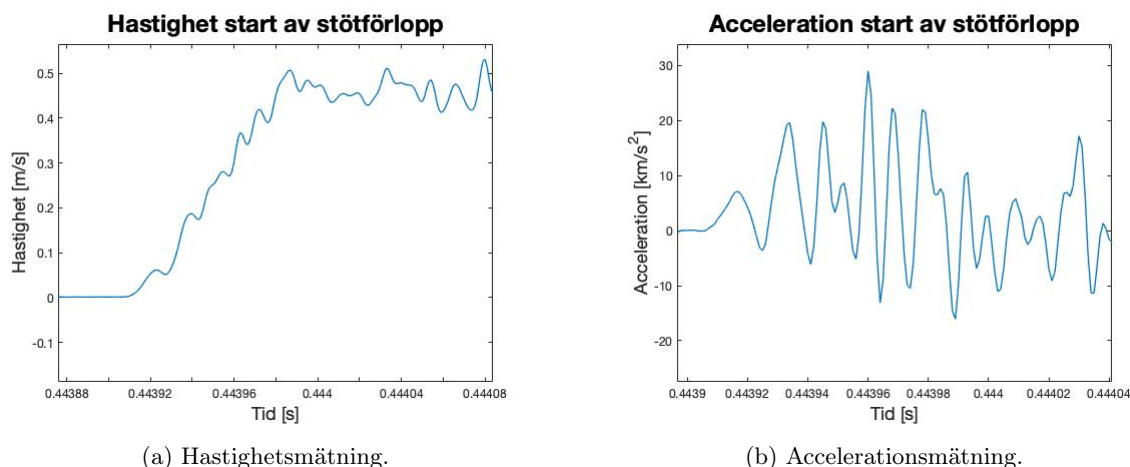
Fingret som vågledare För att uppskatta hur ultravibrationerna fortplantas i ett finger och hur det agerar som vågledare utfördes LDV-mätningar för 0,4 N. Mätpunkten för LDV:n flyttades olika långt in på fingret på de olika punkterna K1, K2, K3 och handled.

Dataanalys Data från LDV-mätningarna analyseras i MATLAB. Från LabVIEW sparas den uppmätta hastigheten vilken deriverades för att få accelerationen. För att undersöka utbredning av ultravibrationer genom ett finger var transienten och därutav början av stötförloppet intressant att studera. Accelerationen i stötens begynnelse kan uppskattas av att först identifiera tiden då hastigheten stiger som mest, approximativt halva stigtiden, 0,44396 s i figur 10a och sedan för accelerationen, figur 10b, lokalisera amplituden vid samma tidpunkt.

Den procentuella dämpningen av ultravibrationer på grund av utbredning genom medium bestämdes av

$$\left(1 - \frac{Amp_{acc,finger}}{Amp_{acc,cyl}}\right) \cdot 100, \quad (6)$$

där $Amp_{acc,finger}$ är amplituden av accelerationen uppmätt med LDV på fingernageln och $Amp_{acc,cyl}$ är amplituden av accelerationen uppmätt med LDV på cylindern utan fingrets inverkan.



Figur 10: Figur över hastigheten och accelerationen i början av stötförloppet för att excitera ultravibrationer med en stålcylinder.

5.2.2 Resistansmätning

Som tidigare nämnts visade provberedningen att en generell variation av parametrar gav minimalt utslag för resistansmätningarna vilket provtagnings-schemat dimensionerades efter. För att variera fingerfuktigheten användes acetone för uttorkning och vattenbad i 5 minuter för återfuktning. Fingret testades ej blött, utan torkades efter vattenbad.

För minimal och maximal anläggningskraft utfärdades även en mätning då resistansen mättes samtidigt som LDV:n riktades mot det vibrerande underlaget bredvid fingret. LDV:n riktades 13,2 mm från kontaktytans centrum.

Provtagnings-schema Parametervärden som varierades linjärt framgår i tabell 3. För dimensioner och ytterligare information om de fingrar som undersöktes se tabell 7.

Tabell 3: Parametrar och respektive intervall för parametervärden som användes för resistansmätningar.

Parameter	Varierat intervall
Anläggningskraft	0,4 N, 5 N, 10 N, 15 N
Olika fingrar, samma person	H1, H2, H3, H4, H5
Samma fingertyp, höger/vänster hand	H2/V2
Samma fingertyp, olika personer	F1, F2, F3, F4, F5
Fuktighet	Uttorkad, normal, återfuktad
Hammaryngd	28 g, 76 g, 104 g
Cylinderlängd (egenfrekvens)	L120 mm

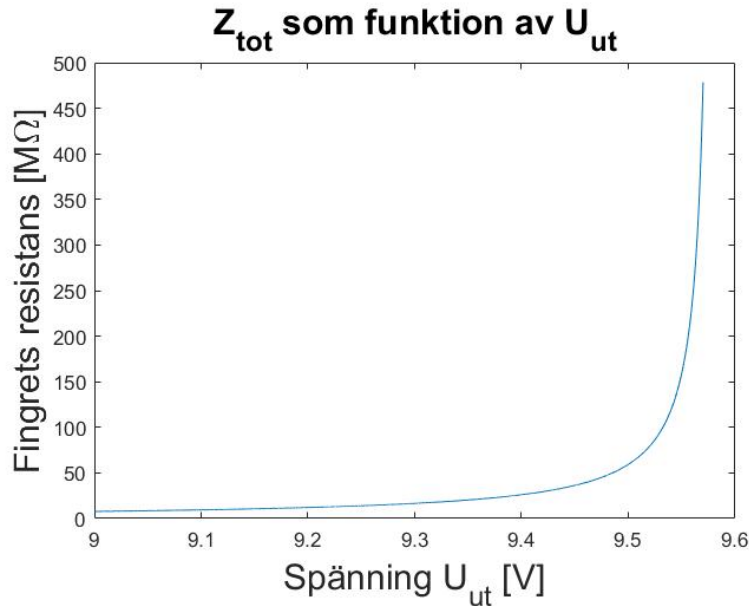
Spänningsomvandling Resistansmätningarna utfördes med en spänningsdelnings-krets som gjorde det möjligt att mäta spänningen över fingret och cylindern vilka var seriekopplade. Fingrets totala resistans kunde sedan räknas ut genom att jämföra spänningen över fingret och stålcylindern med spänningen över potentiometern. Då likström används i kretsen behöver inte impedans studeras, endast resistans. För att förenkla räkningarna försummas stålcylinderns resistans, vilket motiveras av att dess resistans uppmättes till 0,5 Ω vilket i relation till fingrets resistans som var i storleksordningen 100 k Ω . Alltså antogs spänningen över cylindern försumbar jämfört med spänningen över finger respektive

potentiometern. Genom att applicera spänningsdelning och Ohms lag fås följande uttryck för fingrets totala resistans, Z_{tot} ,

$$Z_{tot} = \frac{U_{ut}}{U_{A,sig} - U_{ut}} R_{pot}, \quad (7)$$

där U_{ut} och $U_{A,sig}$ motsvarar spänningen som mäts från operationsförstärkarens utgång respektive spänningen i nod A, se figur 9. Observera att alla potentialer är uppmätta relativt signaljorden. För en utförlig härledning av uttryck 7, se avsnitt C.

Värt att notera är att fingrets resistans inte mäts med något mätinstrument utan beräknas med ekvation 7. Då uppställningen lägger en likström genom cylindern och fingret uppmättes enbart resistansen av Z_{tot} . Från detta kan slutsatser dras om fingret släpper då den beräknade resistansen stiger kraftigt och går mot oändligheten (avbrott) som sker när den uppmätta spänningen, U_{ut} , närmar sig $U_{A,sig}$. Fenomenet illustreras i figur 11 nedan.



Figur 11: Fingrets resistans Z_{tot} som funktion av den uppmätta spänningen U_{ut} . Slutsatsen att fingret släpper från cylindern kan dras när resistansen stiger kraftigt som sker när den uppmätta spänningen, U_{ut} , närmar sig $U_{A,sig}$.

Datoranalys Från LabVIEW erhöles utsignal i form av spänning med tiden. Spänningen omvandlades till resistans genom ekvation 7 i MATLAB och tidpunkt för första stöten lokaliserades utifrån mätdata från LDV:n som kördes parallellt. Resistansmätningar jämfördes med accelerationen av underlaget, som var deriverad från hastighetsmätningarna med LDV:n. Detta för att visa på när första stöten inträffar samt kunna avgöra hur resistansen påverkas av det. Dessutom gjordes ett antal figurer som presenterar resistans- och spänningsmätningarna för de olika parametrar som undersökts.

6 Verifiering av metod

I följande två avsnitt presenteras verifiering av metoden med avseende på försöksuppställningen och statistiska mätningar för att påvisa reliabiliteten hos mätningarna.

6.1 Kontroll av uppställning

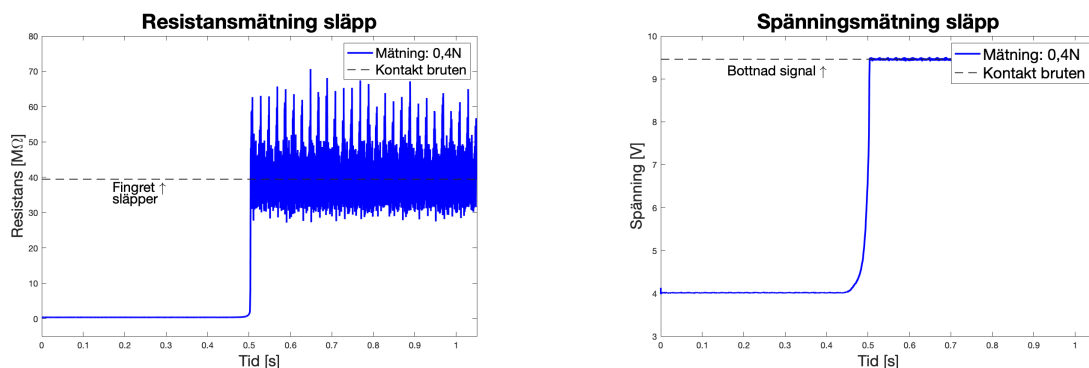
För att kontrollera uppställningen behövde den elektriska kretsen kontrolleras och repeterbarheten hos uppställningen och exciteringen fastställas.

6.1.1 Relatera stötförloppet till resistansförändring

För att verifiera att uppställningen är reliabel, genomfördes mätningar för att visa att det erhålls ett utslag då ett objekt släpper från cylindern. Den elektriska kretsen är konstruerad på så sätt att när kontakten bryts så blir resistansen oändligt stor och spänningen blir bottnad vid sitt begränsade värde på cirka 9,46 V. Detta medför att det syns tydligt då kontakten bryts och att det även går att urskilja när det är på väg att släppa, genom en stigande resistans. Då förloppen sker under kort tid har en höghastighetskamera, Sony RX II, använts för att kontrollera om kontakten brutits eller ej. I detta avsnitt visas bilder från de slowmotion-videor som gjordes under mätningarna. Videorna finns i sin helhet i avsnitt B.

För att verifiera att ett objekt kan släppa har en stålkula använts för att påvisa att uppställningen är funktionell med avseende på sitt ändamål. En kula av stål användes på grund av egenskaperna hos stål som ger en näst intill elastisk stöt. Vidare används fingertopp för att visa att uppställningen även fungerar för objekt med liknande egenskaper i jämförelse med det som undersöks i denna studie.

Då kontakten upphör mellan finger och cylinder stiger resistansen. I figur 12 visas en mätserie där fingret släppts från ytan avsiktligt. Hammaren används inte i denna mätning utan testpersonen släpper självmant fingret för att visa utslaget då kontakten upphört. Fingret är parallellt mot kontaktytan under denna mätserie. Värdet i form av den linje som anges för den bottnade signalen är beräknat genom ett medelvärde av en bottnad signal, vilket uppmättes till 9,46 V. Vidare har det värdet använts som indikation i resistansmätningen för då kontakten är bruten. Värdet för resistansen beräknades utifrån den härledda ekvationen 7 och motsvarar en resistans på 39,4 M Ω .

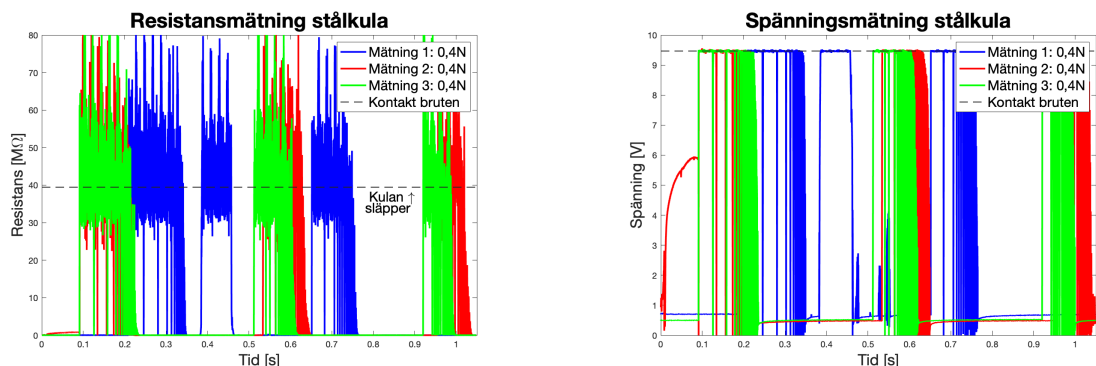


(a) Resistans som funktion av tid då kontakten upphör mellan finger och kontaktytan på cylindern.

(b) Spänning som funktion av tid då kontakten upphör mellan finger och kontaktytan på cylindern.

Figur 12: Resistans respektive spänning då fingret släpps avsiktligt från kontaktytan. Denna mätning genomfördes för försöksperson 4 på H2.

I figur 12 har det visats hur signalen ser ut då kontakten är bruten. För att vidare verifiera att uppställningen är reliabel så används olika typer av objekt för att påvisa att det är möjligt att kontakten upphör vid hammarstöten. I figur 13 så visas stötförloppet för en stålkula av diametern 25,4 mm och med anläggningskraft på 0,4 N. Det är här tydligt att resistansen når ett värde över den gräns som anses vara att objektet släppt, samt att spänningen nått sitt begränsade värde, bottenad. Detta fenomen påvisades även för anläggningskraften 5 N, 10 N, 13 N, och 32 N vilket var väntat för ett stelt material som stål.

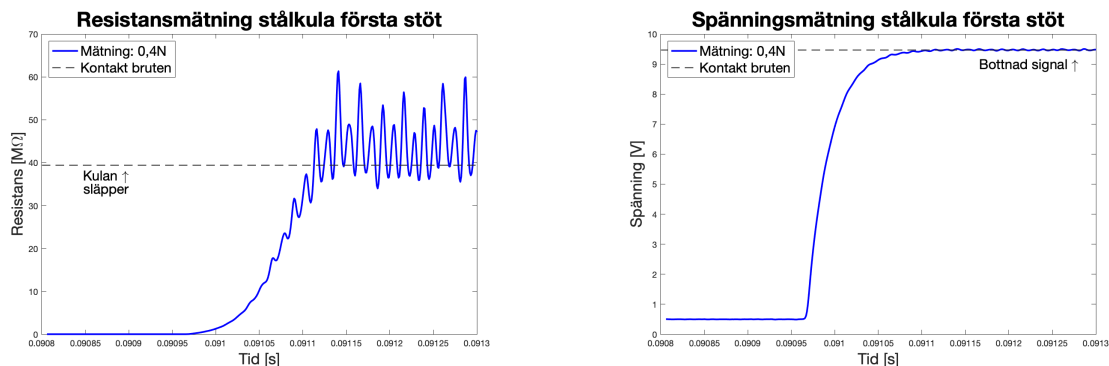


(a) Resistansmätningar med stålkula. Streckade linjen motsvarar då kulan släppt kontaktytan.

(b) Spänningsmätning med stålkula. Streckade linjen motsvarar då kulan släppt kontaktytan.

Figur 13: Stålkula med diameter 25,4 mm som trycktes mot stålcylindern med 0,4 N. Hammaren uppnådde en acceleration på 250 km/s^2 vid kollision med stålcylindern.

I figur 14 visas en inzoomad version av mätning 3 från figur 13, vilket motsvarar förloppet vid första stöten då stålkulan släpper.

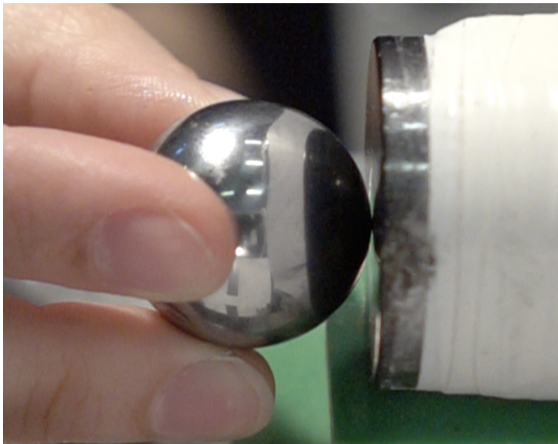


(a) Resistansmätningar med stålkula. Streckade linjen motsvarar då kulan släppt kontaktytan.

