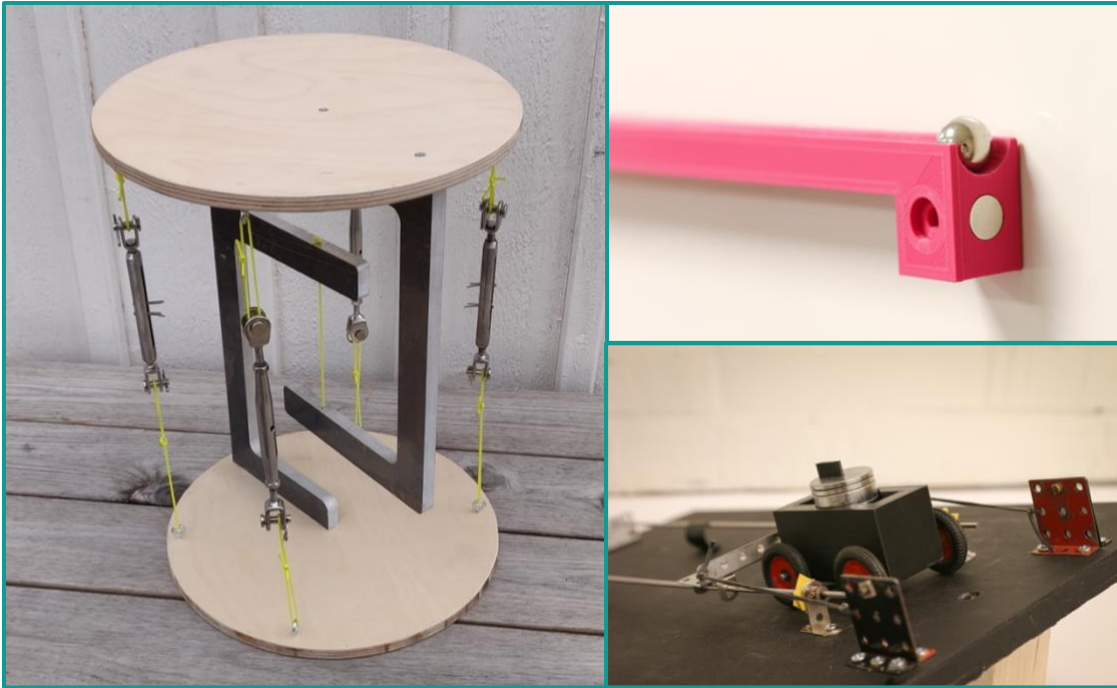




CHALMERS



Studio i mekanik och hållfasthetslära

Tillverkning och uppdatering av experiment- och demonstrationsutrustning

Kandidatarbete inom Industri- och materialvetenskap

SOFIE ANSGAR
ERIK GUNNARSSON
FILIP GUSTAFSSON
TIM SCHÜLER
KARIN WESTERLUND

INSTITUTIONEN FÖR INDUSTRI- OCH MATERIALVETENSKAP
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2022

www.chalmers.se

KANDIDATARBETE 2022

Studio i mekanik och hållfasthetslära

Tillverkning och uppdatering av experiment- och
demonstrationsutrustning

SOFIE ANSGAR
ERIK GUNNARSSON
FILIP GUSTAFSSON
TIM SCHÜLER
KARIN WESTERLUND

Institutionen för Industri- och materialvetenskap
Avdelningen för Material och beräkningsmekanik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2022

Studio i mekanik och hållfasthetslära
Tillverkning och uppdatering av experiment- och demonstrationsutrustning

SOFIE ANSGAR
ERIK GUNNARSSON
FILIP GUSTAFSSON
TIM SCHÜLER
KARIN WESTERLUND

© Sofie Ansgar · Erik Gunnarsson · Filip Gustafsson · Tim Schüler · Karin Westerlund, 2022

Handledare: Peter Folkow, Avdelningen för Dynamik, Institutionen för Mekanik och maritima vetenskaper
Examinator: Mats Ander, Avdelningen för Material och beräkningsmekanik, Institutionen för Industri och materialvetenskap

Omslag:
Vänster: Tensegritetsspall
Övre höger: Modul till kulbana
Nedre höger: Flygande bil-experiment

Skrivet i Microsoft Word
Göteborg, Sverige 2022

Abstract

The studio in Engineering Mechanics and Solid Mechanics is a room in the basement of “Maskinhuset” at Chalmers University of Technology. The studio is used for storing experiments and as a pedagogical workshop where students come during their courses in engineering mechanics, solid mechanics and machine elements. The purpose is to give students further practical aspects of the otherwise difficult theoretical phenomena that are presented in lectures.

Since 2013, when the first bachelor’s thesis in the studio was carried out, new experiments have been developed every year in relevant areas of the courses and old experiments have been further developed for improved usage. After reviewing previous years' bachelor’s theses, it became clear that great focus has been on areas teachers believe are relevant. As a result this year’s focus has been on what students find difficult. To identify challenging areas a questionnaire was sent out to students at selected programs that take the basic courses in engineering mechanics and solid mechanics theory.

After the responses to the questionnaire and previous years' interviews with teachers were analyzed, it became clear what the students experienced as difficult and what areas teachers were happy to see more experiments in. The results of the survey were compiled and the construction of the new experiments and the restructuring and upgrading of old experiments could begin.

During this year's work, many experiments have been updated while three new experiments have been developed. These new experiments cover topics such as forces in cords, throwing parabolas, tensegrity and impulse. The old experiments that have been updated and further developed cover moments of mass inertia, forces in cords and center of gravity.

With respect to the teaching that is conducted today at Chalmers, both the new and old experiments complement the heavy theoretical studies in a good way, but further work will be needed to give the students an even deeper understanding in the future. For example, the survey showed that principal stress is an area that would need an experiment, which the group also feels would have significantly facilitated the concept.

Sammanfattning

Studion i mekanik och hållfasthetslära är en lokal i maskinhusets källare på Chalmers tekniska högskola. Studion utnyttjas för förvaring av utrustning till experiment och brukas som pedagogisk verkstad. Hit kommer studenter under grundkurser inom mekanik, hållfasthetslära och maskinelement för att få en praktisk aspekt av de annars utmanande teoretiska innehållet.

Sedan 2013, då det första kandidatarbetet i studion genomfördes, har nya experiment utvecklats inom relevanta områden och gamla experiment vidareutvecklats för att underlätta och förbättra användningen. Efter genomgång av den befintliga utrustningen upptäcktes att stort fokus har legat på de områden lärare anser vara relevanta gällande experiment. Detta arbete har i stället fokuserat på vad studenterna tycker är svårt. Detta genomfördes med hjälp av en elektronisk enkät som skickades ut till berörda program för grundkurser i mekanik och hållfasthetslära.