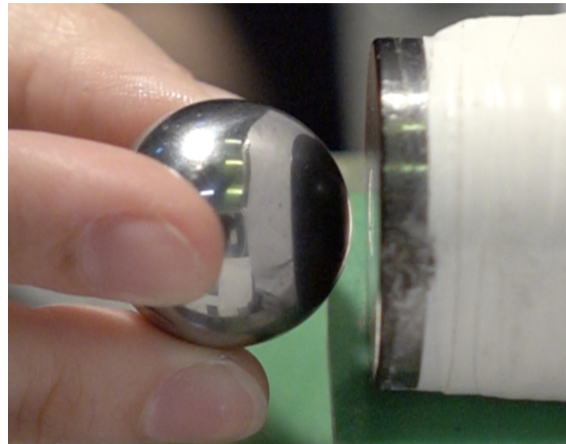
(b) Spänningsmätning med stålkula. Streckade linjen motsvarar då kulan släppt kontaktytan.

Figur 14: Del av stötförloppet för mätning 3 i figur 13, motsvarande tidsintervallet för första stöten. Stålkula med diameter 25,4 mm som trycktes mot stålcylindern med 0,4 N. Hammaren uppnådde en acceleration på 250 km/s^2 vid kollision med stålcylindern.

För att ytterligare påvisa att stålkulan har släppt visas det i figur 15 två bilder ur samma stötförlopp som figur i 13. Det är tydligt att kulan släpper, vilket verifierar det som visas i figur 13.



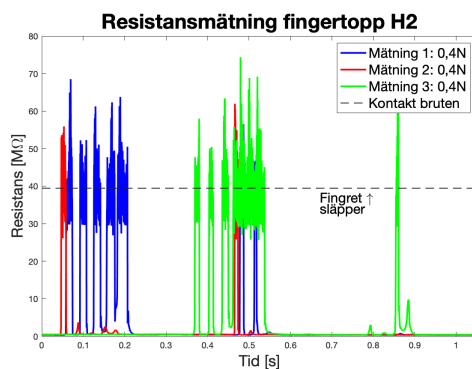
(a) Stålkula, stunden före hammaren slår i cylindern. Kontakt mellan kula och cylinder.



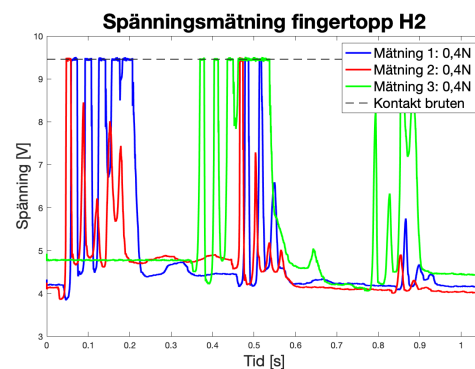
(b) Stålkula, stunden efter hammaren slagit i cylindern. Ingen kontakt, släppts.

Figur 15: Stålkula med diameter 25,4 mm som trycktes mot stålcyllindern med 0,4 N. Hammaren uppnådde en acceleration på 250 km/s^2 vid kollision med stålcyllindern. Video över förloppet finns i appendix B där bilderna är tagna ur.

Därutöver gjordes motsvarande mätningar för ett objekt som är mer likt det studien syftas mäta på. I figur 16 visas stötförloppet med en fingertopp med anläggningskraften 0,4 N, där fingret i led med hand och arm hölls vinkelrät mot kontaktytan. Det resulterade i andra förutsättningar på grund av fingrets uppbyggnad och i figuren är det även här tydligt att fingertoppen släpper. Vidare gjordes mätningar för 1 N där det även släppte, men vid större krafter fanns inget som påvisade att fingertoppen släppte.



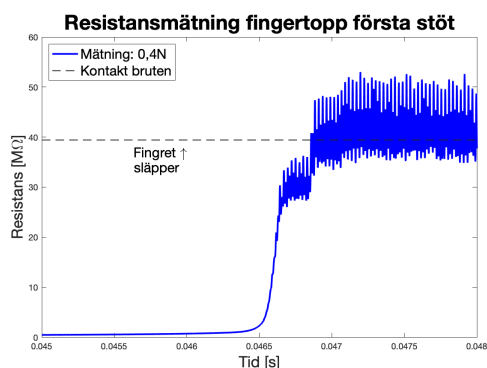
(a) Resistansmätning.



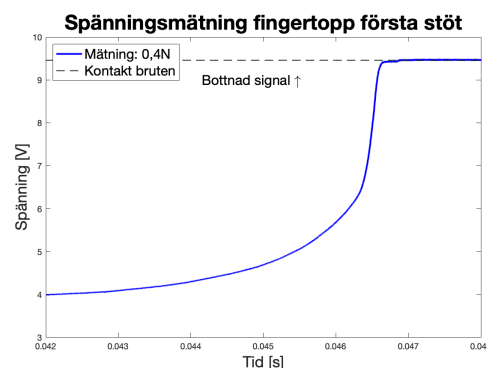
(b) Spänningsmätning.

Figur 16: Resistans- och spänningsmätningar för fingertopp, försöksperson 5 för anläggningskraft på 0,4 N.

I figur 17 visas en inzoomad version av mätning 2 i figur 16 som visar förloppet vid första stöten då fingertoppen släpper.



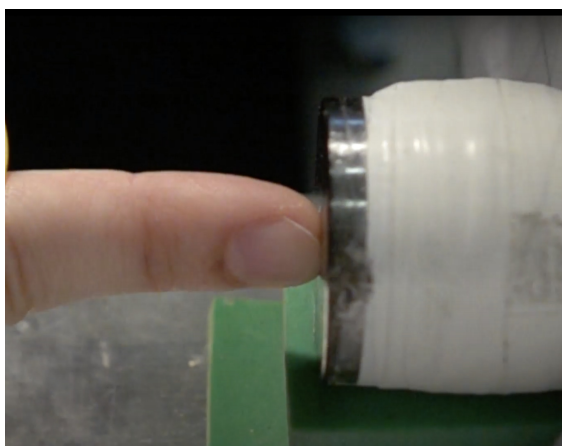
(a) Resistansmätning med fingertopp. Streckade linjen motsvarar då fingertoppen släppt kontaktytan.



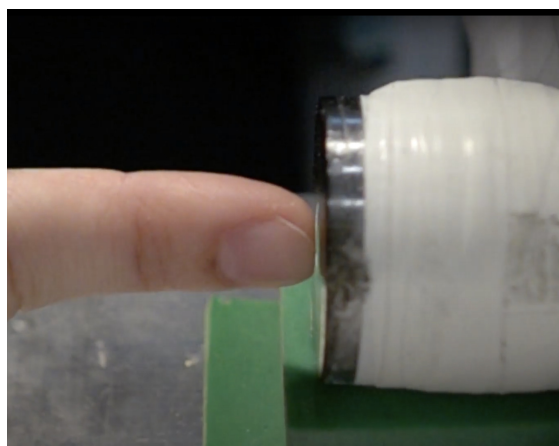
(b) Spänningsmätning med fingertopp. Streckade linjen motsvarar då fingertoppen släppt kontaktytan.

Figur 17: Del av stötförloppet för mätning 2 i figur 13, motsvarande tidsintervallet för första stöten. Fingertopp FP5 med H2 som trycktes mot stålcyldern med 0,4 N. Hammaren uppnådde en acceleration på 250 km/s^2 vid kollision med stålcyldern.

I figur 18 så visas två bilder ur stötförloppet för fingertoppen med anläggningskraftet 0,4 N där det är tydligt att kontakten upphör, vilket verifierar det som visas i figur 16.



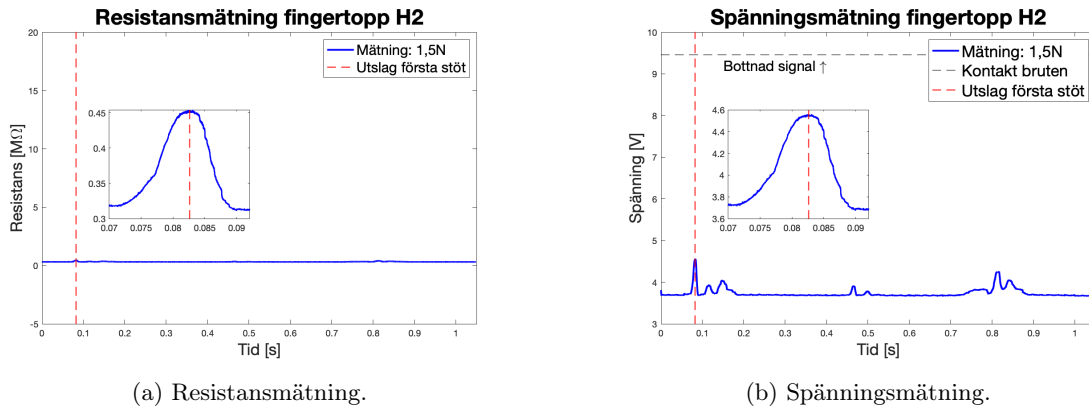
(a) Fingertoppen stunden före hammaren slår i cylindern. Kontakt mellan finger och cylinder.



(b) Fingertoppen stunden efter hammaren slagit i cylindern. Ingen kontakt, släppt.

Figur 18: Finger som trycktes vinkelrät mot stålcyldern med 0,4 N. Utfördes på försöksperson 5 med H2. Hammaren uppnådde en acceleration på 250 km/s^2 vid kollision med stålcyldern. Video över förloppet finns i avsnitt B där bilderna är tagna ur.

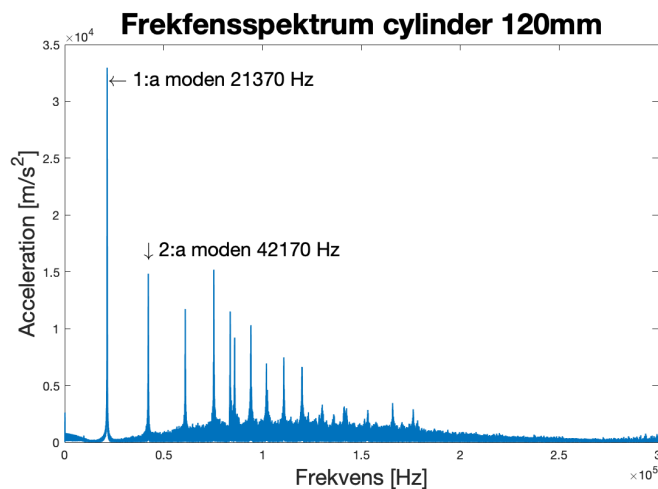
Vidare kan fenomenet då ett objekt påverkas av stöten men att kontakten inte upphör uppvisas. I figur 19 visas resistans- och spänningsmätning för fingertopp med anläggningskraft på 1,5 N. Det är tydligt att kontakten påverkas då det erhålles både ökning i spänning och resistans, men förändringarna är inte tillräckliga för att kontakten ska ha upphört. Observera att det skulle krävts en resistans motsvarande cirka 39Ω för att kontakten skulle anses vara bruten. I jämförelse med figur 16 är det en markant skillnad, där det är anläggningstryck som ändrats.



Figur 19: Fingertopp som trycktes vinkelrät mot stålcyllindern med 1,5 N. Utfördes på försöksperson 5 H2. Hammaren uppnådde en acceleration på 250 km/s^2 vid kollision med stålcyllindern. Utslag första stöt motsvarar högsta värdet för resistansen respektive spänningen som följd av stöten.

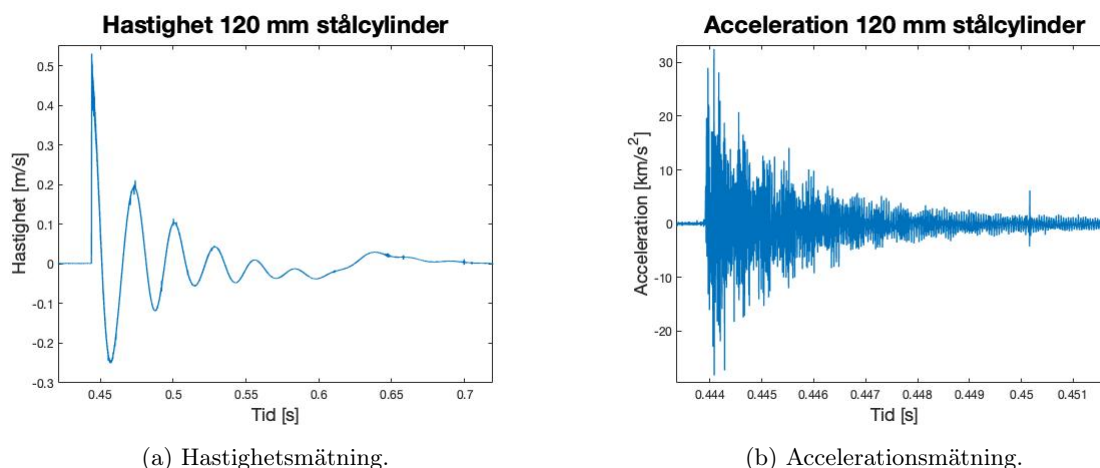
6.1.2 Repeterbarhet

Då hammaren kommer i kontakt med cylindern exciteras vissa vibrationella moder inom cylindern. Genom LDV-mätningar direkt i centrum på cylinderbukens yta, utan någon inverkan av finger, erhöles hastigheten på cylindern vilken sedan deriverats i MATLAB för att beräkna accelerationen. Vidare användes datorprogrammets FFT-funktion för att undersöka vilka vibrationella moder som exciterats. Figur 20 visar tydligt på två moder, vid 21370 Hz och 42170 Hz, vilket i jämförelse med förfogade simuleringsresultat stämmer väl överens för de två första longitudinella moderna. Simuleringsresultaten fanns tillgängliga för den använda 120 mm stålcyllindern och presenteras i tabell 1. Spektrumet påvisar även existensen av högre frekvenser vilka inte kan identifieras som högre moder då den erhållna simuleringen endast visade på de vibrationella moderna upp till cirka 50 kHz. Bevisligen är exciteringen av den första longitudinella moden på 21370 Hz den dominerande frekvensen. Frekvenser över 100 kHz filterades bort med laserdopplervibrometers lågpasfilter, i figur 20 framgår att det utförts med iokert. För att uppskatta repeterbarheten utfördes 9 mätningar vilka resulterade i likartade frekvensspektrum. Sinsemellan skiljde de någon enstaka Hertz mellan vissa toppar.



Figur 20: Frekvensspektrum för stålcyllinder med längden 120 mm och diameter 54,4 mm. Motsvarar FFT av accelerationen som deriverats från hastighetsmätning från LDV:n.

I figur 21a och 21b visas hela stötförloppets hastighet respektive acceleration för en exciterad 120 mm stålcyllinder. Figurer som presenteras i senare delar av studien kommer fokusera på den initiala delen av förloppet men principiellt delar mätningarna samma utseende.

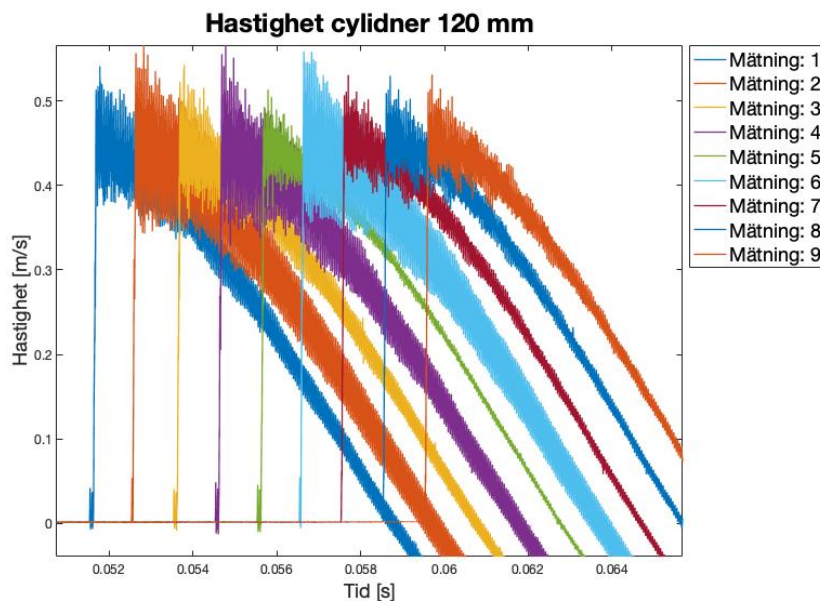


(a) Hastighetsmätning.

(b) Accelerationsmätning.

Figur 21: Hastigheten och accelerationen uppmätt under stötförloppet då en 120 mm stålcyllinder exciteras vibrationellt.

För att vidare verifiera metoden jämfördes de nio identiska mätningarna för att värdera hur bra repeterbarheten är, mer specifikt hastigheten och accelerationen precis i början av stötförloppet. I figur 22 visas mätningarna uppräddade efter varandra. I en medelvärdesbildning av de tre första perioderna på ringningen hos respektive hastighets-mätning erhöles $\mu = 0,128189$ m/s med en standardavvikelse på $\sigma = 0,03683$ m/s.

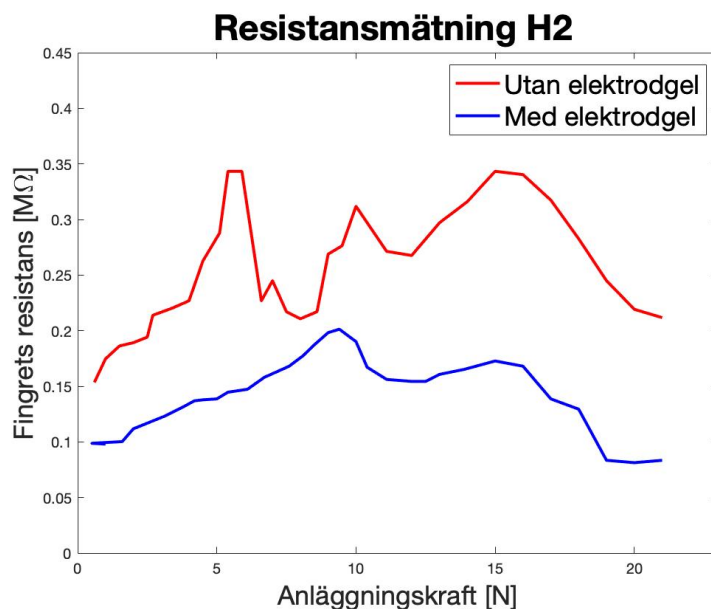


Figur 22: Figuren skildrar hur hastigheten hos nio identiska mätningar direkt utförda efter varandra avviker i den initiala delen av stötförloppet då en 120 mm stålcyllinder exciteras vibrationellt.

6.2 Statiska mätningar utan ultravibrationer

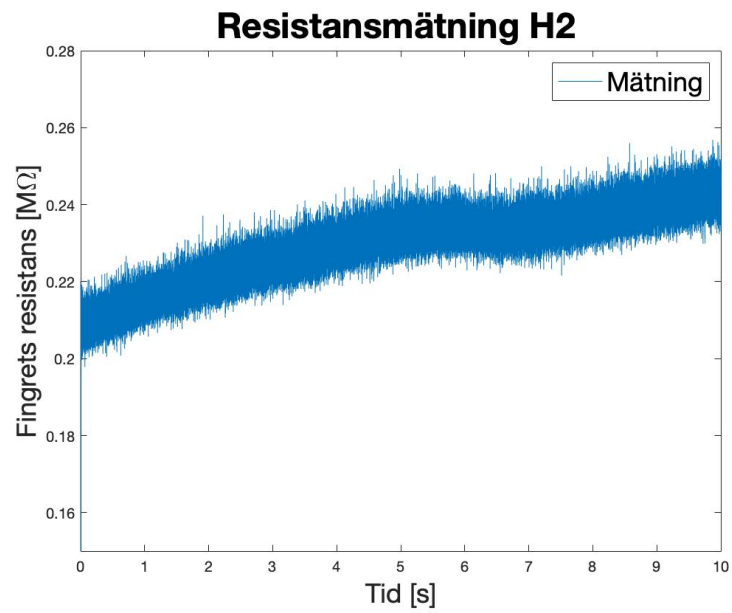
Utöver verifieringen av uppställningen utfördes statiska mätningar för att se hur fingrets resistans beror på anläggningsstrycket mot cylindern. I figur 23 studerades data där trycket mot cylindern varierades för att finna ett samband mellan tryck och resistans. Mätningarna utfördes ett flertal gånger. Två olika mätningar, en med elektrodgel och en utan elektrodgel kan observeras i figur 23. Mätningarna utfördes med elektrodgel för att eliminera inverkan av fingrets yttre materialparametrar, och därför bara studera effekten av fingrets inre under kompression.

Från de statiska mätningarna med elektrodgel kan det observeras att fingrets resistans ökar med ökat fingertryck mot cylindern till en viss gräns. Vid en anläggningskraft på omkring 10 N börjar fingrets resistans sjunka vilket inte stämmer överens med tesen om minskat blodflöde som orsakar ökad resistans. Det misstänks att det finns en annan underliggande orsak till beteendet, men den här studien lägger ingen vikt på att ytterligare studera observationen.



Figur 23: Försöksperson 5: Fingrets resistans Z_{tot} som funktion av statisk anläggningskraft N. Röd och blå graf representerar mätning utan elektrodgel respektive med elektrodgel.

I figur 24 placerades fingret mot cylindern med konstant kraft utan att bryta kontakten med ytan. Det observerades att spänningen ökade med tiden.



Figur 24: Försöksperson 2: Fingrets resistans Z_{tot} uppmätt under 10 sekunder vid oavbruten kontakt mot cylindern samt konstant anläggningskraft på 2,2 N.

7 Resultat

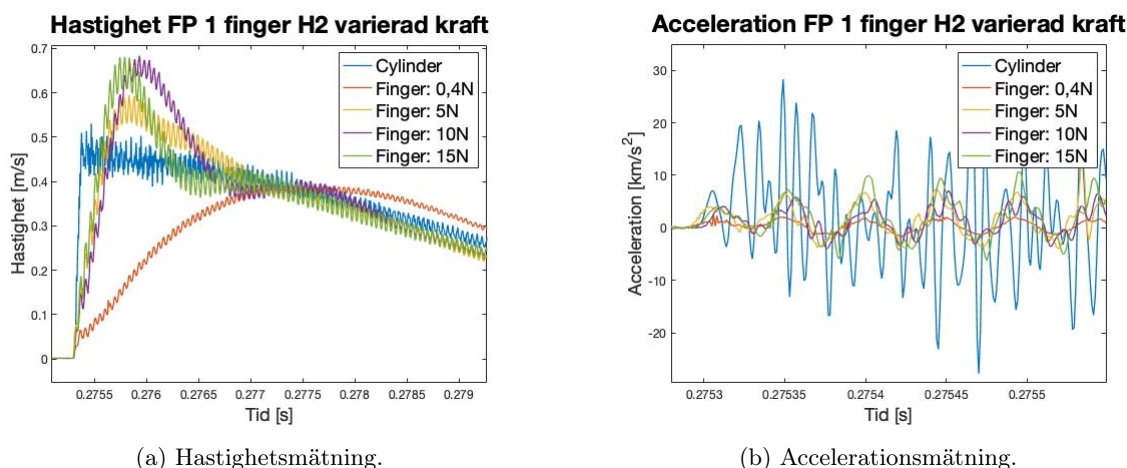
I följande kapitel presenteras resultaten för bestämning av kontaktvillkor från resistansmätningarna och resultaten för hur ultravibrationer propagerar genom fingrar från utförda LDV-mätningar.

7.1 Utbredning av ultravibrationer genom fingret

I detta delkapitel redogörs resultatet för karakteriseringen av ultravibrationers utbredning genom ett finger. Resultatet presenterar hur vibrationernas acceleration minskar och hur det förhåller sig till olika parametrar. Genom att studera den procentuella förändringen av accelerationsnivån av vibrationerna som försvinner, kvalificerades olika arbetshandskars förmåga att skydda mot ultravibrationer. För en ökad förståelse över hur vibrationerna fortplantas i ett finger redogörs även graden fingret agerar som vågledare.

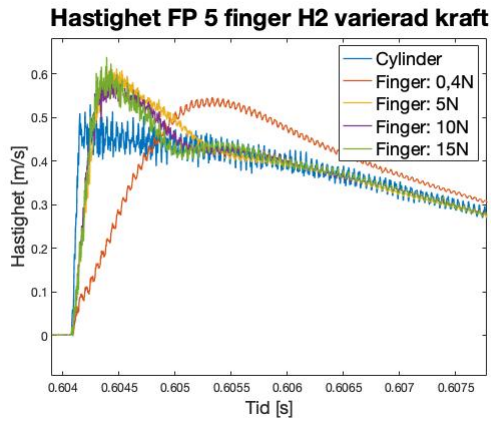
Dämpningen av ultravibrationer visades främst bero på två faktorer, fingrets dimensioner och likartat anläggningskraften vilken komprimerar fingret. De båda faktorerna indikerar att en variation av propagationssträcka har störst effekt på dämpningen vilket presenteras i tabell 4 tillsammans med andra faktors påverkan samt i nedanstående grafer.

I figur 25 framgår effekten av olika anläggningskrafter. Mätningen utfördes för finger H2 på försöksperson 1 med anläggningskrafterna 0,4 N, 5 N, 10 N och 15 N och visar precis början av impulsen. Accelerationen ökar med ökad anläggningskraft vilket speglar den kortare stigtiden men är mindre respektive längre relativt cylinderns vilket indikerar att vibrationerna dämpas med olika grad genom fingret. Från figuren 25a framgår att mätningarna avviker främst i början av förloppet till att sedan klinga av likartat. För information om försökspersoners fingrar, se Appendix tabell 7.

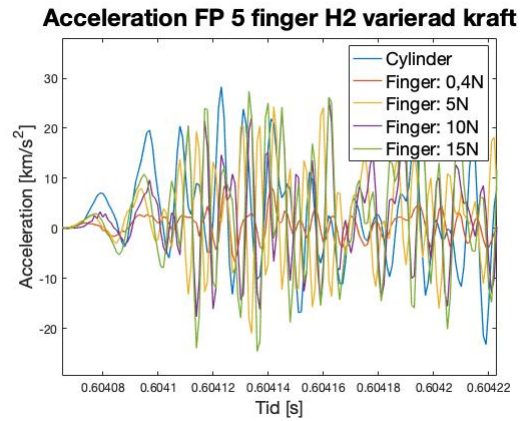


Figur 25: Uppmätt hastighet och acceleration för finger H2 försöksperson 1 för varierad anläggningskraft 0,4 N, 5 N, 10 N och 15 N relativt 120 mm stål cylindern.

I figur 26 framgår effekten av olika anläggningskrafter för finger H2 på försöksperson 5 vid 0,4 N, 5 N, 10 N och 15 N och visar precis början av stötförloppet. Figur 26 uppvisar samma tendens som figur 25 men en kraftigt mindre dämpning vid högre krafter.



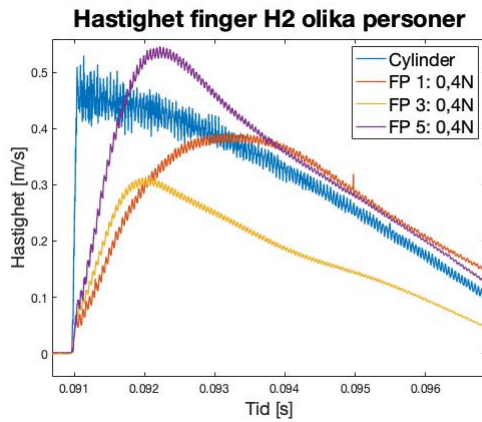
(a) Hastighetsmätning.



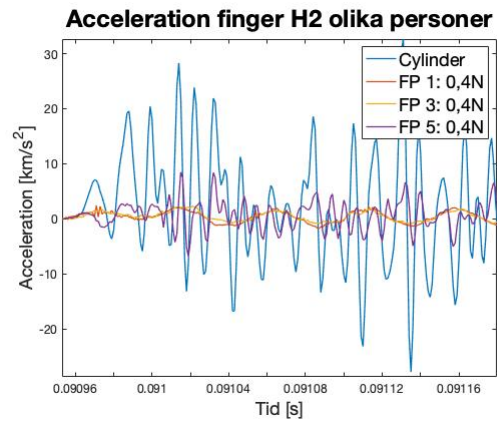
(b) Accelerationsmätning.

Figur 26: Uppmätt hastighet och acceleration för finger H5 försöksperson 1 för varierad anläggningskraft 0,4 N, 5 N, 10 N och 15 N relativt 120 mm stålcylindern.

I figur 27 framgår skillnaden mellan olika försökspersoner och visar försöksperson 1, 3 och 5 med en anläggningskraft 0,4 N precis i början av stötförloppet. Figuren visar att accelerationsnivån för person 1 och 3 är relativt nära men högre för person 5 samt att längre tid går innan hastigheten för försöksperson 3 klingar av likt de andra. Noterbart är att försöksperson 1 och 3 är män men nummer 5 är en kvinna.



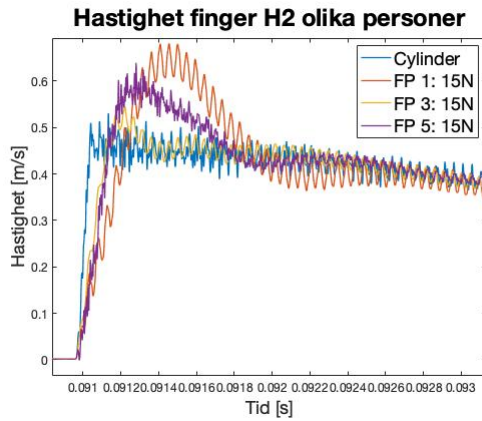
(a) Hastighetsmätning.



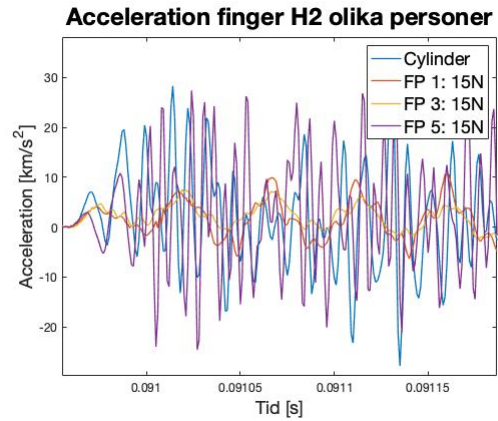
(b) Accelerationsmätning.

Figur 27: Uppmätt hastighet och acceleration för finger H2 hos försöksperson 1,3 och 5 med anläggningskraft 0,4 N relativt 120 mm stålcylindern.

I figur 28 framgår skillnaden mellan olika försökspersoner och visar försöksperson 1, 3 och 5 med en anläggningskraft 15 N precis i början av stötförloppet. Figuren visar att accelerationsnivån för person 1 och 3 är relativt nära men betydligt högre för person 5.



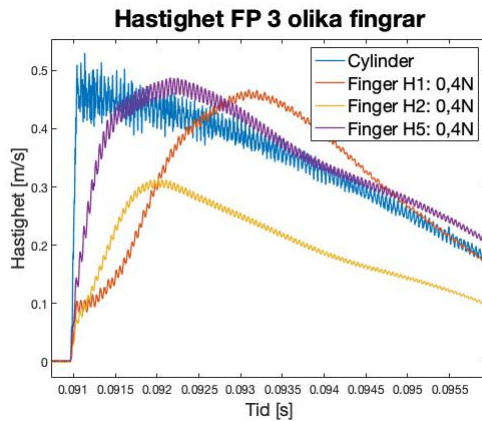
(a) Hastighetsmätning.



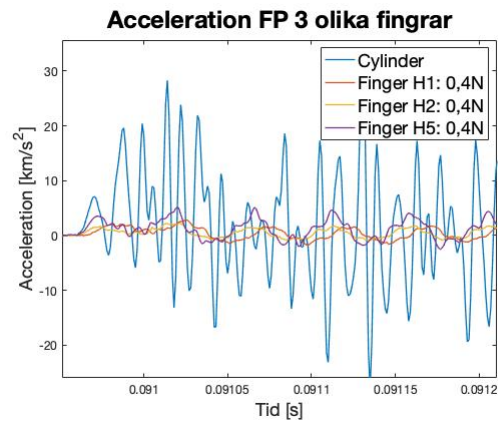
(b) Accelerationsmätning.

Figur 28: Uppmätt hastighet och acceleration för finger H2 hos försöksperson 1,3 och 5 med anläggningskraft 15 N relativt 120 mm stålcyllindern.

I figur 29 framgår skillnaden mellan olika fingrar H1, H2 och H5 försöksperson 3 med en anläggningskraft 0,4 N precis i början av stötförloppet. Figuren visar en relativt jämn accelerationsnivå, men en något högre amplitud för H5.



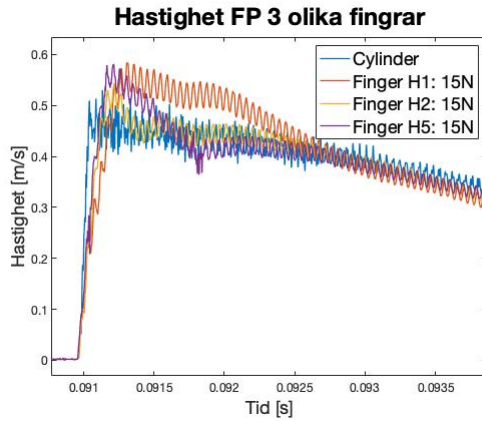
(a) Hastighetsmätning.



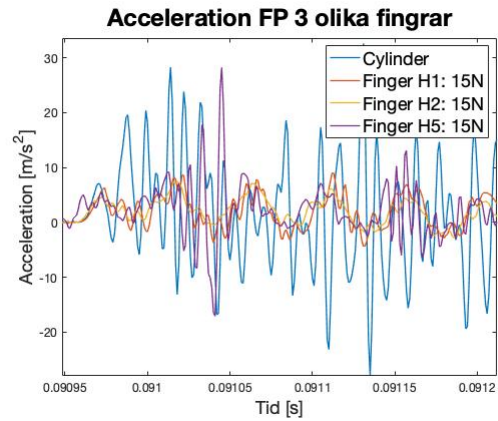
(b) Accelerationsmätning.

Figur 29: Uppmätt hastighet och acceleration för finger H1, H2 och H5 försöksperson 3 med anläggningskraft 0,4 N relativt 120 mm stålcyllindern.