Efter enkätstudie samt analys av tidigare års intervjuer med lärare stod det klart vad studenterna upplevde vara svårt samt vilka områden lärare gärna hade sett fler experiment inom. Enkätens resultat sammanställdes och de nya experimentens tillverkning samt de gamla experimentens uppdatering och upprustning påbörjades.

Under arbetet har flertalet experiment uppdaterats och tre helt nya experiment har utvecklats. De nytillkomna experimenten berör ämnen som linkrafter, kastparabler, tensegritet och impuls. De gamla experimenten som uppdaterats och vidareutvecklats relaterar till bland annat masströghetsmoment, linkrafter och tyngdpunkt.

Med den undervisning som idag bedrivs på Chalmers kompletterar både de nya och uppdaterade experimenten grundkursernas teori på ett bra sätt, men fortsatt arbete behövs för att ge studenterna en ännu djupare förståelse. Exempelvis visade enkäten att huvudspänningar är ett område som skulle vara i behov av ett experiment, vilket även gruppen upplever hade underlättat konceptet markant.

Förord

Rapporten utgör en påbyggnad av en rad tidigare kandidatarbeten som sedan 2013 utvecklat en studio inom mekanik och hållfasthetslära. Denna studio används inom grundkurser i dessa ämnen. Detta har genomförts under institutionen för Industri- och materialvetenskap, avdelningen för Material och beräkningsmekanik och vid institutionen för Mekanik och maritima vetenskaper, avdelningen för Dynamik vid Chalmers tekniska högskola. Rapporten och arbetet har genomförts och framställts av fem civilingenjörsstudenter vid fyra olika program; Automation och mekatronik, Maskinteknik, Teknisk Design samt Samhällsbyggnadsteknik.

Vi i projektgruppen vill tacka de som under vägen lagt ner tid och engagemang för att hjälpa oss att föra arbetet framåt. Vi vill tacka Reine Nohlborg och Jan Bragée vid Chalmers prototypplabb för kontinuerlig vägledning under flertalet delprojekt under arbetets gång. Vi vill även tacka alla de studenter som hjälpt oss att välja fokusområden genom att svara på den enkät som skickades ut. Ett tack riktas till Magnus Karlsten vid FysikLek för vägledning vid utformning av experiment och för att vi fick komma och besöka deras lokaler för inspiration. Utöver detta vill vi även tacka Thomas Gunnarsson som bidragit med industriteknisk hjälp under arbetet.

Ett stort tack riktas även till vår examinator Mats Ander och handledare Peter Folkow som med sitt brinnande engagemang för pedagogik, mekanik och hållfasthetslära hjälpt oss mycket under hela arbetet.

Slutligen vill vi uppmuntra kommande projektgrupper i studion att ta del av de lärdomar och ta vara på de resultat som erhållits för att bibehålla en långsiktig utveckling av studion och dess utrustning.

Göteborg 2022-05-12

Sofie Ansgar, Erik Gunnarsson, Filip Gustafsson, Tim Schöler, Karin Westerlund

Innehållsförteckning

1	INLEDNING.....	1
1.1	SYFTE.....	1
1.2	URVAL OCH AVGRÄNSNINGAR	1
1.3	METOD.....	2
1.3.1	<i>Inventering av studion</i>	<i>2</i>
1.3.2	<i>Enkätundersökning</i>	<i>2</i>
1.3.3	<i>Studiebesök på FysikLek.....</i>	<i>3</i>
1.3.4	<i>Observation av laboration.....</i>	<i>3</i>
2	TEORI.....	4
2.1	PEDAGOGIK	4
2.2	TENSEGRITET	5
3	GENOMFÖRANDE	6
3.1	INVENTERING AV STUDION.....	6
3.2	ENKÄTUNDERSÖKNING	8
3.3	STUDIEBESÖK PÅ FYSIKLEK.....	8
3.4	IDÉGENERERING	9
3.5	OBSERVATION AV LABORATION.....	10
3.6	TILLVERKNING OCH UPPDATERING AV EXPERIMENT	10
3.6.1	<i>Tensegritetspall</i>	<i>11</i>
3.6.2	<i>Flygande bil.....</i>	<i>13</i>
3.6.3	<i>Kulbana</i>	<i>14</i>
3.6.4	<i>Masströghetsmoment.....</i>	<i>16</i>
3.6.5	<i>Tyngdpunktsplatta</i>	<i>16</i>
3.6.6	<i>Lyfta sig själv.....</i>	<i>16</i>
4	RESULTAT	17
4.1	ENKÄTUNDERSÖKNING	17
4.2	NYA OCH UPPDATERADE EXPERIMENT	18
4.2.1	<i>Tensegritetspall</i>	<i>18</i>
4.2.2	<i>Flygande bil.....</i>	<i>20</i>
4.2.3	<i>Kulbana</i>	<i>22</i>
4.2.4	<i>Masströghetsmoment.....</i>	<i>25</i>
4.2.5	<i>Tyngdpunktsplatta</i>	<i>27</i>
4.2.6	<i>Lyfta sig själv.....</i>	<i>27</i>
4.2.7	<i>Övriga uppdateringar.....</i>	<i>28</i>
5	DISKUSSION OCH SLUTSATS	29
5.1	PLANERING	29
5.2	FÖRARBETE	29
5.3	NYA OCH UPPDATERADE EXPERIMENT	30
5.3.1	<i>Tensegritetspall</i>	<i>30</i>
5.3.2	<i>Flygande bil.....</i>	<i>31</i>
5.3.3	<i>Kulbana</i>	<i>31</i>
5.3.4	<i>Masströghetsmoment.....</i>	<i>31</i>
5.3.5	<i>Lyfta sig själv.....</i>	<i>32</i>
	KÄLLFÖRTECKNING.....	33
	BILAGOR A-H.....	I

1 Inledning

Varje år antas ett stort antal nya studenter till Chalmers. Under sina första år läser dessa studenter flera grundkurser inom olika ingenjörskorrelaterade ämnen, bland annat mekanik och hållfasthetslära. Dessa kurser ger studenterna en grundläggande kunskap och förståelse som sedan utvecklas och appliceras i framtida kurser eller arbeten. Det är därför av stor vikt att denna grundläggande kunskap förmedlas på ett sätt som ger studenterna goda möjligheter att lära sig och förstå informationen korrekt. Ett sätt att skapa variation i undervisningen är genom att inkludera laborationer och demonstrationer där studenterna själva har möjlighet att resonera och testa sig fram. Detta kandidatarbete bidrar till inläringen genom utvecklandet av nya experiment som behandlar fundamentala koncept och teorier inom just mekanik och hållfasthetslära.