I figur 30 framgår skillnaden mellan olika fingrar H1, H2 och H5 försöksperson 3 med anläggningskraften 15 N i impulsens start. Figuren visar att accelerationen överlappar någorlunda väl.



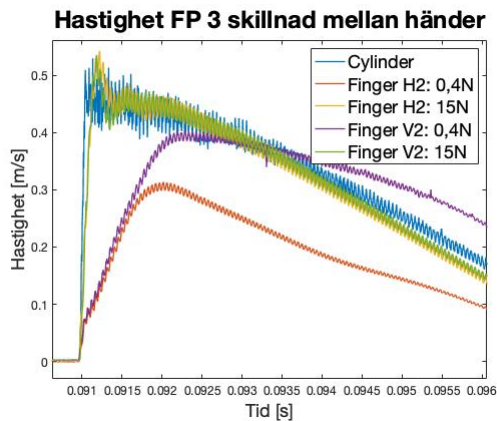
(a) Hastighetsmätning.



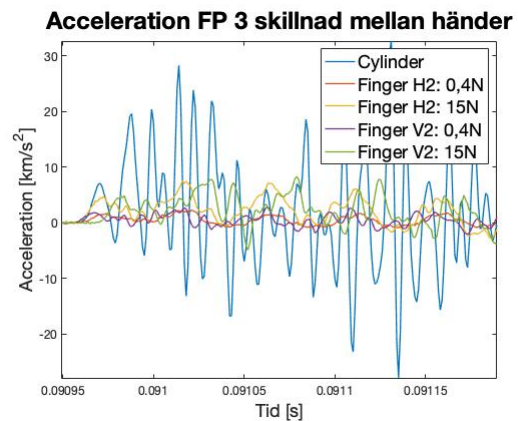
(b) Accelerationsmätning.

Figur 30: Uppmätt hastighet och acceleration för finger H1, H2 och H5 försöksperson 3 med anläggningskraft 15 N relativt 120 mm stålcyllindern.

I figur 31 framgår skillnaden mellan samma finger för höger och vänster hand H2 och V2 försöksperson 3 med anläggningskraft 0,4 N och 15 N precis i början av stötförloppet. Accelerationsnivåerna överensstämmer väl mellan händerna för de olika krafterna men hastigheten klingar av något olika för 0,4 N.



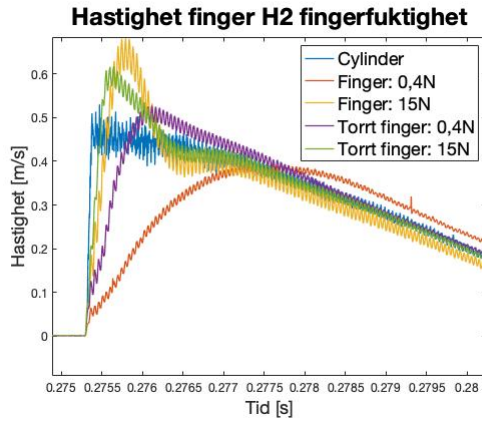
(a) Hastighetsmätning.



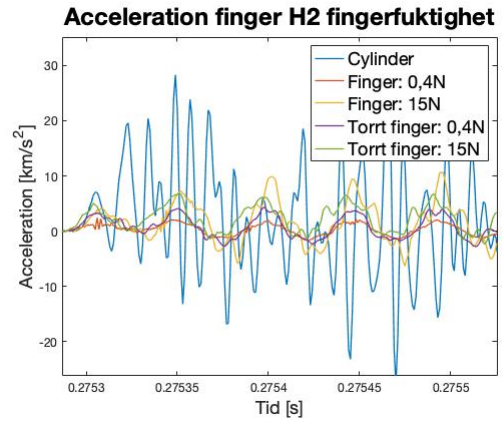
(b) Accelerationsmätning.

Figur 31: Uppmätt hastighet och acceleration för finger H2 och V2 försöksperson 3 med anläggningskraft 0,4 N och 15 N relativt 120 mm stålcyllindern.

I figur 32 framgår skillnaden mellan samma finger H2 försöksperson 1 för ett uttorkat finger och ett normalt med en anläggningskraft 0,4 N och 15 N precis i början av stötförloppet.



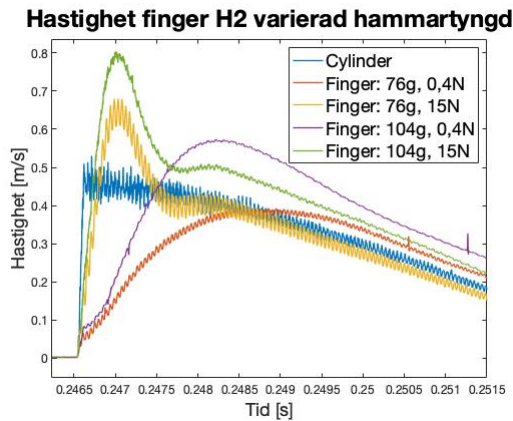
(a) Hastighetsmätning.



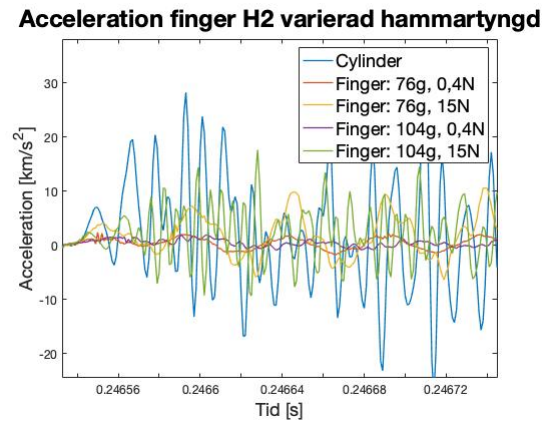
(b) Acceleration.

Figur 32: Uppmätt hastighet och acceleration för finger H2 hos försöksperson 1 med varierad fingerfuktighet normal och torr samt anläggningskraft 0,4 N och 15 N relativt 120 mm stålcylindern.

I figur 33 framgår skillnaden mellan samma finger H2 försöksperson 1 för en hammartyngd på 76 g och 104 g med en anläggningskraft 0,4 N och 15 N precis i början av stötförloppet. Ringningen på hastigheten är minskad för den tyngre hammaren.



(a) Hastighetsmätning.



(b) Accelerationsmätning.

Figur 33: Uppmätt hastighet och acceleration för finger H2 hos försöksperson 1 med varierad hammartyngd 76 g och 104 g samt anläggningskraft 0,4 N och 15 N relativt 120 mm stålcylindern.

Tabell 4 visar en sammanställning av de ovan visade graferna. I tabellen framgår det till vilken grad ultravibrationerna dämpas på grund av utbredningen genom ett finger. Den procentuella förändringen av accelerationsnivå bestämdes likt beskrivet under 5.2.1 för att uppskatta vibrationernas förlust.

Tabell 4: Sammanställning över hur stor del av ultravibrationer som dämpas av ett finger och hur det påverkas av olika faktorer samt hur de förhåller sig.

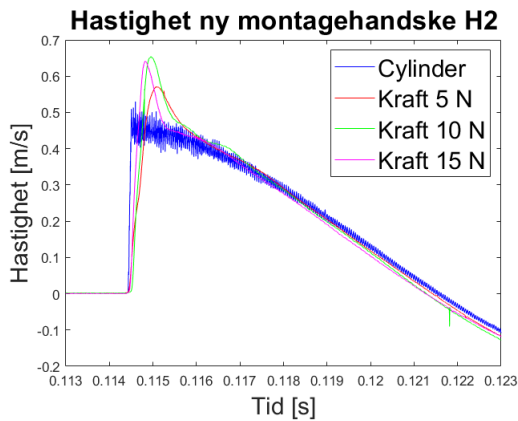
Parameter	Parametervärde	Dämpning	Konstanter
Tryck, figur 25	0,4 N	92,7%	FP: 1
	5 N	76,9%	H2
	10 N	79,3%	
	15 N	64,3%	
Tryck, figur 26	0,4 N	90,9%	FP: 5
	5 N	38,7%	H2
	10 N	32,0%	
	15 N	9,8%	
Person, figur 27	FP: 1	92,7%	H2
	FP: 3	93,9%	0,4 N
	FP: 5	90,9%	
Person, figur 28	FP: 1	64,3%	H2
	FP: 3	76,4%	15 N
	FP: 5	9,8%	
Finger, figur 29	H1	94,0%	FP: 3
	H2	93,9%	0,4 N
	H5	86,4%	
Finger, figur 30	H1	70,1%	FP: 3
	H2	76,4%	15 N
	H5	69,8%	
Hand, figur 31	H2	93,9%	FP: 3
	V2	93,1%	0,4 N
Hand, figur 31	H2	76,4%	FP: 3
	V2	73,2%	15 N
Fingerfuktighet, figur 32	Normal	92,7%	FP: 1
	Torr	85,1%	H2, 0,4 N
Fingerfuktighet, figur 32	Normal	64,3%	FP: 1
	Torr	78,4%	H2, 15 N
Hammartyngd, figur 33	76 g	92,7%	FP: 1
	104 g	95,1%	H2, 0,4 N
Hammartyngd, figur 33	76 g	64,3%	FP: 1
	104 g	65,3%	H2, 15 N

7.1.1 Behandskade fingrar

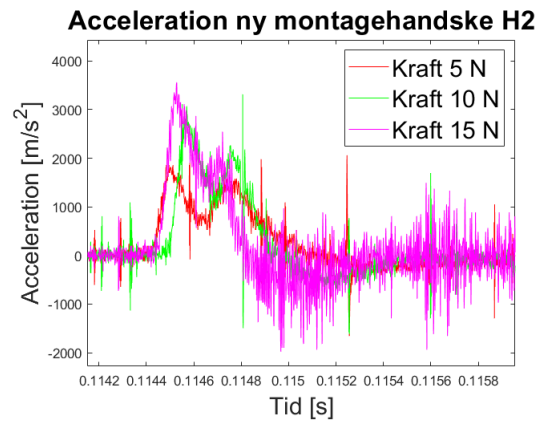
Den följande serien av grafer, figur 34 - 40, visar hastighets- och accelerationsmätningarna för de olika handskar som undersökts. Mer specifikt, jämfördes ny och använd montagehandske, stenindustrihandske, nitrilgummihandske och en vibrationsisolerande handske. Utöver handskarna testades även neopran cellgummi med en tjocklek på 2 respektive 3 mm vilket kan används som isolerande beläggning på verktygs handtag.

Observera att i samtliga grafer i sektionen så återfinns bara kurvorna för cylindern i hastighetsmätningarna eftersom accelerationsnivån på cylindern är mycket högre än för handskarna.

I figur 34 framgår hastigheten och acceleration relativt 120 mm stålcyllindern för en ny montagehandske. Därefter i figur 35 visas resultaten från mätningarna av en använd montagehandske.

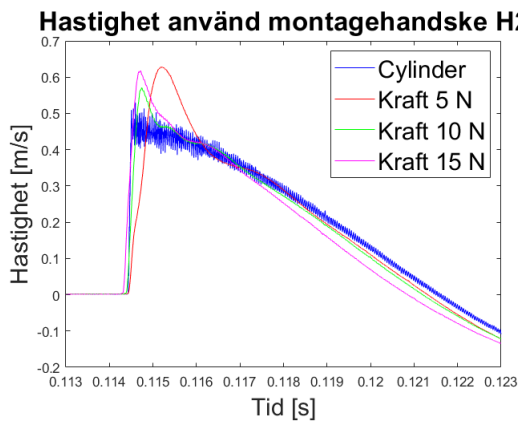


(a) Hastighetsmätning.

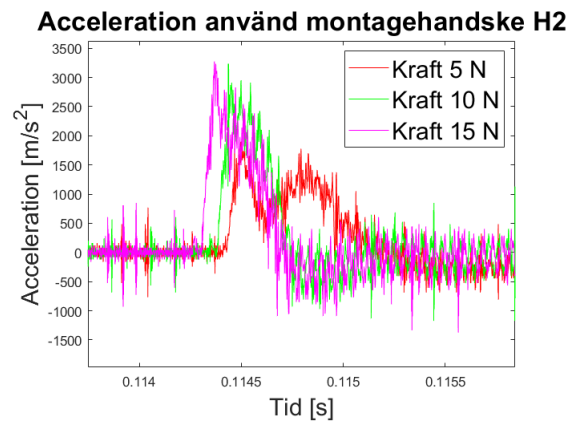


(b) Accelerationsmätning.

Figur 34: Uppmätt hastighet och acceleration för finger iklätt en ny montagehandske relativt 120 mm stål cylindern.



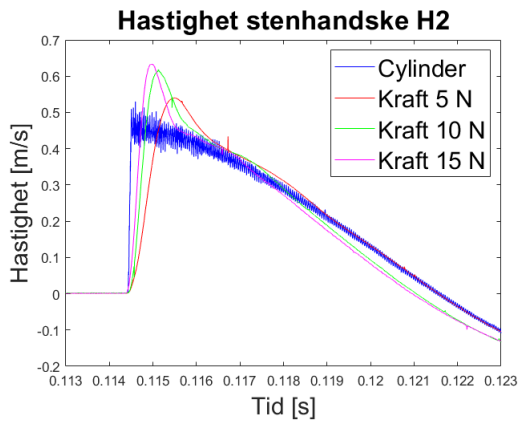
(a) Hastighetsmätning.



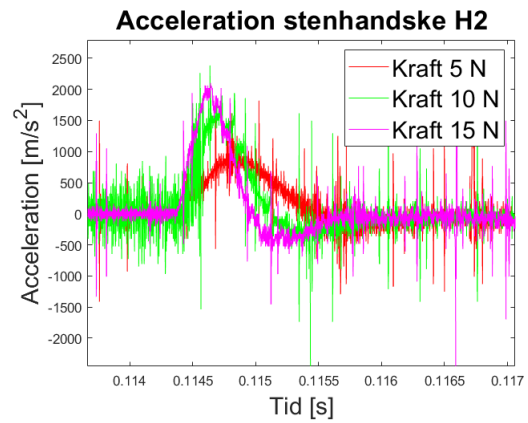
(b) Accelerationsmätning.

Figur 35: Uppmätt hastighet och acceleration för finger iklätt en använd montagehandske relativt 120 mm stål cylindern.

I de följande figurerna framgår hastigheten och acceleration relativt 120 mm stål cylindern för tre olika sorters arbetshandskar. Först i 36 visas stenindustrihandske. Därefter i figur 37 återfinns nitrilgummihandsken och slutligen i figur 38 ses resultaten från den vibrationsisolerande handsken.

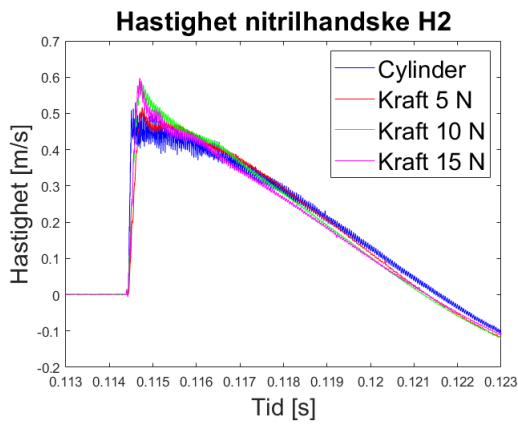


(a) Hastighetsmätning.

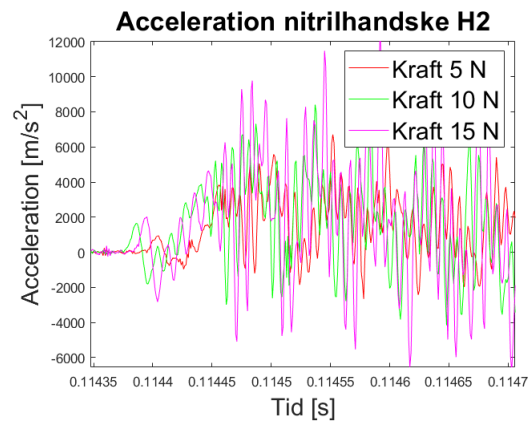


(b) Accelerationsmätning.

Figur 36: Uppmätt hastighet och acceleration för finger iklätt en stenindustrihandske relativt 120 mm stålcyllindern.

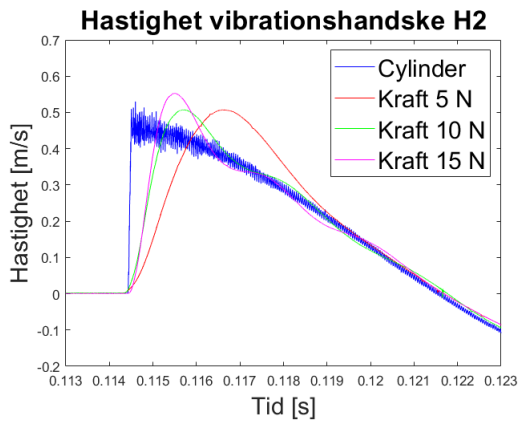


(a) Hastighetsmätning.