Kandidatarbetet *Studio i mekanik och hållfasthetslära* har genomförts löpande sedan 2013 och detta arbete bygger därmed vidare på resultat från tidigare år. Det löpande arbetet har mynnat ut i en studio där laborationsmaterial finns samlat för att kunna hämtas och användas i de berörda kurserna. Detta material består dels av experiment med tillhörande frågor och beräkningsuppgifter vilka är tänkta att utföras av studenter, dels av demonstrationsmaterial. Detta material kan föreläsare ta med till en undervisningssal för att använda som hjälpmedel vid genomgång av specifika koncept eller teorier. Under årets arbete har nya experiment utvecklats för att skapa ännu större bredd på de områden som täcks in av materialet i studion. Vissa av de redan existerande experimenten har även uppdaterats med syfte att underlätta inläringen för studenter ytterligare. Detta kandidatarbete är viktigt för att dessa typer av moment ska kunna inkluderas och täcka delar av kursinnehållet. Att kunna bygga vidare på tidigare års resultat samt uppdatera visst material bidrar till att studion både utvecklas och förändras i samband med användargruppens behov. Därför är detta ett kandidatarbete som har varit av stor relevans under många år och kommer att fortsätta vara det även i framtiden.

1.1 Syfte

Syftet med kandidatarbetet är att vidareutveckla och förbättra studion samt tillverka nya experiment. Samtliga experiment bör kunna användas inom grundkurser i mekanik och hållfasthetslära på Chalmers. Målet med kandidatarbetet är att utveckla experiment som kan användas för att öka studenternas förståelse inom dessa områden.

1.2 Urval och avgränsningar

Projektet har flera avgränsningar att beakta. Främst är innehållet avgränsat till dynamik, statik och hållfasthetslära. Dessa avgränsningar sattes av projektets uppdragsgivare. Givet att det är ett kandidatarbete vid Chalmers är tidsramen för arbetet vårterminen 2022 med start i vecka 3.

Gruppen beslutade att inte ta fram några digitala experiment. Detta berodde främst på att samtliga restriktioner kopplade till COVID-19-pandemin hävdades under februari 2022, vilket ledde till att distans- och digital undervisning inte längre användes i lika stor utsträckning. Dessutom är detta en preferens hos gruppen då alla medlemmar hellre ville skapa fysiska experiment. Detta i kombination med ett lågt intresse för programmering inom gruppen resulterade i beslutet. För att nå så bra resultat som möjligt valdes alltså endast fysiska experiment.

Utöver område och typ av material avgränsades också projektet utifrån en budget på 10 000 kronor. Denna var tillräckligt och begränsade inte valen av material och komponenter. Projektgruppen hade dessutom tillgång till 3D-skrivare samt maskinhusets prototypplabb där användbara verktyg och bearbetningsmaskiner finns tillgängliga. Detta bidrog till att tillverkningen blev billigare då färdiga delar inte behövde köpas in utan i stället kunde tillverkas av inköpt råmaterial.

1.3 Metod

Nedan presenteras och motiveras de metoder som använts under olika delar av arbetet. Metoderna är framför allt kopplade till det inledande arbetet med studion. Under denna fas var målet att undersöka och utvärdera det redan existerande materialet för att skapa en uppfattning om den aktuella problembilden. I samband med detta var det även viktigt att vara medveten om användargruppens behov för att kunna använda denna kunskap vid beslutstagande om framtida moment. Även metoder för att ta reda på dessa behov presenteras nedan.

1.3.1 Inventering av studion

En inledande inventering av befintliga utrustningen i studion genomfördes. Dels för att få en uppfattning om den typ av experiment som utvecklats i tidigare arbeten, dels för att undersöka om det fanns behov av utrustning. Denna inventering genomfördes tillsammans med handledare och examinator för att kunna ta del av deras tankar gällande de existerande experimenten. Detta för att försäkra att eventuellt uppdateringsarbete genomfördes på de experiment där det ansågs relevant. Under inventeringen diskuterades också huruvida viss del av utrustningen kunde slängas då den inte längre används eller var defekt. Denna inventering gav en uppfattning gällande var fokus borde ligga i projektet samt vilka behov som fanns i den befintliga studion.

1.3.2 Enkätundersökning

Tidigare års arbeten har inte lagt stort fokus på att samla in data gällande användarnas behov och krav. I stället har beslut, i stor mån, baserats på gruppmedlemmars egna åsikter och upplevelser. För att ha en stabilare grund att utgå från i årets arbete beslutades att en enkätundersökning skulle genomföras hos användargruppen.

En elektronisk enkätundersökning är ett effektivt sätt att samla in information om exempelvis en användargrups åsikter och uppfattning om något specifikt. Därför var det just denna metod som utnyttjades vid den inledande kunskapsinsamlingen. Målet med undersökningen var att sammanställa ny kunskap gällande de berörda studenternas uppfattning om relevanta kursmoment. I enkäten användes flervälsfrågor med fördefinierade svarsalternativ. Den främsta anledningen till detta var att förenkla det kommande sammanställningsarbetet. Om respondenterna i stället hade givits möjligheten att formulera sina svar helt själva hade detta med största sannolikhet lett till en

mängd olika formuleringar av samma svar och därmed hade sammanställningen blivit betydligt mer tidskrävande. Fördefinierade alternativ ger en omedelbar översikt över svarens fördelning. Respondenterna gavs dock möjligheten att formulera ett eget svar i de fall de ansåg att något svarsalternativ saknades.

1.3.3 Studiebesök på FysikLek

Efter råd från handledare bokades ett studiebesök på FysikLek, vilket är ett samarbete mellan Chalmers och Göteborgs universitet. FysikLek erbjuder, på ett lekfullt sätt, låg- och mellanstadieklasse introduktioner till enklare fysiska och tekniska principer genom experiment och demonstrationer. Dessa principer handlar om jämvikt, tyngdpunkt och optik vilka är områden som kan påvisas med relativt enkla medel. Syftet med FysikLek är att, redan vid en tidig ålder, väcka ett intresse för fysik och teknik som förhoppningsvis lever kvar även när eleverna går i högstadiet och sedan gymnasiet. Målet med studiebesöket var att inspireras och se hur experiment kunde utformas för olika principer. Trots att kandidatarbetets målgrupp är betydligt äldre än målgruppen för FysikLek var förhoppningen att kunna finna inspiration och få idéer inför kommande arbete.

1.3.4 Observation av laboration

Observationer kan utnyttjas för att få en god uppfattning om en verklig situation som till exempel kan vara svår att beskriva i text. Under våren gavs möjligheten att observera och leda delar av en stationslaboration i kursen *Statik och hållfasthetslära MTM021* på maskinprogrammet. Syftet med observationen var att få en bättre förståelse för hur laborationer i de berörda kurserna kan genomföras samt vikten av tydliga instruktioner och välgjorda experiment. Då gruppmedlemmarna även fick chansen att själva leda studenterna vid de olika stationerna kunde även lärarens eller handledarens perspektiv vägas in i resultatet av observationen.

2 Teori

Nedan presenteras relevant teori gällande pedagogik och undervisning på högskolan. Även begreppet *tensegritet* förklaras då detta inte anses vara ett välkänt fenomen för arbetets målgrupp.

2.1 Pedagogik

För att kunna utforma nya experiment samt förbättra gamla är det viktigt att först skaffa sig en förståelse för hur inläring går till och hur den kan påverkas. Det finns många olika sätt att se på lärande och hur man bör formulera innebörden av begreppet. Några av dessa formuleringar är bland annat att lärande innebär att utöka sin kunskap, att kunna tillämpa ny kunskap och att se på något på ett annat sätt [1]. Gemensamt för dessa är att kunskap på något sätt ges till en mottagare, sedan bearbetas eller används denna kunskap på olika sätt och därmed har inläring skett. Enligt vissa handlar det om i hur stor utsträckning mottagaren, på ett korrekt sätt, kan återge eller applicera kunskapen i efterhand. För andra är det mer relevant hur den nya kunskapen har påverkat mottagaren och dennes sätt att betrakta omvärlden. Begreppet inläring kan därmed definieras på skilda sätt med varierande bredd och abstraktionsnivå. Inläring innebär självklart också olika saker beroende på vilken typ av kunskap det är som ska tas emot [2].

En annan aspekt kopplad till begreppet inläring är vilken nivå den sker på och hur denna nivå påverkar framtida användning av kunskapen. I boken Universitetspedagogik beskriver Elmgren och Henriksson [2] hur ytlig och djup inläring skiljer sig och hur de påverkar mottagarens kapacitet att använda sig av kunskapen. Ytinläring innebär att mottagaren endast koncentrerar sig på att läsa in materialet för att lära sig det utantill. Fokus ligger på detaljer och ett större sammanhang missas ofta. Denna typ av inläring innebär att mottagaren senare kan återberätta dessa detaljer men har svårigheter när det gäller att applicera eller använda kunskapen i andra sammanhang. Djupinläring lägger i stället en bättre grund för en långvarig inläring och djupare förståelse för kunskapens innebörd. I detta fall kan mottagaren både återge kunskapen och bedöma när och hur den är lämplig att använda. I kurser där matematik och beräkning appliceras är djupinläring att föredra då det ofta krävs av mottagaren att denne kan se och förstå samband och kopplingar mellan olika typer av problem. Ytinläring kan, i detta fall, innebära att mottagaren endast memorerar typiska lösningsgångar och hoppas på att dessa kan användas vid en examination. Dessa mottagare har då ingen möjlighet att besvara djupare frågor som kräver förståelse för grundkonceptet. Om mottagaren i stället riktar sig mot djupinläring kan mönster hittas och lösningar kan anslutas till varandra. I längden leder denna strategi till att mer komplicerade beräkningar kan utföras korrekt [3].

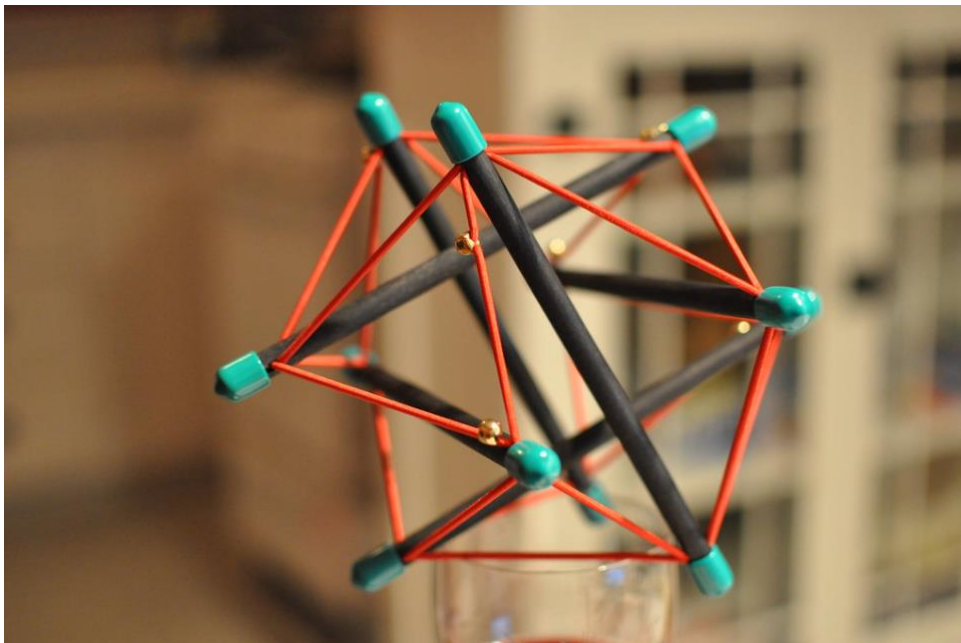
Det står nu klart att djupinläring bör eftersträvas inom grundkurser i både mekanik och hållfasthetslära för att studenterna ska ha goda möjligheter att använda sig av kunskapen även efter examination. Men hur ska undervisningen utformas för att ge studenterna denna möjlighet? Självklart finns det många olika undervisningsstrategier för att detta ska uppnås och en av dessa är att inkludera moment där studenterna har tillfälle att arbeta tillsammans för att diskutera med varandra för att lösa olika problem. Målet är att skapa aktivitet hos mottagaren där denne analyserar och bearbetar kunskapen [4]. Experiment och laborationer är exempel på denna typ av moment och inkludering av dessa bidrar till ökad aktivitet hos studenterna.

2.2 Tensegritet

Begreppet tensegritet är frekvent återkommande i arbetet då ett av de nya experimenten bygger på detta koncept. Tensegritet är en benämning på ett fenomen där ett system av objekt befinner sig i jämviktsläge med hjälp drag- och tryckkrafter. Det förklaras enligt Ansys [5] som

“... a system of isolated, compressed components within a network of chords that are under continuous tension. In a pure tensegrity structure, these components do not touch but experience compression nonetheless.”

Detta innebär att system av varierande struktur kan spännas upp med hjälp av vajrar eller linor för att bibehålla sin struktur trots att den belastas. Komponenterna stabiliseras av de linkrafter som drar i strukturen.