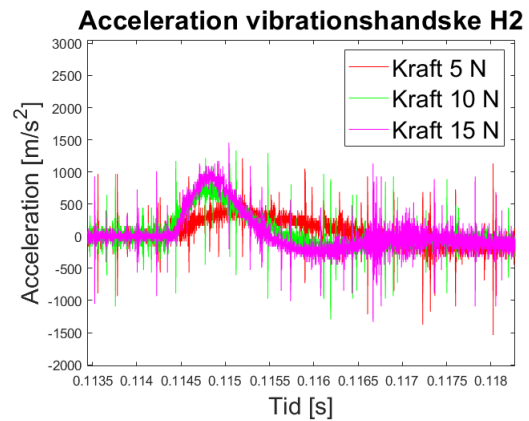


(b) Accelerationsmätning.

Figur 37: Uppmätt hastighet och acceleration för finger iklätt en handske av nitrilgummi relativt 120 mm stålcyllindern.



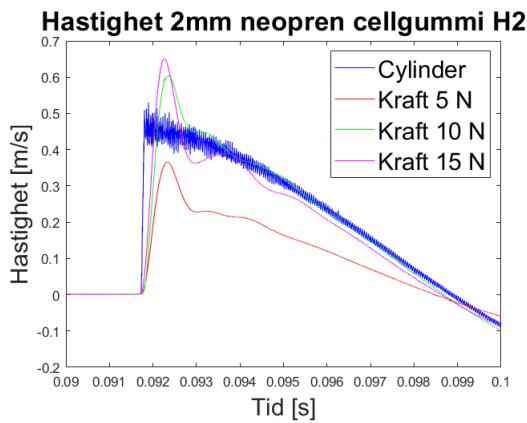
(a) Hastighetsmätning.



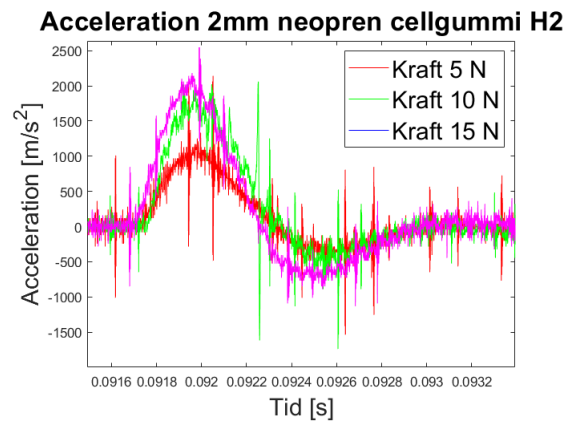
(b) Accelerationsmätning.

Figur 38: Uppmätt hastighet och acceleration för finger iklätt en vibrationsisolerande handske relativt 120 mm stålcyllindern.

Slutligen i figur 39 och 40 presenteras resultaten från mätningarna för 2 mm och 3 mm neopran cellgumi.

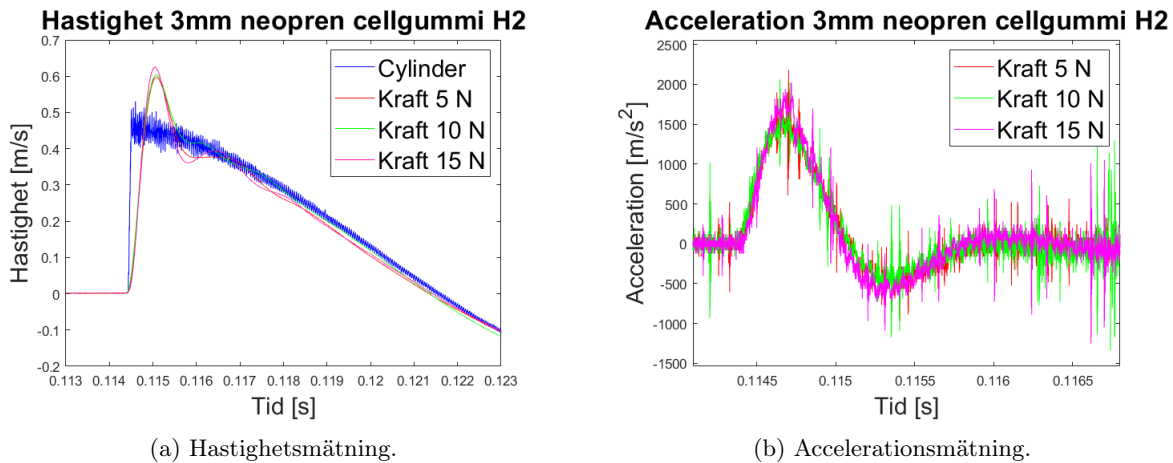


(a) Hastighetsmätning.



(b) Accelerationsmätning.

Figur 39: Uppmätt hastighet och acceleration för 2 mm neopran cellgumi relativt 120 mm stålcyllindern.



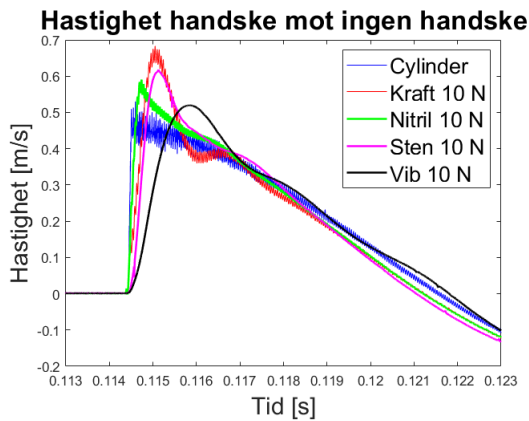
Figur 40: Uppmätt hastighet och acceleration för 3 mm neopran cellgumi relativt 120 mm stålcyllindern.

I tabell 5 listas dämpningen av ultravibration genom ett behandskat finger jäntemot cylindern.

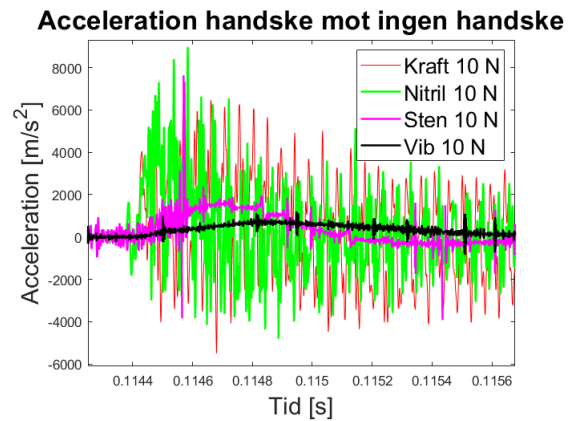
Tabell 5: Sammanställning över hur stor del av ultravibrationer som dämpas av ett handskbeklätt finger samt cellgummi.

Parameter	Parametervärde	Dämpning	Konstanter
Ny montagehandske figur 34	5 N	93,8%	FP: 4
	10 N	90,8%	H2
	15 N	88,0%	
Använd montagehandske figur 35	5 N	93,9%	FP: 4
	10 N	90,5%	H2
	15 N	89,3%	
Stenindustrihandske figur 36	5 N	96,9%	FP: 4
	10 N	94,7%	H2
	15 N	93,5%	
Nitrilgummihandske figur 37	5 N	87,9%	FP: 4
	10 N	82,5%	H2
	15 N	80,2%	
Vibrationsisolerande handske figur 38	5 N	98,2%	FP: 4
	10 N	97,0%	H2
	15 N	96,1%	
2 mm neopren cellgummi figur 39	5 N	96,3%	FP: 4
	10 N	93,6%	H2
	15 N	92,7%	
3 mm neopren cellgummi figur 40	5 N	95,4%	FP: 4
	10 N	94,7%	H2
	15 N	94,3%	

I figur 41 representeras skillnaderna mellan ett naket finger och ett behandskat för några olika typer av handskar vid 10 N. Förkortningarna i legenden står för följande; "Vib" för vibrationsisolerande handske, "Sten" för stenindustrihandske och "Nitril" för nitrilgummihandske.



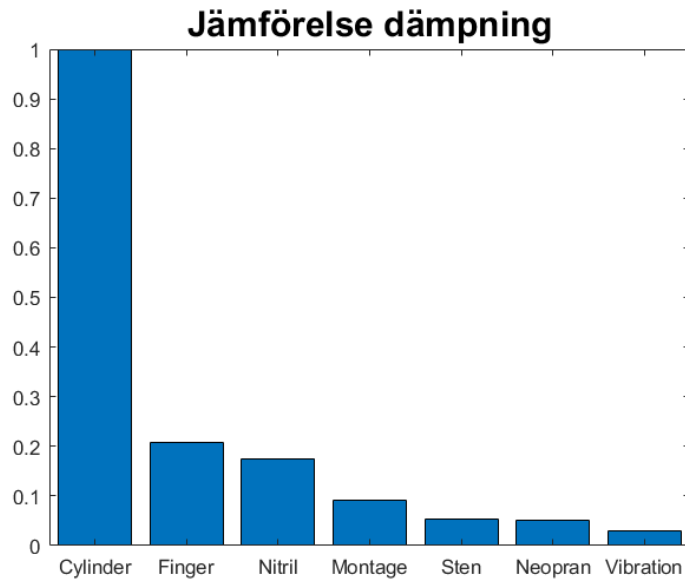
(a) Hastighetsmätning.



(b) Accelerationsmätning.

Figur 41: Visar skillnader mellan handske mot ingen handske relativt 120 mm stålcyllindern. Det nakna fingret beskrivs som "kraft" i legenden medan de olika handskarna beskrivs av en förkortning av sina namn.

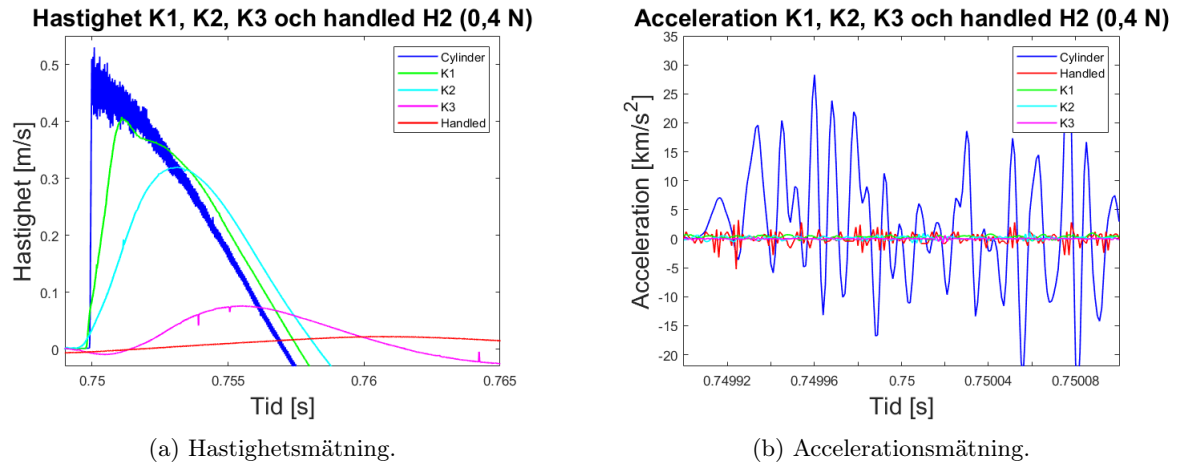
Nedan i figur 42 visas en jämförelse över hur stor andel av vibrationernas acceleration som uppmättes på fingret, med och utan handske, vid en anläggningskraft på 10 N i ett stapeldiagram. De exakta värdena går att läsa i tabell 5.



Figur 42: Visualisering av vibrationsdämpningen uppmätt på ovansidan fingret vid en anläggningskraft på 10 N. Ett motsvarar ingen dämpning och noll motsvarar en fullständig dämpning.

7.1.2 Fingret som vågledare

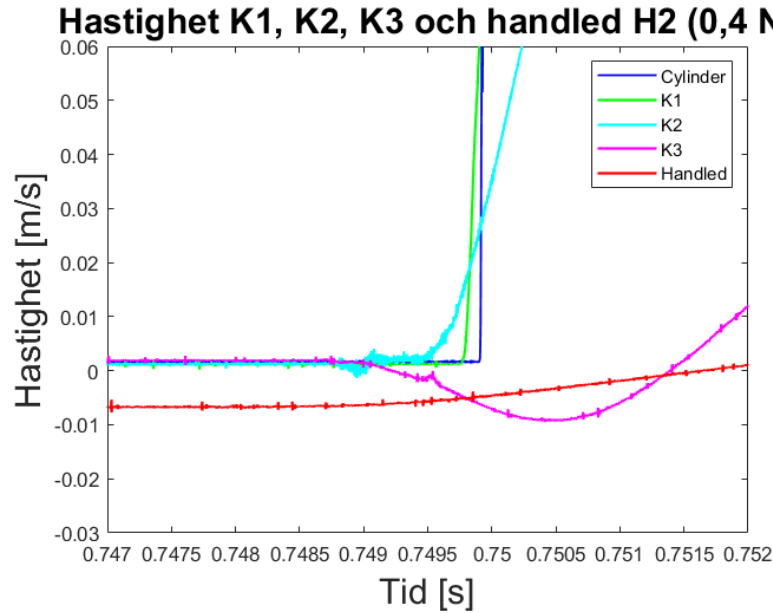
Mätningar utfördes på försöksperson 1 för olika delar av fingret för att studera graden fingret agerar som vågledare. Mätningar utfördes på K1, K2, K3 och handleden för finger H2 genom att fästa reflexiva tejpbitar på de olika fingerdelarna och mäta vibrationerna under stötförloppet med LDV. Deras hastighet och acceleration jämförs med cylindern och plottas i figur 43.



Figur 43: Uppmätt hastighet och acceleration för olika delar av finger H2 hos försöksperson 1 relativt stål cylindern.

I figur 43 framgår det att hastigheten och accelerationen kraftigt dämpas ju längre bort från nageln vibrationsmätningarna utförs. På grund av handledens brusiga acceleration är det svårt att avgöra hur förloppet ser ut. Om handledens mätningar exkluderas, kan slutsatsen dras att delar av fingret närmare vibrationskällan påverkas mer än delar längre från. Observationen implicerar att mänskliga händer är en dålig vågledare då vibrationerna dämpas kraftigt vid ökad propageringssträcka.

Ett intressant fenomen observeras för K3 när en närbild av dess hastighet studeras. När stöten inträffar blir först hastigheten negativ innan den stiger för att bli positiv. Detta sker då ett spänt finger böjs uppåt vilket leder till att metacarpofalangealen K3 trycks nedåt, detta resulterar i en negativ hastighet. Handleden samt övriga leder trycks uppåt vilket ger en positiv hastighet. Förloppet presenteras i figur 44.



Figur 44: Hastigheten för K3 i närbild som först är negativ för att sedan stiga till att bli positiv.

7.2 Resistansmätning för kontaktvillkor

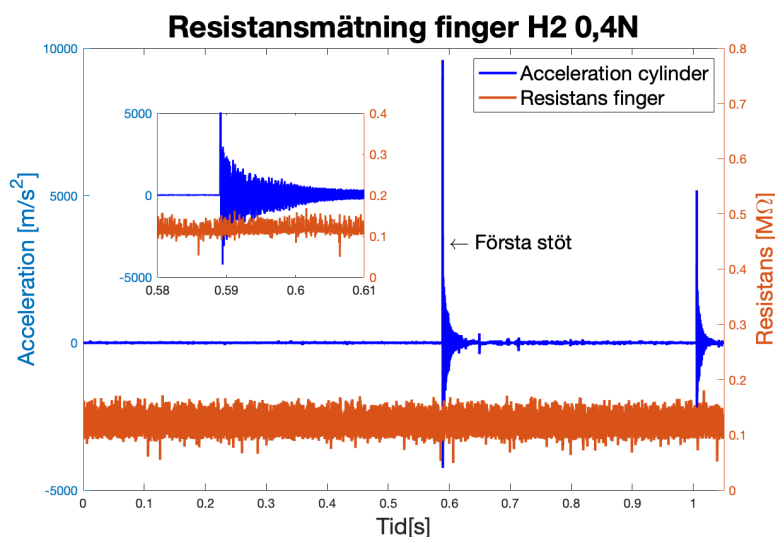
I detta delkapitel redogörs resultatet för hur kontaktvillkoret är mellan finger och stel vibrerande yta, det vill säga om fingret släpper eller inte. Hur kontaktvillkoret förhåller sig till de olika parametrarna presenteras dels genom en tabell som en översikt över samtliga parametrar samt figurer vilka är inriktade på anläggningskraftens påverkan.

Under utförandet av mätningarna observerades att fingrarna inte släppte från kontaktytan och att det var konsekvent genom samtliga mätningar. De parametrar som undersökts presenteras i tabell 6 tillsammans med varierat intervall samt om fingret släppt eller inte från kontaktytan på cylindern. Notera att parametrarna är undersökta var för sig. Utöver de mätningar som presenteras i detta delkapitel finns de resterande mätningarna för respektive parameter i avsnitt A.

Tabell 6: Varierad parameter, vilket intervall parametern testats inom samt om fingret släppt från kontaktytan. Observera att det är enskilt utförda mätningar. De parametrar som inte är anläggningskraft är genomförda för 0, 4 och 15 N. mätningarna för olika personer genomfördes på finger H1, H2 och H5 för respektive försöksperson. Dessutom är jämförelsen mellan höger och vänster H2 genomfört på flera försökspersoner.