Figur 1, Tensegrity. Från [6] CC BY-NC 2.0

3 Genomförande

I följande kapitel redogörs för genomförandet av de valda metoderna från inledningskapitlet. Även de delresultat som uppkom i samband med metoderna och hur dessa resultat är relevanta för slutprodukterna presenteras. Inga beräkningar presenteras i detta kapitel, dessa hittas i stället under Resultat.

3.1 Inventering av studion

Inventeringen av studion resulterade i att ett flertal gamla experiment kunde slängas. Vissa av dessa var defekta och därmed oanvändbara i kursmomenten, andra hade helt enkelt inte använts på flera år och ansågs därför endast ta upp onödig plats i studion. Dessa beslut togs i samråd med handledare och examinator och de godkände att detta material kunde slängas. Utöver detta beslutades även att flera av de befintliga experimenten skulle uppdateras under arbetet. Vissa krävde endast mindre justeringar eller förbättringar medan andra experiment var i behov av betydligt mer arbete. Nedan presenteras de befintliga experiment som ansågs relevanta att lägga fokus på samt korta beskrivningar om det uppdateringsarbete som planerades.

- **Lyfta sig själv** - Experimentet består av en platta vilken är monterad på en konstruktion med fem trissor och en vajer som löper över dessa. Testpersonen ställer sig på plattan och drar i vajerns handtag, vilket består av en digital bagagevåg. Tack vare vajern och trissorna förflyttas då bottenplattan uppåt och därmed även testpersonen. Vågens display läses sedan av för att beräkna kraften som krävs för att lyfta sig själv. Efter att experimentet har genomförts kan testgruppen räkna på bland annat hur kraften fördelas med hjälp av trissorna och hur mycket arbete som utförts. Här fanns ett återkommande problem med att vajern som ska löpa över trissorna hoppade av dessa och därmed behövde träs på igen efter varje användning. Huvudsakligt fokus låg på att lösa detta problem.



Figur 2, Lyfta sig själv. Från [7]. Återgiven med tillstånd.

- **Masströghetsmoment** - Detta experiment består av en konstruktion där en stor skiva är monterad på en axel som i sin tur kan rotera med hjälp av två kullager. Till denna skiva kan sedan en cylindrisk massa adderas för att påverka masströghetsmomentet. Detta visualiseras sedan genom att ett snöre med en pålagd massa fästs i ena änden lindas kring den stora skivan. När skivan sedan roterar kan olika vinkelhastigheter noteras beroende på masströghetsmomentet och vilken pålagd massa som används.

Det huvudsakliga problemet med experimentet var att den stora roterande skivan hade för stor massa och därmed inte fungerade som tänkt. De tillhörande beräkningarna var inte heller korrekta och därför behövde dessa göras om för att kunna påvisa rätt fenomen.



Figur 3, Masströghetsmoment. Från [8]. Återgiven med tillstånd.

- **Tyngdpunktsplatta** - Plattan har formen av en halvcirkel sammansatt med en triangel och kan användas för att visa var tyngdpunkten är placerad rent geometriskt. Studenter kan även först beräkna var tyngdpunkten borde vara placerad och sedan kan modellen användas för att kontrollera dessa beräkningar. Placeringen hittas enklast genom att modellen hängs upp i respektive hörn tillsammans med ett lod. En markering görs utmed lodet och sedan upprepas processen för samtliga hörn. Tyngdpunkten hittas sedan där markeringarna korsar varandra.

Plattan hade hål och markeringar med felaktig placering och behövde därför spacklas och målas. Efter detta skulle tyngdpunktens korrekta position kunna markeras.

- **Flygande bil** - En anordning är fäst med fjädrar för att kunna dras tillbaka och därmed generera en potentiell energi i fjädrarna. En bil placeras vid fjädrarnas bakre ände. Den potentiella energin omvandlas sedan till kinetisk energi när anordningen släpps och den rör sig framåt mot kanten av bottenplattan, liknande en slangbolla. När skjutnanordningen når slutet på glidstängerna avbryts rörelsen av fästen som håller stängerna på plats och bilen fortsätter sin rörelse framåt tack vare den kinetiska energi som genererats av fjädrarna. När bilen når framkanten av plattan skjuts den ut från en höjd (oftast hade hela anordningen monterats vid kanten av ett bord i studion) och flyger sedan enligt en kastparabel tills den slår i marken.

Den modell som fanns var förhållandevis liten (20 x 20 cm) och i och med detta ansåg gruppen att möjligheter att utnyttja riggen för ett flertal olika aspekter inom mekanikkurserna missades. Genom att bygga om hela riggen kunde således flera olika mekaniska egenskaper mätas och beräknas av studenter.

Utöver dessa förändringar och uppdateringar beslutades att en del ny materiel skulle köpas in då det ansågs vara önskvärt enligt examinator och handledare. Denna materiel var bland annat nya personvågar, förbandslåda och måttband vilka alla skulle kunna användas i studion.

3.2 Enkätundersökning

Enkätundersökningen skickades till studenter vid Maskin-, Teknisk design-, Automation och mekatronik-, samt Samhällsbyggnadsprogrammet då dessa, i huvudsak, utgör användargruppen för experimenten och labbarna i de berörda kurserna. Dessutom bestod kandidatgruppen av studenter från dessa program vilket underlättade enkätens spridning. Endast studenter som tidigare läst en grundkurs i mekanik eller hållfasthetslära ansågs relevanta då dessa förhoppningsvis har en uppfattning om hur de själva upplevde olika moment och huruvida experiment hade kunnat underlätta inläringen. Eftersom enkäten delades i respektive sektionsgrupp på Facebook hade även studenter som ännu inte läst någon av kurserna möjlighet att svara på enkäten och därmed finns även en risk för ett något missvisande resultat. Enkäten bestod av totalt fyra flervalsfrågor och en fråga med öppet svar. För respektive kurs fick respondenterna besvara en fråga gällande vilka moment de själva uppfattat som extra utmanande samt en fråga gällande vilka moment de ansåg hade kunnat underlättats med hjälp av ett experiment. För samtliga frågor och svar se Bilaga A.

3.3 Studiebesök på FysikLek

Under studiebesöket hos FysikLek introducerades gruppen till projektets arbetsgång och hur de jobbar för att väcka intresse för fysik och teknik hos yngre elever. Efter en kort introduktion studerades de olika experimenten närmare och de som ansågs intressanta och relevanta dokumenterades genom bilder. Det experiment som väckte störst intresse var en kulbana på en magnetisk vägg där en bana kunde sättas upp på olika sätt. Uppgiften var sedan att hitta den bana som resulterade i att en kula färdades från ett övre hörn på väggen till det nedre diagonala hörnet på kortast tid.