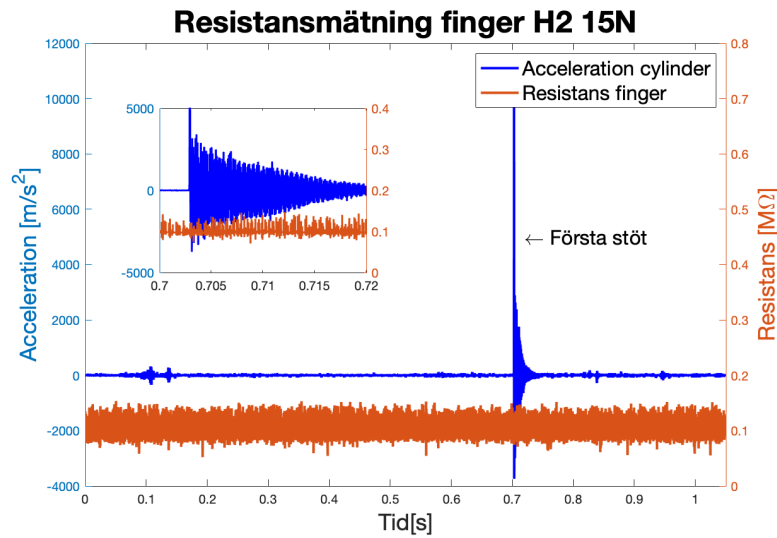
Parameter	Varierat intervall	Släppt
Anläggningskraft	0, 4 N, 5 N, 10 N, 15 N	Nej
Olika fingrar, samma person	H1, H2, H3, H4, H5	Nej
Samma fingertyp, höger/vänster hand	H2/V2	Nej
Samma fingertyp, olika personer	F1, F2, F3, F4, F5	Nej
Fuktighet	Uttorkad, normal, återfuktad	Nej
Hammartyngd	28 g, 76 g, 104 g	Nej

Figur 45 visar resultatet från en resistansmätning genomförd parallellt med en LDV-mätning brevid fingret direkt på cylindern, 13,2 mm från centrum. Utfört på finger H2 försöksperson 1 med anläggningskraft på 0,4 N och accelerationen är deriverad från LDV-mätningen. Den erhållna accelerationen för cylindern motsvarar de vibrationer som fingret utsatts för från underlaget och resistansen visar på hur fingret reagerat på det. Det är i denna figur tydligt att fingret inte släppts, erhåller inte heller något märkbart utslag vid första stöten då hammaren slår i cylindern. Observera att värdet för resistansen om det skulle släppts motsvarar 39,4 M Ω och att resistansen inte ens indikerar på att det är på väg att släppa.



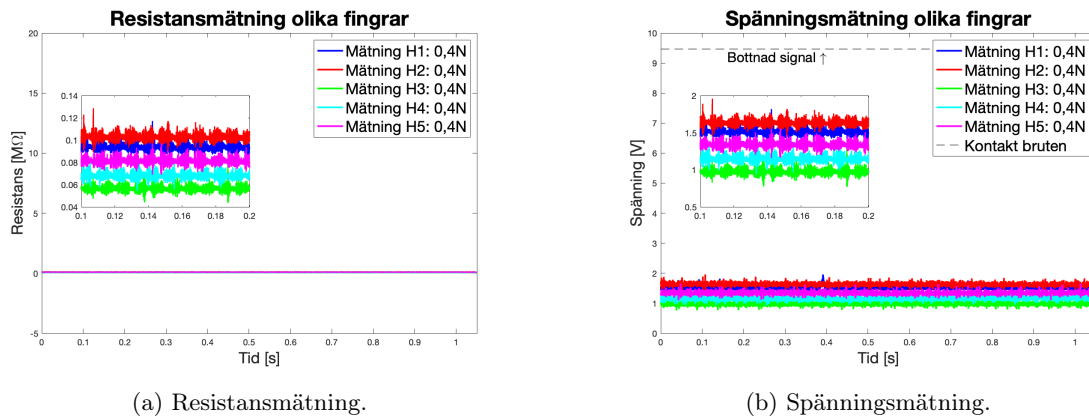
Figur 45: Resistansmätning för finger och acceleration för cylindern. Utfört på finger H2 försöksperson 1 med anläggningskraft 0,4 N och accelerationen är deriverad från LDV-mätning som utförts parallellt.

Vidare genomfördes motsvarande mätning fast för en anläggningskraft på 15 N, vilket visas i figur 46. Även här är det tydligt att det inte blir något utslag för resistansen vid första stöt, eller vid någon annan tidpunkt under mätningen.



Figur 46: Resistansmätning för finger och acceleration för cylindern. Utfört på finger H2 försöksperson 1 med anläggningskraft 15 N och accelerationen är deriverad från LDV-mätning som körts parallellt.

Resistansmätningarna genomfördes för flera olika fingrar och personer. I figur 47 visas mätningarna för då fingertypen varierats. Utfört på försöksperson 1, samtliga fingrar på höger hand. Noterbart är att mätningarna skiljer sig något vad gäller värdet för resistans respektive spänning men det finns ingen indikation på att något finger är på väg att släppa för varken resistans eller spänning. Dimensioner och information för alla fingrar som använts för experimentella mätningar listas i tabell 7.

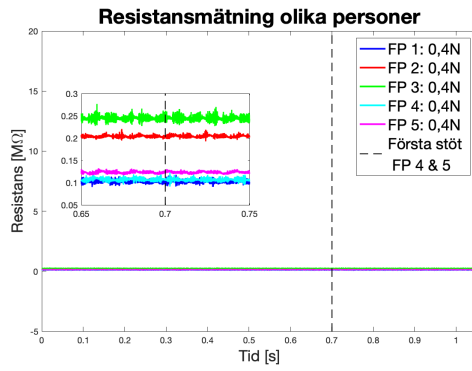


(a) Resistansmätning.

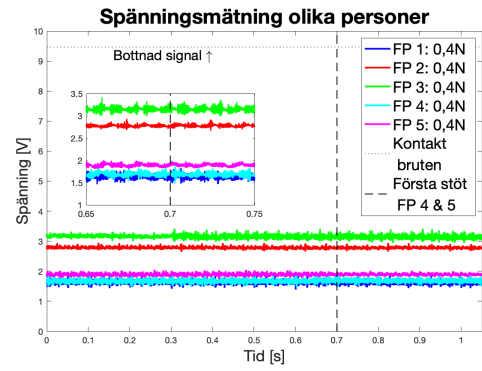
(b) Spänningsmätning.

Figur 47: Resistans- och spänningsmätning för finger H1, H2, H3, H4 och H5 försöksperson 1 med anläggningskraft 0,4 N för samtliga mätningar.

Dessutom genomfördes mätningar för fingrar hos olika personer, vilket presenteras i figur 48. Fem olika försökspersoner, med olika fingeregenskaper, vilket gav en variation för värdet på spänningen då fingret låg an mot kontaktytan. Noterbart är att även här går det inte att urskilja något tydligt utslag för varken resistans- eller spänningsmätningen. Dessutom går det inte att urskilja någon skillnad mellan de mätningar som har första stöten vid tidpunkten 0,7 s och de som har stöt vid annan tidpunkt.



(a) Resistansmätning.



(b) Spänningsmätning.

Figur 48: Resistans- och spänningsmätning för finger H2 FP 1-5 med anläggningskraft 0,4 N för samtliga mätningar. Den svartstreckade linjen motsvarar första stöten då hammaren slår i cylindern för mätningarna med försöksperson 4 och 5. Tidpunkten för första stöt är tagen från LDV-mätningar som gjordes parallellt.

8 Diskussion

I följande kapitel diskuteras studiens resultat, dess förbättringsområden och rekommendationer till vidare studier.

8.1 Utbredning av ultravibrationer genom fingret

Resultatet från LDV-mätningarna visar att det på ett väldefinierat sätt går att mäta ultravibrationers accelerationsnivå och uppskatta dämpningen av olika faktorer. Genom att studera inverkan av olika anläggningskrafter, fingerfuktighet och hammartyngd samt jämföra skillnaden mellan olika personer, fingrar och händer framgick att den största påverkan på vibrationernas förlust genom fingret är propagationsträckan. Propagationssträckan uppmättes ej för respektive mätning men kan uppskattas av fingertjockleken, se dimensioner i tabell 7 för försökspersonerna. Vid högre anläggningskrafter komprimeras fingret, sträckan vilket vibrationerna kan utbredas minskar och accelerationen dämpas till en betydligt mindre grad vilket framgår i både tabell 4 och 5. Mindre finger gav en markant större amplitud hos accelerationen på grund av samma orsak. Om accelerationsnivån är en bidragande faktor till ökad skaderisk visar resultatet att en person med mindre fingrar lider högre risk.

Inverkan av fingrets grovhet kunde ej studeras till en önskad grad på grund av smal variation inom försöksgruppen. Jämförelse av fingerfuktighet visar en tendens av att grovheten, och därmed styvheten har en effekt då det uttorkade fingret gav en amplitudförändring. Inom ett flertal yrken där arbetaren utsätts för ultravibrationer är arbetsmiljön hård. Frekvent slitage av skinnet gör huden hård och tjock, det hade därför varit intressant att jämföra likande dimensionerade fingrar men med olika tjock hud för att se om olika yrken utsätts för varierande skaderisk.

Vid jämförande av icke- och behandskade fingrar framgick tydligt att vibrationerna från impulsen dämpas mer för behandskade fingrar, se figur 41 och 42. Viktigt att notera är att förlusten från enbart handske ej fastställts. Det går ej att säkerställa från mätvärdena om handskena dämpar fullt till den grad som presenteras i tabell 5 eller till vilken grad dämpningen skett från utbredningen genom både handskens material och fingret. Förlusten efter handske men innan finger är alltså okänd. I figur 42 relateras handskenas dämpning mot bara fingrets och cylinderns acceleration vilket översiktligt visualiserar skillnaden i dämpningsgrad. Från diagrammet framgår tydligt att nitrilhandske uppvisade en marginell skillnad relativt utbredning genom bara fingret vilket tyder på att handsken ger ett ineffektivt och otillräckligt skydd mot ultravibrationer. För grövre handskar uppmättes under 10% av accelerationen på ovansidan nageln vilket indikerar ett bättre skydd, men fingret utsätts fortfarande för stora mängder ultravibrationer.

En viktigt sak att ha i åtanke angående resultaten för de handskbeklädda mätningarna, är att de handskena som gav bäst skydd mot vibrationer inte behöver vara de mest optimala typen av handskar för specifika situationer. Till exempelvis arbeten där hög fingerfärdighet krävs är det sällan rimligt att använda tjocka handskar, vilket hade lett till en nedsatt prestationsförmåga. Därav bör man lägga stor vikt på att reducera de vibrationerna som maskinen eller verktyget genererar mer lokalt, alltså på verktygen i sig, snarare än på personen som använder dem. Det här betonar vikten av den, som i april 2021, nya revideringen av EU:s maskindirektiv vilken föreslår att vibrationer och amplitud av transient acceleration från handhållna maskiner ska uppmätas.

De mätningar som utfördes för att undersöka den mån handen fungerar som vägledare observerades en tydlig och kraftig dämpning av vibrationsnivån med ökat avstånd. Dock var mätningen som utfördes på handleden väldigt brusig vilket kan förklaras av en icke-optimal positionering av LDV:n. Då den endast vreds och inte flyttades i sidled för att riktas mot de olika punkterna längs fingret. Genom att även flytta i sidled hade troligen resulterat i bättre resultat, detta var dock inte möjligt under studien.

För stor vikt skall inte läggas i den kvantitativa aspekten av resultaten för LDV-mätningarna, på grund av de uppvisade avvikelserna vid verifieringen. Kvalitativt sett framgår ändå en tydlig trend av hur

ultravibrationerna dämpas och till vilken grad. Trots att LDV-mätningarna på cylindern avviker så uppvisas en bra repeterbarhet för mätningar på fingret eller handske. Appendix figur 54, 55 och 56 framgår att spridningen av amplituden hos accelerationen är liten mellan repeterade mätningar vilket styrker resultatets trovärdighet.

8.2 Bestämelse av kontaktvillkor

Resistansmätningarna som genomförts visar på att fingrar inte släpper från en stel yta då de utsätts för ultravibrationer. Som visas i figur 45 och 46 så finns där inte heller någon indikation på att något skulle vara på väg att släppa. Då första stöten slår till så förblir resistansmätningen opåverkad. Motsvarande resultat erhöles för samtliga mätningar och indikerar på att fingrar har vissa egenskaper vad gäller flexibilitet. En intressant jämförelse är mellan figur 16, i verifieringen där fingertoppen släpper för låga anläggningskrafter, till vad som visas i resultatet. Det visar på att det troligtvis inte är den mjuka huden som bidrar till att fingret inte släpper utan också att lederna och fingrets inre struktur spelar en stor roll i hur den samt resten av handen och armen är positionerade jämt mot kontaktytan. Då fingrets falang placeras parallellt den vibrerande ytan ger fingret efter som effekt från fingrets alla leder. Men då fingertoppen placeras normalt ytan tas ledernas flexibilitet bort och vibrationerna propagerar längst fingerbenen så det inte kan deformeras i samma grad.

Att fingret inte släpper från kontaktytan under ultravibrationer anses vara ett gynnsamt resultat då det ska implementeras i simuleringar. Det ger ett konkret villkor om att det inte släpper, till skillnad från problematiken som uppstått om det hade gjort det och frågan om till vilken grad hade blivit aktuell.

Vidare observerades en viss ändring i spänning och resistans mellan mätningar som genomförts identiskt vad gäller parametrar. Under de statistiska mätningarna som genomfördes visade det sig att resistansen för fingret ökade med tiden då kontakt upprätthölls. Detta förklarar varför mätningar med precis samma parametrar gav olika värden för spänning och resistans. Följden blir att resistans- och spänningsvärdena i sig inte går att jämföra sinsemellan då tidpunkten från det att kontakt inleddes till att mätningen påbörjades inte varit konsekvent. Dock påverkar inte det resultatet i sig ty det som varit intressant är då spänningen gått mot sitt begränsade värde, vilket det inte indikerat på. Dessutom är mätsekvensen kort och någon vidare ökning är inte noterbar då mätningen väl påbörjades samt finns ingenting som visar på påverkan vid första stöt.

8.3 Verifiering av metod

För att verifiera vald metod kontrollerades försöksuppställningen och dess repeterbarhet. I följande delkapitel diskuteras de utförda kontrollerna.

8.3.1 Kontroll av uppställningen

Utifrån mätningarna som genomförts med stålkula och fingertopp går det att dra slutsatsen att uppställningen fungerar i det syfte den var menad för. Vid ett tidigt stadié märktes det att ett finger parallellt mot ytan inte släppte och därmed valdes fingertoppen för att ytterligare verifiera att ett fingerliknande objekt kan släppa med uppställningen. Fingertoppen släppte för låga tryck och kan väldigt generellt sägas vara ett mellanting mellan stålkula och falang. Detta tyder på att det antagligen inte bara är huden som är orsaken till om det släpper eller ej.

I avsnitt 6.1.1 framgår i figurerna att trots låg brusnivå hos spänningsmätningarna blir den bottnade resistansen oscillerande. Oscillationerna är en följd från ekvation 7 som används för att konvertera spänning till resistans. Då $U_{ut} \rightarrow U_{A, sig}$ blir nämnaren liten vilket gör att bråket blir stort.

En stor del av resultatets pålitlighet ligger i metodens repeterbarhet. För att säkerställa både mätinstrumentets trovärdighet och ingående ultravibrationer utfördes som beskrivet under avsnitt 6.1.2

nio stycken likartade mätningar efter varandra. Mätningarna uppvisade väl överensstämmande frekvensspektrum men ringningen på hastigheten och därmed accelerationen uppvisade större avvikelse än förväntat. Principen att excitera de longitudinella vibrationsmoderna i samma cylinder, med samma hammare och fallhöjd kan antas vara väldigt repetitivt. Slutsatsen som dras är att avvikelserna ligger hos mätsystemet. Avvikelserna kan ha uppkommit på grund av ett flertal faktorer, att LDV:n hade dålig signal, att mätpunkten ändrades mellan mätningar exempelvis om uppställningen råkades beröras eller vad som anses vara troligt att hammarhuvudet ej var fastskruvat. Det stadie i studien då de jämförande mätningarna utfördes noterades nämligen det problemet. Trots en avvikelse i amplitud uppvisades ett överensstämmande frekvensspektrum mellan mätningarna och de två dominerande frekvenserna i excitationen, första och andra longitudinella moden, hade liten spridning sinsemellan och relativt simuleringsresultaten.

8.3.2 Statiska mätningar

De statiska mätningarna, avsnitt 6.2, visade att användandet av elektrodgel ger mindre spridda värden för resistansen. Detta tyder på att det är av stor vikt att använda någon form av elektrisk ledande gel då mätningar utförs för få bästa möjliga kontakt mellan finger och krets. I figur 23 ökade resistansen upp till en kraft på 10 N. Det kan bero på ett minskat blodflöde i fingret som uppstår av anläggningskraften vilken komprimerar fingret. Slutsatsen är rimlig att dra då den största bidragande faktorn till kroppens totala resistans är hudens resistans. Det hade varit intressant om detta kunde verifieras genom att exempelvis mäta fingertoppens blodflöde under olika tryck. Dock började resistansen sjunka då kraften översteg 10 N, denna observation undersöktes inte vidare och är därför inget som kan förklaras av denna studie.

Under de statiska mätningarna noterades ett annat fenomen, se figur 24. Då fingret hade konstant kontakt med cylindern observerades det att spänningen ökade med tiden likt att fingret laddades upp. Fenomen är inget som undersökts djupare. Dock kan det vara en förklaring till varför resistansvärdet kunde variera mellan mätningar trots att de utfördes direkt efter varandra. En hypotes är att det kan vara effekt från värmeledningen mellan stålcylinder och finger. Stålcylindern är i termisk jämvikt med omgivningen med god värmeledningsförmåga relativt det varmare fingret. Då fingret placeras mot ytan leds värme bort från fingret till cylindern. Då elektrisk ledningsförmåga är temperaturberoende kan den längre kroppstemperaturen vara en orsakar till varför spänningen ökar med tiden. Från detta bör läsaren ta med att det enskilda resistans- eller spänningsvärdet ej behöver vara riktigt i jämförelse med andra värden eller bör tas ur kontext. Mer än det enskildas uppmätta värdet är det påvisade fenomenet att fingret ej släpper som kan dras som slutsats.

8.4 Felanalys

Resultatet kan ha påverkats av ett flertal faktorer och felkällor. En felanalys av studiens försöksgrupp och experimentella uppställning presenteras i följande delkapitel.

8.4.1 Försöksgrupp

För att göra försöksgruppen mer representativ behöver fler personer ingå i studien, exempelvis ett större åldersspann och olika yrken. Alla dessa faktorer antas ge fingrarna olika karaktär vilket skulle kunna påverka fingrets kontaktvillkor mot cylindern eller ultravibrationer utbredning genom. Det hade därför varit av intresse att utföra testerna på ett större antal personer, för att undersöka om det är möjligt att det finns personer med fingrar som skulle släppa från den stela ultravibrerande ytan men var ej möjligt med projektets upplägg samt rådande pandemi att undersöka.

8.4.2 Uppställning

Under arbetets gång har flera problem med uppställningen, se figur 4, uppdragats. Hela vagnen är stående på fyra rullskridskorhjul. Dessa hjul är mjuka och blir därmed platta med tiden då de utsätts för påfrestningar, vilket påverkar noggrannheten vid kraftmätning negativt. Med jämna mellanrum behöver hjulen snurras på manuellt för att få hjulens runda sida mot underlaget. Då hjulen justeras behöver hela vagnen lyftas, vagnen kan då förflyttas något vilket även resulterar i att mätpunkten för LDV:n ändras. För att höja noggrannheten hos kraftmätningen bör hjulen bytas ut mot andra hjul med bättre materialegenskaper så manuella justeringar inte påverkar resultatet. Om resultatet påverkats i studien på grund av kraftmätningarna bör det endast skapat en liten effekt på det uppmätta resistansvärde, då skillnaden på olika krafter hade minimal påverkan och inte påverka studiens frågeställning om fingret släpper eller inte från kontaktytan.

För att mäta fingrets tryckkraft användes en dynamometer. Vid de flesta mätningar var det svårt att hålla ett konstant tryck, särskilt vid låga och höga tryck. Förutom de problem som uppstod med kraftmätningarna i uppställningen kan dynamometern haft interna osäkerheter som vidare bidrog till osäkerheter vid mätningarna. För att minimera denna eventuella felkälla tarerades dynamometern inför samtliga mätningar.

Under det senare stadiet av experiment började hammarhuvudet ta skada. Vid ett antal tester lossnade stålhuvudet från hammaren vilket troligtvis bidrog till spridningen hos accelerationsnivåerna. Gångorna observerades att ha tagit skada på hammarhuvudet så det kunde inte fästas tillräckligt hårt. Det lösa hammarhuvudet bidrog till att stöten av fallet blir mindre elastiskt och accelerationen minskar. Då händelsen uppstod i slutskedet av testerna löstes problemet genom att använda gänglås. Problemet hade kunnat åtgärdas genom att ta fram en större uppsättning av stålhuvuden för att med jämna mellanrum kunna byta ut huvudet då slitage uppstått.

För att studera accelerationsnivån hos mätningarna deriverades laserdopplervibrometers utsignal. Ett välkänt fenomen är uppkomsten av transienter i den uppmätta hastigheten. Vid derivering ger även små sådana toppar stort utslag. Då accelerationen studeras är det något att ta i åtanke. En alternativ lösning som ej testades under den här studien är Kurtosis ratio vilket kan användas för att eliminera transienter vid LDV-mätningar.

För att ansluta fingret till kretsen användes mäsningssfolie. För bra kontakt och ledning användes elektroddel mellan foliet och fingret. Då olika resistansvärden för fingret observerades mellan mätningarna tyder detta på att metoden inte speglar fingrets faktiska resistans på ett korrekt sätt. Variationen kan ha orsakats av att ledningsförmågan påverkades av hur väl foliet lindades runt fingret. Det var svårt att få bra repeterbarhet vid lindning av folien då den satt fast olika hårt på fingret och hade en tendens att röra på sig under försöken. Dessutom observerades slitage och oxidation på folien vilket stärker misstanken kring brister hos metoden att ansluta fingret till kretsen. Alltså kan mätningarna enbart säkert fastställa de två binära fallen, kontakt med ytan eller ingen kontakt med ytan. Trots bristerna ger de utförda mätningarna tillräckligt med data för att bestämma kontaktvillkoret mellan den vibrerande ytan och fingret.

8.5 Rekommendationer till vidare studier

Resultaten från LDV-mätningarna för att studera ultravibrationers propagering och fortplantning i ett finger samt arbetshandskars dämpande faktor visar att vibrationernas amplitud går att mätas med relativt hög noggrannhet och trovärdighet. Upptäckten är viktig för arbetet att framlägga tillräckligt med belägg för att revidera dagens ISO-standard men området behöver undersökas ytterligare.

Som nämnt tidigare hade det varit av fördel att fånga in en större försöksgrupp med ett mer varierat åldersspann och olika yrkesroller. En mer representativ försöksgrupp ger möjligheten att undersöka om människors ålder och olika dagliga arbetsaktiviteter påverkar fingrarna. Som det framgår i avsnitt 3.2.2 kan olika sjukdomar påverka fingrets resistans. Det hade varit intressant att vidare studera personer

med dessa sjukdomar och se ifall det är av större fara för till exempel en diabetiker att arbeta med ultravibrerande verktyg.

Tidigare simuleringar för att studera kontaktvillkoret och ultravibrationers propagering genom fingret har visat att fingret kan släppa från ytan. De experimentellt framtagna resultaten påvisar att den tendensen motbevisas inom de begränsningar som undersökts. Det här resulterar i att simuleringarna använder en felaktig modell av fingret, och mer specifikt skinnet. Genom att jämföra resultatet från resistansmätningarna för den distala falangen och verifiering av resultat då stålkula och fingertopp undersökts framgår att det snarare är ingående komponenter av fingret som avgör om fingret har tendens att släppa än skinnet. Då fingertoppen hölls mot den vibrerande ytan blev propagationssträckan genom skelett längre och fingret släppte tydligt från ytan. Men då den distala falangen hölls mot ytan och sträckan genom ben var betydligt kortare visade mätningarna att fingret klart inte släppte mot ytan.

Ytterligare faktorer som kan ha påverkat resultatet är lederna i fingret. Då fingret placeras parallellt med den vibrerande ytan har det möjlighet att fjädra mot rörelsen. Intressant för vidare studier hade därför varit intressant att studera effekten av fingrets styvhet genom att exempelvis placera den proximala eller intermedial falangen mot den vibrerande ytan eller placera en styv skena längst fingret för att motverka dess fjädring. Fingrets styvhet kan även kopplas till faktorer som ålder och sjukdomar som exempelvis ledgångsreumatism. Att närmare studera de olika falangerna är även intressant för en bättre förståelse över det verkliga skeendet då verktyg oftast hålls med hela handen och alla delar av fingret utsätts för ultravibrationer.

En av studiens frågor är kring de statistiska mätningarnas utseende. Efter cirka 10 N sjunker resistansen igen vilket inte överensstämmer med vår tes om minskat blodflöde. Genom att studera och mäta blodflödet lokalt i fingret kan man potentiellt finna hur flödet påverkas av olika anläggningskrafter.

Antagande är att det minskade blodflödet då fingret trycks mot en hård yta skulle eventuellt kunna bidra till nervskador eller andra skador. Det skulle därför vara intressant att på cellnivå studera hur detta påverkar cellerna i fingrarna, inte minst för att vad som faktiskt sker inuti fingret då det utsätts för ultravibrationer är okänt. Precis uppstartat hos RISE är en studie för att undersöka hur enskilda typer av odlade celler påverkas av ultravibrationer.

Mässingsfolien som används för att koppla fingret till kretsen medfört en del problem under projektets gång bör detta bytas ut till en mer praktisk och felsäker konstruktion. Vid vidare studier hjälper en lösning till att förbättra resistansmätningarna.

I början av projektet användes trigging i LabVIEW för att automatiskt starta och avsluta mätningen samt spara datan i rätt format. Detta visade sig vara problematiskt då piezokristallen som användes för triggingen i LabVIEW introducerade stora störningar i resistansmätningarna. Då hammaren kom i kontakt med den ledande stålcyklindern leddes de piezoelektriska strömmarna genom och störde resistansmätningarna. För att lösa problemet skulle eventuellt ett icke-piezoelektriskt material som inte heller är elektriskt ledande användas mellan piezokristallen som är monterad på hammaren och stålcyklindern. För att nå önskade accelerationsnivåer, kring 250 km/s^2 , krävs det också att materialet är mycket hårt för att inte dämpa accelerationen.

9 Slutsatser

Syftet med projektet har varit att studera i vilken utsträckning ultravibrationer dämpas i fingrar samt testa hypotesen om ett finger kan släppa från en stel yta vid stötvågor med högt frekvensinnehåll.

Dämpningen av ultravibrationer i fingrar har visats variera mellan olika fingrar och personer. Dämpningsgraden beror på fingrets dimensioner och dämpas mer vid lägre belastning. Slutsatsen blir därmed att hur mycket ultravibrationer dämpas i ett finger är individuellt och beror av anläggningskraften.

Vidare var det tydligt att handskar dämpade avsevärt, och somliga minskade accelerationsnivån till den grad att endast några procent kvarstod. Därtill minskade dämpningsgraden vid stigande tryck för samtliga handskar. Noterbart var att nitrilhandske dämpade minst, enstaka procent mer än utbredning genom enbart finger. Dessutom visades att en vibrationsisolerande handske dämpade ultravibrationerna allra bäst vid samtliga tryck av de handskar som undersökts. Följden av detta blir att handskar dämpar ultravibrationer i viss utsträckning.

Resistansmätningarna som genomförts har visat på att ett finger inte släpper en stel yta vid stötvågor med högt frekvensinnehåll. Däremot så bör det beaktas att den här studien är genomförd för en försöksgrupp som inte tar i beaktande fingrar som skiljer sig avsevärt. Slutsatsen blir därmed att för ett finger, som förhåller sig till de egenskaper likt inom försöksgruppen och begränsningar av studien, inte släpper från kontaktytan då det utsätts för höga frekvenser.

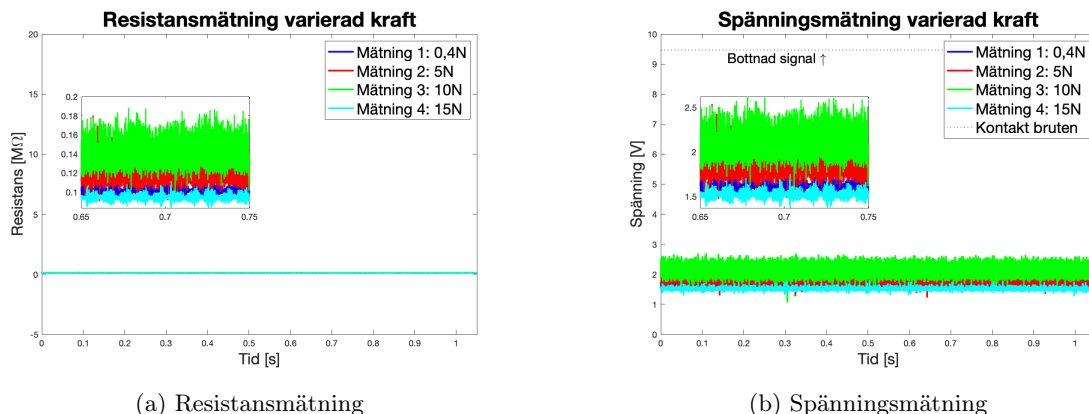
Referenser

- [1] *Mechanical vibration — Measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration — Part 1: General requirement*. en. Standard ISO 5349-1:2001. International Organization for Standardization, 2001. URL: <https://www.iso.org/standard/32355.html>.
- [2] Arbetsmiljöverket. ”Arbetsmiljön 2017 rapport 2018:2 - Tabellbilaga”. I: (okt. 2018). URL: <https://www.av.se/globalassets/filer/statistik/arbetsmiljon-2017/arbetsmiljostatistik-tabellbilaga-arbetsmiljon-2017-rapport-2018-2.pdf>.
- [3] S. C. Shen. ”Hand-arm vibration syndrome: What family physicians should know”. I: *Can Fam Physician* vol. 63 nr. 3, (mars 2017), s. 206–210. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5349719/>.
- [4] H. Berg, M. Demant, J. Edwijn och D. Gustafsson. *An investigation of the shear modulus for stratum corneum and epidermis- Wave propagation in human tissue from transient vibrations*. Tekn. rapport. Chalmers University of Technology, 2016. Opublicerad.
- [5] P. Mathiyalagan och P. Nadafan. ”Wave propagation in human tissue from transient high frequency vibrations”. Examensarb. Chalmers University of Technology, 2020. DOI: 20.500.12380/301702.
- [6] European Commission. *Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on machinery products*. April 2021. URL: <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/45508?locale=en>.
- [7] H. Lindell. ”Attenuation of hand-held machine vibrations”. I: (nov. 2017). URL: <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/253449/253449.pdf>.
- [8] John Hopkins Medicine. *Raynaud’s Phenomenon*. URL: <https://www.hopkinsmedicine.org/health/conditions-and-diseases/raynauds-phenomenon>.
- [9] C. R. Harding. ”The stratum corneum: structure and function in health and disease”. I: *Dermatologic Therapy* vol. 17 nr.s1, (jan. 2004), s. 6–15. DOI: 10.1111/j.1396-0296.2004.04S1001.x.
- [10] M. Ayyildiz, M. Scaraggi, O. Sirin, C. Basdogan och B. N. J. Persson. ”Contact mechanics between the human finger and a touchscreen under electroadhesion”. I: *PNAS* vol. 115 (dec. 2018). DOI: 10.1073/pnas.1811750115.
- [11] R. M. Fish och L. A. Geddes. ”Conduction of Electrical Current to and Through the Human Body: A Review”. I: *Eplasty* vol. 9 (okt. 2009), s. 407–421. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2763825/>.
- [12] A. E. Hoetink, T. J. C. Faes, K. R. Visser och R. M. Heethaar. ”On the flow dependency of the electrical conductivity of blood”. I: *in IEEE Transactions on Biomedical Engineering* vol. 51 nr. 7, (juli 2004), s. 1251–1261. DOI: 10.1109/TBME.2004.827263.
- [13] F. G. Hirsch et al. ”The Electrical Conductivity of Blood”. I: *Relationship to erythrocyte concentration. Blood*. vol. 5 nr.11, (nov. 1950), s. 1017–1035. DOI: 10.1182/blood.V5.11.1017.1017.
- [14] P. P. Urone, R. Hinrichs, K. Dirks och M. Sharma. ”College Physics”. I: OpenStax, sept. 2020. Kap. 20.3 Resistance and Resistivity, s. 853–858. URL: <https://openstax.org/details/books/college-physics>.
- [15] S. I. Bîrlea, P. P. Breen, G. J. Corley, N. M. Bîrlea, F. Quondamatteo och G. ÓLaighin. ”Changes in the electrical properties of the electrode-skin-underlying tissue composite during a week-long programme of neuromuscular electrical stimulation”. I: *Physiological measurements* vol. 35 (jan. 2014). DOI: 10.1088/0967-3334/35/2/231.
- [16] Y. Vardar, B. Güclü och C. Basdogan. ”Effect of Waveform in Haptic Perception of Electrovibration on Touchscreens”. I: vol. 9774 (juli 2016). DOI: 10.1007/978-3-319-42321-0_18.
- [17] S. Gretarsson. Personlig konversation. Mars 2021.

A Övriga mätningar

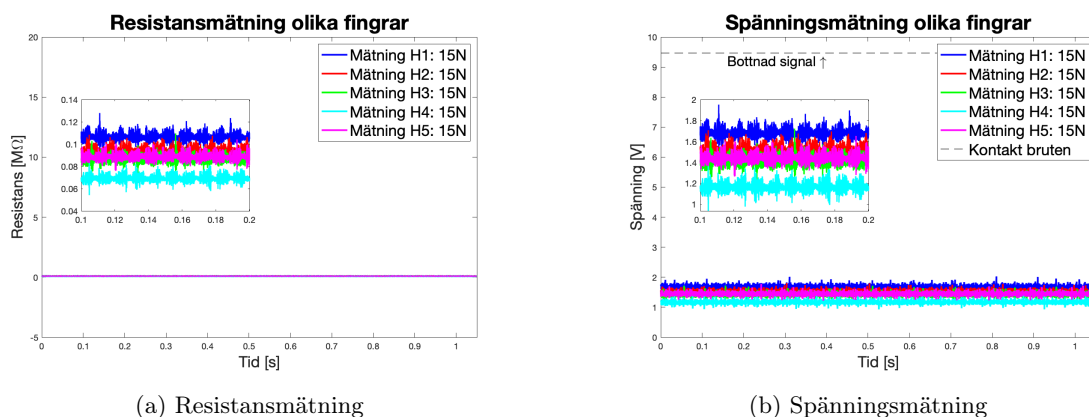
Utöver de mätningar som presenteras under resultat visas i detta avsnitt figurer vilka styrker resultatet som presenteras i tabell 6. Presenteras i form av figurer från resistans- och spänningsmätning för respektive parameter.