Utöver detta experiment dokumenterades även en konstruktion som gav användaren möjlighet att fördela massor längs olika axlar och på så sätt hitta den kombination som gav jämvikt. Det fanns också en anordning som utnyttjade rep och trissor, alltså samma principer som det befintliga experimentet "Lyfta sig själv". Här hämtades framför allt inspiration gällande hur den osmidiga vajern i experimentet skulle kunna förändras eller bytas ut för att skapa en mer kontrollerad och korrekt konstruktion.

Sammanfattningsvis var detta studiebesök ett mycket värdefullt moment tidigt i arbetet som lade en bra grund för den kommande idégenereringsfasen.

3.4 Idégenerering

Utifrån resultatet av inventering och enkätundersökning påbörjades idégenereringsfasen där idéer och förslag på helt nya experiment och förbättringar togs fram. Här användes ingen specifik idégenereringsmetod utan i stället listades en rad idéer upp utifrån gruppmedlemmarnas egna önskemål. Denna lista jämfördes sedan med resultatet från enkätundersökningen med syftet att rangordna dem utifrån relevans och användarbehov. Även idéer gällande uppdatering av befintliga experiment togs fram. Här prioriterades de experiment som handledare och examinator tidigare pekat ut som relevanta för uppdatering. Dessa gick igenom ytterligare en gång för att diskutera närmare vilka förbättringar som kunde genomföras och hur detta skulle ske. Idégenereringen resulterade i totalt åtta punkter, dessa presenteras nedan:

- **Tensegritetspall** - Denna typ av konstruktion går att utforma på många olika sätt och skapar en illusion av att en del av systemets komponenter svävar i luften. Experimentet skulle ge studenter möjlighet att beräkna linkrafter och samtidigt, förhoppningsvis, uppfattas som ett intressant fenomen.
- **Balanserande figur (jämvikt/tyngdpunkt)** - Även denna typ av experiment skulle gå att utforma på en mängd olika sätt med varierande komplexitet. Tanken var att med relativt enkla medel kunna påvisa hur tyngdpunkt och masscentrum för en volym kan ändra position och hur det påverkar exempelvis dess balans. Efter utvärdering av enkätsvaren ströks detta förslag.
- **Skalbaggen** - Detta förslag togs fram för att visualisera hur komponenter tillsammans bildar en resulterande kraft. Detta genom att ha en form av "skalbagge" som kan köras på marken. Styret på denna kan vändas åt antingen höger eller vänster och när den förs alternerande åt de två hållen så förs den framåt. Efter närmare åtanke ansågs detta experiment vara för enkelt för högskolestudenter, och valdes därför bort.
- **Looping/Kulbana** – Tanken var att skapa en kulbana som kunde kombineras på olika sätt beroende på vad som skulle visas eller beräknas. Här sågs stor potential att kunna skapa ett flertal spännande och utmanande geometrier till banans delar.
- **Masströghetsmoment (förbättring)** – Experimentet var bristfälligt utformat och därför ansågs det vara en god idé att förändra detta för att möjliggöra korrekt användning.

Uppfattningen i gruppen var att önskemålet om detta var stort från både handledare och examinator.

- **Huvudspänningar** - Experimentet skulle på ett pedagogiskt och intuitivt sätt visualisera hur huvudspänningar fungerar. I idégenereringen ansågs detta experiment vara väldigt relevant eftersom fenomenet var något som studenterna upplevde var svårförståeligt. Senare bortprioriterades detta dock på grund av att det ansågs vara för komplicerat och därmed inte kunna genomföras inom tidsramen för arbetet.
- **Flygande bil (förbättring)** - Detta experiment har använts flitigt inom grundkursen i mekanik för att visualisera energiprincipen och kastparabler ut från ett bord. Gruppen ansåg däremot att det fanns ett intresse att variera denna ytterligare genom att ändra kastvinkeln samt variera vikten på bilen. Därför valdes det att lägga fokus på att uppgradera denna så att den kan användas vid flera tillfällen under kursen i stället för att bara användas för det specifika tillfälle då kastparabel utan elevationsvinkel går igenom.
- **Tyngdpunktsplatta (förbättring)** - Efter konsultation med handledare blev det uppenbart att detta experiment var i behov av en uppfräschning. Färgen hade lossnat på flera ställen och det fanns felaktiga markeringar för tyngdpunkten. Därför valdes det även att uppdatera denna.

3.5 Observation av laboration

Observationerna gav en insikt om att studenter uppenbart uppskattar att utföra fysiska laborationer och tillsammans resonera sig fram till en lösning av ett angivet problem. I de fall då resonemanget inte blev helt korrekt fanns en handledare, i detta fall kandidatgruppen, som kunde leda dem på rätt väg för att förstå fenomenet och teorin bakom. Det noterades att reflektions- och resonemangsfrågor var bra för att öka engagemanget under laborationen och skapa en diskussion mellan studenter. Engagemanget ökade även när studenterna själva fick interagera med experimenten och materialet, i stället för att endast se på när en handledare förklarade.

Något annat som upptäcktes var att de manualer som utformats under tidigare år hade både frågor och, till viss del, lösningar på samma sida. Detta gav studenterna möjlighet att läsa svaret på frågorna redan innan de själva hade funderat och testat experimentet själva. Denna insikt var viktig för utformandet av manualer till de nya experiment som skapats under arbetet.

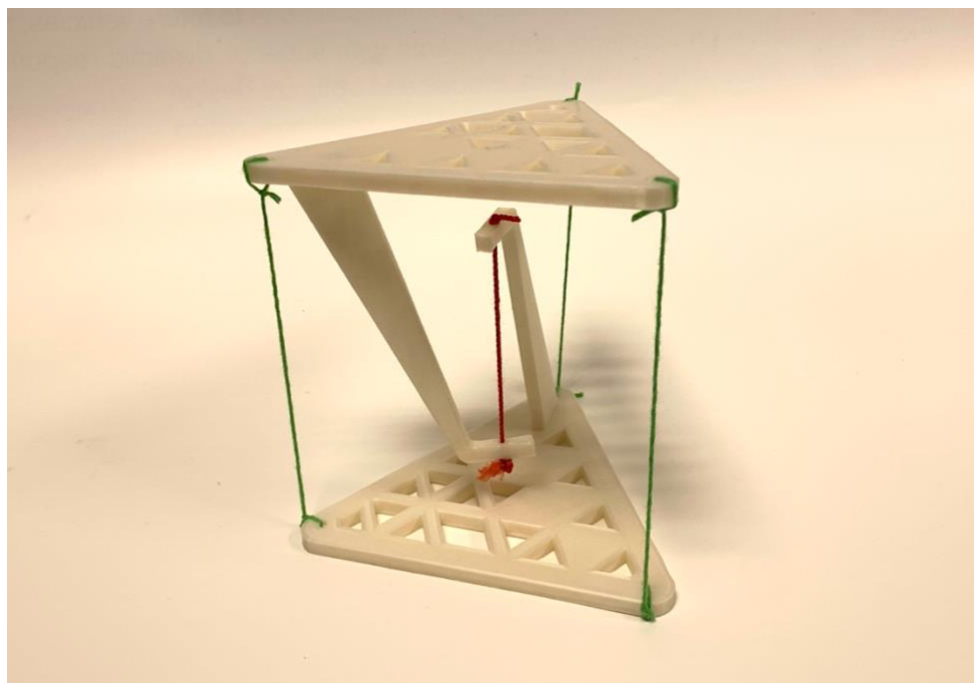
3.6 Tillverkning och uppdatering av experiment

Arbetet med att tillverka och uppdatera experiment delades upp mellan medlemmarna i gruppen. På detta sätt kunde större fokus läggas på specifika experiment och om problem skulle uppstå konsulterades övriga personer för att kunna lösa dessa.

3.6.1 Tensegritetspall

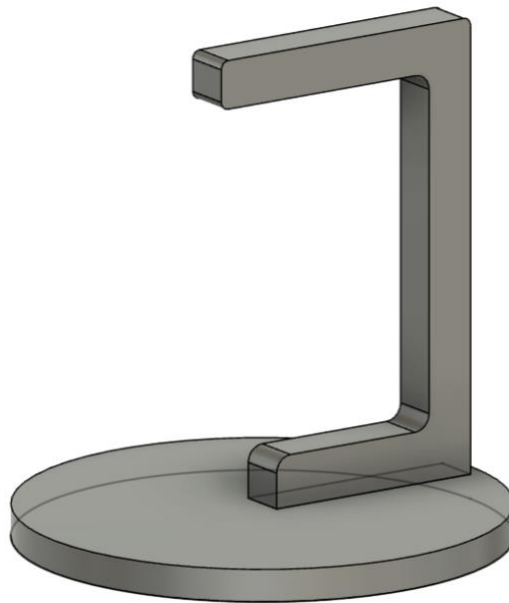
En av de idéer som tidigt formades i idégenereringsfasen var att utnyttja fenomenet tensegritet i ett experiment. Idén grundades i att en av gruppmedlemmarna tidigare hade sett så kallade “tensegrity table” och var fascinerad över dess konstruktion. För att på ett naturligt sätt kunna koppla detta experiment till de aktuella grundkursernas innehåll valdes linkrafter och sträckning/töjning som huvudfokus. Tanken var att pallen skulle kunna belastas med en viss massa innan den bärande linan deformeras. Studenterna skulle då kunna testa olika kombinationer av linor och laster för att bilda en förståelse över hur de två parametrarna hör ihop. Samt få en bättre uppfattning gällande hur strukturen håller ihop sig själv genom att belasta med vikt på olika delar av toppytan.

Då denna typ av pall inte är något helt nytt utan ett känt sätt att utnyttja konceptet tensegritet beslutades att med hjälp av 3D-utskrift ta fram en första prototyp av experimentet. Denna prototyp skulle framför allt ge gruppen något konkret att testa konstruktionen med i stället för att endast göra detta teoretiskt. För att spara tid beslutades att använda en färdig CAD-modell från *Thingiverse.com*, vilken är en hemsida där ett stort antal filer finns tillgängliga för att kunna skrivas ut. Denna modell, se Figur 4, monterades ihop med hjälp av ett tunnare snöre som hittades i studion. Med hjälp av prototypen upptäcktes ett antal saker som var viktiga att tänka på inför arbetet med den verkliga produkten. Dels var det viktigt att de balanserande trådarna skulle vara konstant spända lika hårt för att strukturen ska hålla i sitt horisontella läge. Något annat som upptäcktes var att den spända tråden i mitten skulle vara lätt att byta ut. Efter konsultation med handledare blev det tydligt att det enklaste alternativet skulle vara att använda öglor och krokar för att dessa skulle kunna bytas på ett så smidigt sätt som möjligt.



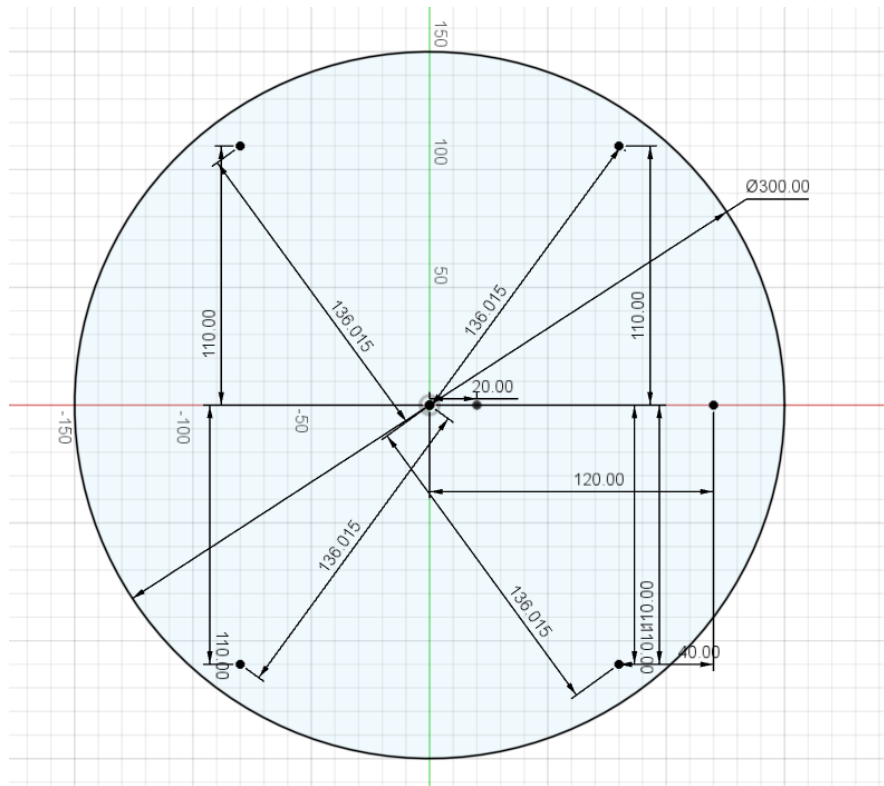
Figur 4, Prototyp av tensegritetspall

Med hjälp av denna information kunde den slutgiltiga produkten börja utformas. Genom att först konstruera en modell för de två identiska delarna i CAD-programmet Fusion 360 [9] kunde det visualiseras hur de olika delarna skulle se ut samt med enkelhet se hur många linor som skulle behövas för den modellerade pallen. Den del som skapades med hjälp av Fusion 360 kan ses i Figur 5.