I figur 49 visas resistans- och spänningsmätningar för anläggningskrafterna 0, 4, 5, 10 och 15 N. Utfört på försöksperson 1 finger H2. Noterbart är att mätningarna skiljer sig något vad gäller värdet för resistansen men det går inte att urskilja när första stöt inträffar.



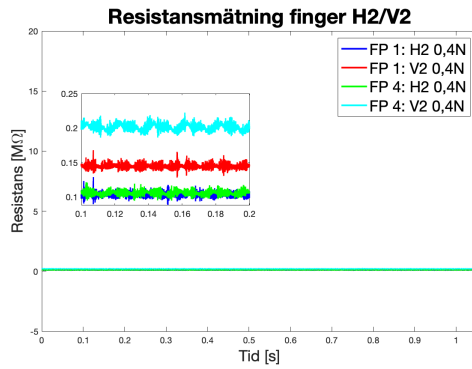
Figur 49: Resistans- och spänningsmätning för finger H2 försöksperson 1 med anläggningskraften 0, 4, 5, 10 och 15 N.

I figur 47 visas resultatet för då olika fingrar testats med en anläggningskraft på 15 N. Åter finns ingen indikation på att något finger skulle släppa kontaktytan.

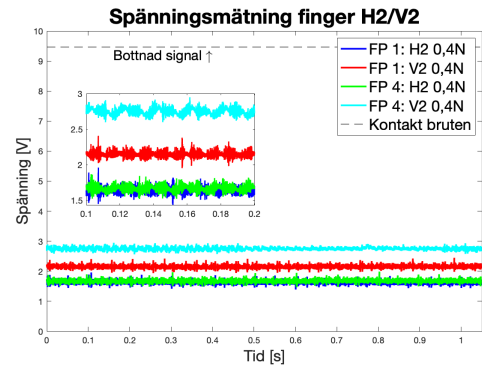


Figur 50: Resistans- och spänningsmätning för finger H1, H2, H3, H4 och H5 försöksperson 1 med anläggningskraft 15 N för samtliga mätningar.

En jämförelse mellan höger och vänster hand presenteras i figur 51. Utfört på försöksperson 1 och 4. Observera att mätningarna skiljer sig något vad gäller värdet för resistansen men finns ingen indikation på när första stöt inträffar.



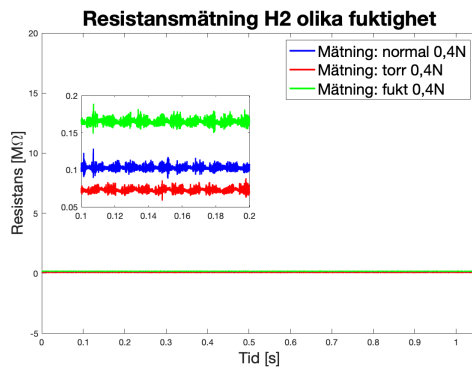
(a) Resistansmätning



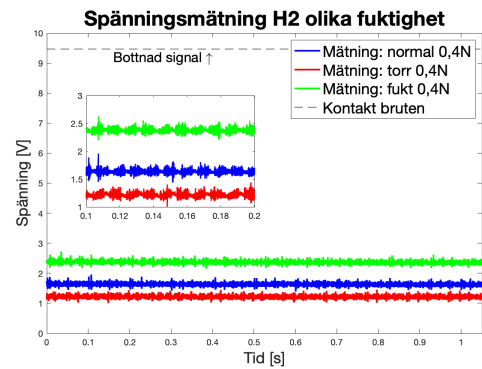
(b) Spänningsmätning

Figur 51: Resistans- och spänningsmätning för finger H2 och V2 försöksperson 1 med anläggningskraft 0,4N för samtliga mätningar.

I figur 52 visas resultatet för de mätningar som gjordes för olika fuktigheter på fingret. Vanligt, återfuktat samt torrt från aceton utfördes av försöksperson 1.



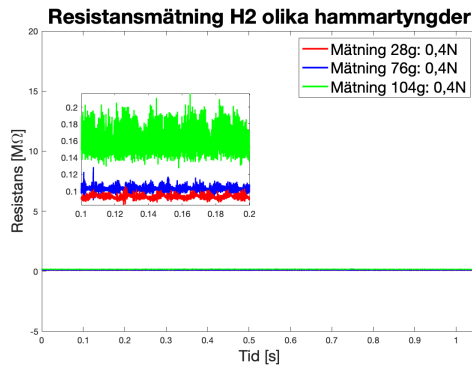
(a) Resistansmätning



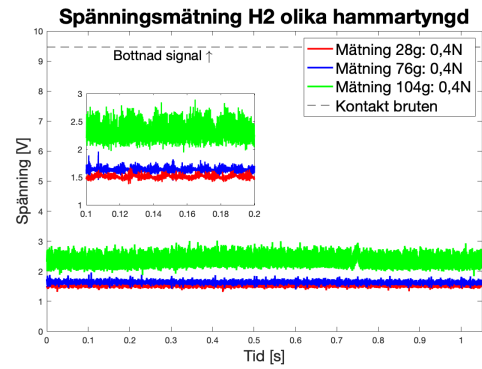
(b) Spänningsmätning

Figur 52: Resistans- och spänningsmätning för finger H2 försöksperson 1 med anläggningskraft 0,4N för samtliga mätningar. Vanligt, återfuktat med vatten samt torrt från aceton.

I figur 53 visas resistans- och spänningsmätning för då olika vikter på hammaren undersökts. Ingen indikation på att det släppt.



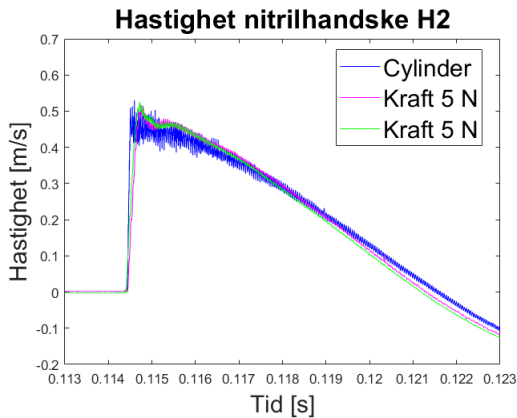
(a) Resistansmätning



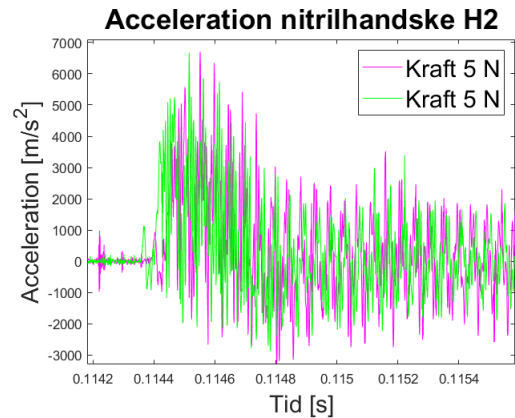
(b) Spänningsmätning

Figur 53: Resistans- och spänningsmätning för finger H2 försöksperson 1 med anläggningskraft 0,4N för samtliga mätningar. Tre olika vikter på hammare, 28 g, 76 g och 104 g.

För att visa repeterbarheten för mätningarna för de behandskade fingrarna, visas nedan några av graferna för olika kraft och typ av hanske. I figur 54 visas hastighet och accelerationsmätning för nitrilgummihandske för 5 N. Som det tydligt går att urskilja är mätningarna lika varandra, vilket tyder på god repeterbarhet.



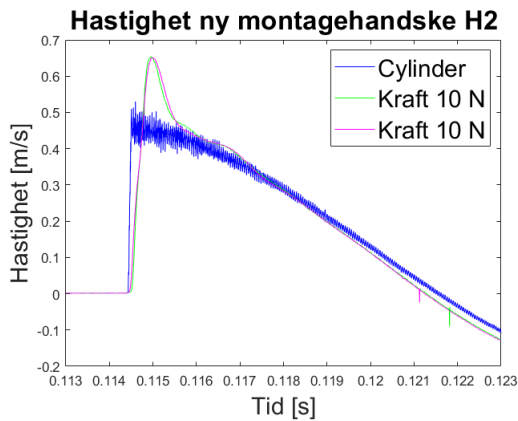
(a) Hastighetsmätning



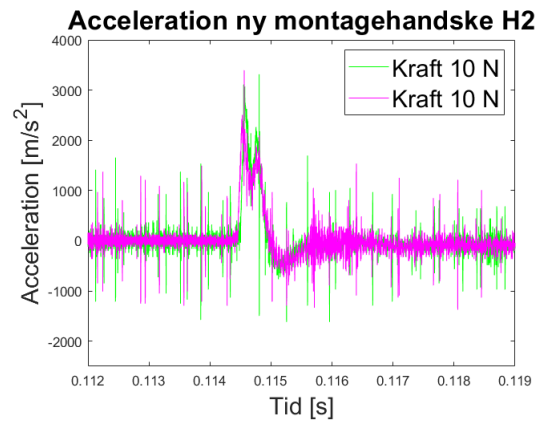
(b) Accelerationsmätning

Figur 54: Hastighet- och accelerationsmätning för nitrilgummihandske för 5 N relativt 120 mm stålcy-lindern.

Figur 55 visas hastighet och accelerationsmätning för montagehandske för 10 N. Återigen går det att se att de två kurvorna är lika.



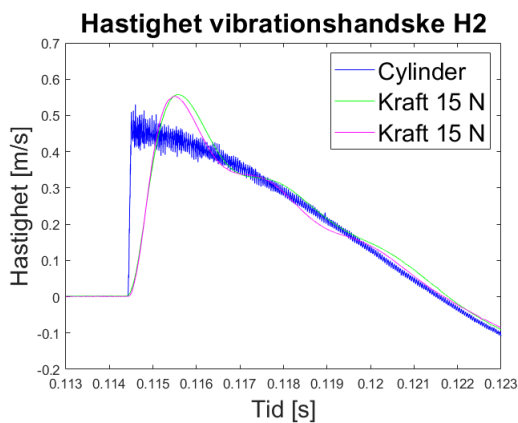
(a) Hastighetsmätning



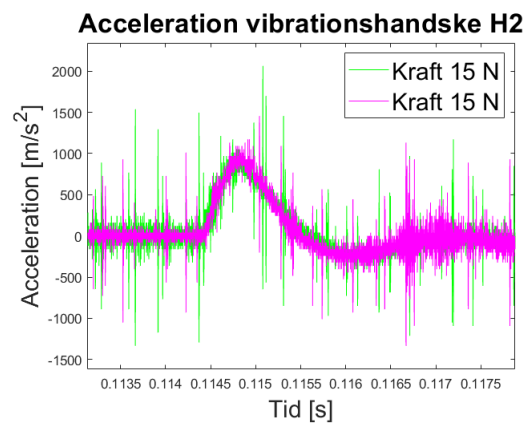
(b) Accelerationsmätning

Figur 55: Hastighet- och accelerationsmätning för ny montagehandske för 10 N relativt 120 mm stål-cylindern.

Slutligen i figur 56 visas hastighet och accelerationsmätning för vibrationshandske för 15 N. Även här ses det att kurvorna är lika.



(a) Hastighetsmätning



(b) Accelerationsmätning

Figur 56: Hastighet- och accelerationsmätning för vibrationsisolerande handske för 15 N relativt 120 mm stålcylindern.

B Videor stötförlopp

Nedan listas länkar till videor vilka visar stötförloppet i slow motion då hammaren slår i stålcyindern för respektive objekt. De är filmade med Sony RX10 II höghastighetskamera under mätningar för verifiering av metod.

- Stålkula med diameter 25,4mm: <https://youtu.be/ZBgMt6x348E>
- Finger (Försöksperson 5 H2): <https://youtu.be/O-pIaJvZZAs>
- Fingertopp (Försöksperson 5 H2): https://youtu.be/rYTVimvd_Qs

C Härledningar

Då alla spänningsmätningar gjordes relativt signaljorden som har en potential på 15 V subtraheras dessa 15 V i samtliga noder. I kretsens första del kan potentialen i nod A som kopplar R_2 på 10 k Ω , beräknas med spänningsdelning,

$$V_A = \frac{10 \text{ k}\Omega}{2,2 \text{ k}\Omega + 10 \text{ k}\Omega} 30 \text{ V} \approx 24,49 \text{ V}. \quad (8)$$

Denna spänning, V_A , är relaterad kretsens jord vilket motsvarar en potential på 9,59 V relativt signaljorden. Denna spänning relativt signaljorden kallas $U_{A,sig}$. Denna spänning ligger över resistorn R_2 och seriekopplingen mellan potentiometern, stålcyllindern och fingret. Då cylindern har så låg resistans i jämförelse med fingret kan cylinderns resistans försummans. Alltså ligger $U_{A,sig}$ över seriekopplingen mellan potentiometern och fingret. Spänningen som mäts i **LabVIEW** motsvarar spänningen (U_{ut}) mellan operationsförstärkarens utgång och signaljorden, alltså samma spänning som ligger över fingret. Genom Kirchhoffs spänningslag med spänningen över potentiometerns U_{pot} , nodens $U_{A,sig}$ och fingrets $U_{finger} = U_{ut}$ kan följande uttryck tecknas,

$$U_{nod,sig} = U_{pot} + U_{finger} = U_{pot} + U_{ut}. \quad (9)$$

Då både $U_{A,sig}$ och U_{ut} är kända kan vi teckna ett uttryck för U_{pot} enligt,

$$U_{pot} = U_{A,sig} - U_{ut}. \quad (10)$$

Alltså blir strömmen genom potentiometern och fingret (enligt Ohms lag),

$$I_{potentiometer,finger} = \frac{U_{pot}}{R_{pot}} = \frac{U_{A,sig} - U_{ut}}{R_{pot}}. \quad (11)$$

Genom att applicera ohms lag igen på U_{finger} fås R_{finger} enligt,

$$R_{finger} = \frac{U_{ut}}{U_{A,sig} - U_{ut}} R_{pot}. \quad (12)$$

D Försöksgruppens fingrar

För alla fingrar som användes till experimentella mätningar noterades fingrets bredd och tjocklek i linje med nagelbandet, approximativt vid dopplervibrometers mät punkt se figur 57a och 57b. Dimensionerna mättes med ett skjutmått vilken trycket ihop till den grad att fingrets precis började ge motstånd.



(a) Försöksperson 5, H1 med uppmätt bredd på 16,11 mm.



(b) Försöksperson 5, H1 med uppmätt tjocklek på 10,74 mm.

Figur 57: Fotografi taget på H1 på försöksperson 5 med dimensioner i mm mätt med skjutmått för att illustrera hur bredd och tjocklek mäts.

Tabell 7: Tabell med information om försökspersoner som deltagit i studien och dimensioner för deras fingrar, bredd: b och tjocklek: t.

Försöksperson	Beskrivning	Dimension finger
1	Man, 21, spelar gitarr vilket gör att vänster hand har något grövre fingertoppar, jobbat som montör på monteringslina.	H1: b= 20,01 mm, t= 15,10 mm H2: b= 16,52 mm, t= 13,55 mm H3: b= 16,97 mm, t= 14,01 mm H3: b= 15,25 mm, t= 13,95 mm H5: b= 13,85 mm, t= 11,90 mm V2: b= 16,48 mm, t= 13,47 mm
2	Kvinna, 21, utför inga noterbara aktiviteter eller livstil med påverkande effekt på fingrarnas grovhet och/eller ytskikt.	H1: b=15,00 mm, t=11,5 mm H2: b=11,21 mm, t=9,00 mm H5: b=10,00 mm, t=8,00 mm
3	Man, 26, utför inga noterbara aktiviteter eller livstil med påverkande effekt på fingrarnas grovhet och/ eller ytskikt.	H1: b= 18,69 mm, t= 13,23 mm H2: b= 15,14 mm, t= 10,26 mm H5: b= 14,27 mm, t= 9,79 mm V2: b= 15,14 mm, t= 10,30 mm
4	Man, 21, Har för 10 år sedan haft en spricka i höger ring- samt lillfinger.	H1: b=21 mm, t=12,88 mm H2: b=15,55 mm, t=12,20 mm H5: b=13,10 mm, t=10,95 mm V2: b=15,12 mm, t=12,56 mm
5	Kvinna, 21, utför inga noterbara aktiviteter eller livstil med påverkande effekt på fingrarnas grovhet och/eller ytskikt men har något överrörliga leder i fingrar och hand.	H1: b=16, 11 mm, t=10, 74 mm H2: b=12, 98 mm, t=10, 65 mm H5: b=9, 74 mm, t=8, 58 mm



CHALMERS