Figur 5, Modell av komponent till tensegritetspall

I samband med att konstruktionen utvecklades fördes dialog med de anställda i prototypplabbet för att få hjälp med hållfasthet av strukturen samt rådgivning och stöd gällande materialval och tillverkningsteknik. Efter denna konsultation blev det uppenbart att ett lämpligt alternativ, ur hållfasthetsperspektiv, var att tillverka stagen genom att vattenskära geometrin i aluminium. Detta dels för att de ska behålla sin struktur efter flertal användningar, dels för att enkelt kunna göra gängade hål där plattorna på ovan- och undersidan skulle fästas. Däremot fanns det ingen direkt materialpreferens relaterat till botten- och topplatta, därför tillverkades dessa i trä, främst av praktiska skäl. Krokarna var enklare att fästa i dessa än i metall då fästelementen hade behövt tillverkas från grunden. Därför sågades två träcirklar ut ur 14 millimeter tjock plywood för att fogas samman med stagen. Efter detta borrades hål för de fyra balanslinorna, testlinan i mitten samt infästning i stag. Dessa hål gjordes enligt ritningen i Figur 6. Hålen för stödlinorna är symmetriskt placerade längs med cirkelns rand och hålen för sammanfogning utgår från mitten och fästes med stagen.



När samtliga delar var färdiga monterades de samman. För att hålla balanslinorna i korrekt läge under hela användningen bestämdes det, efter dialog med handledare, att använda vantskruv för att kunna spänna linorna till önskad styvhet. Därefter var hela konstruktionen redo att sättas ihop för att bilda den slutgiltiga produkten.

Avslutningsvis sammanställdes en manual för experimentet. Denna uppmanar studenter att undersöka och beräkna egenskaper hos den bärande linan i mitten.

3.6.2 Flygande bil

De brister som identifierades vid genomförande av experimentet presenteras i listan nedan:

- Bottenplattan var för kort och kunde därmed inte generera tillräckligt mycket energi i fjädrarna för att skjuta bilen längre distanser.
- Bottenplattan var fixerad i samma vinkel som underlaget den stod på, vilket innebar att det endast gick att skjuta bilen rakt ut från exempelvis det bord som den placerats på.
- Fjädrarna som genererar energin som skall driva bilen framåt var svåra att fästa i fästanordningen och deformerades lätt. Detta resulterade i successivt kortare kastbanor och medförde ett större behov av underhåll då dessa behövde bytas ut ofta.

- Bilen var av enkel karaktär och dess massa kunde inte varieras.

Den första förändringen som genomfördes var att förändra bottenplattan. Det var önskvärt att öka dess storlek för att möjliggöra större potentiell energi. Genom att öka den fysiska storleken kan avfyrningsmekanismen dras tillbaka mer än dubbelt så långt, jämfört med tidigare, vilket innebär att bilen kan skjutas i väg längre distanser. Ett önskemål var också att möjliggöra variation av elevationsvinkeln för bilen. Detta var främst för att öka komplexiteten i beräkningarna, men även för att exempelvis jämföra olika elevationsvinklar och därefter kunna resonera kring hur dessa påverkar bilens flygbana. Denna variation av vinklar skapades med hjälp av kilar som kan monteras under bottenplattan. Tillverkning skedde i prototypplabbet på Chalmers där bottenplattan sågades ur en MDF-skiva. Kilarna sågades ut från en bit furu. Även dessa tillverkades med hjälp från personalen i prototypplabbet. Genom att borra hål i bottenplattan och förse kilarna med träpluggar med samma dimensioner kan de två delarna enkelt monteras i varandra. Skjutanordningen byggdes av Mekano vilket fanns tillgängligt i studion. Mekano är flexibelt och lämpligt för att konstruera en anordning som möter just de krav på stabilitet och måttanpassning som krävdes under byggprocessen. Slutligen kunde gummiband monteras genom att knytas fast i fästena längst fram på plattan och även i den del som skjuter bilen framåt.

Den inledande planen var att fortsätta använda sig av fjädrar för att kunna skjuta i väg bilen. Efter sondering av utbudet av fjädrar drogs slutsatsen att ett lämpligare alternativ skulle vara att använda gummiband. Detta berodde främst på att gummiband inte riskerar plastisk deformation i samma utsträckning som metallfjädrar. Trots att gummiband torkar ut med tiden och blir sprödare är de enkla att byta ut och anses därmed vara ett bra alternativ. Då gummibanden inte sträcks ut till hela sin maximala längd kan de antas vara linjärt elastiska och kan ses som fjädrar rent beräkningsmässigt.

Även bilen skulle modifieras och fokus låg på att kunna variera dess massa och därmed påverka kastparabeln. Inledningsvis undersöktes om någon typ av leksaksbil kunde köpas in för att användas i experimentet. Detta för att leksaker ofta är tillverkade i tåligt material för att klara av slag. Önskvärt var att bilen skulle ha någon form av flak eller liknande för att möjliggöra att externa massor kunde appliceras. Det visade sig vara svårt att hitta en bil i lämplig storlek som uppfyllde samtliga önskemål och därmed beslutades att en egen bil skulle konstrueras. Denna skapades genom att 3D-skriva ut en modell i materialet tough PLA vilket är mycket tåligt. Förhoppningen var därmed att även denna skulle vara stöt- och slagttålig.

Avslutningsvis utformades en tillhörande manual till experimentet med syfte att kunna användas under laborationer i undervisningen.

3.6.3 Kulbana

Idén om en kulbana kom tidigt i idégenereringsprocessen och efter samtal med examinator och handledare framkom att detta hade funnits tidigare och då var väldigt uppskattat. Önskemål från handledare och examinator var att banan skulle vara portabel och modulär för att kunna tas med till undervisningssalar och för att kunna variera dess utformning. Målet med kulbanan var att kunna räkna på rörelsemängd i form av stötar och impulser men även hastighet, centripetalkraft och eventuellt kastparabel.

I planeringsstadiet var tanken att kulbanan skulle konstrueras med hjälp av 3D-utskrivna fästen i polylaktid samt två metallstavar som kunde löpa mellan dessa fästen. För att testa denna typ av konstruktion användes svetstråd med en diameter på två millimeter tillsammans med en första prototyp av ett fäste. Denna anordning kunde sedan sättas upp på godtycklig magnetisk yta då neodymmagneter monterades i fästet. Denna konstruktion skapades i flera iterationer där måtten för bland annat magnetens nedsänkning i fästet och trådarnas avstånd korrigerades. Tre av dessa iterationer kan ses i Figur 7. Efter flera försök med olika kombinationer av mått och utformningar drogs slutsatsen att detta inte var en fungerande lösning. Detta berodde främst på att gruppen inte hittade ett lim som fäste på både den 3D-utskrivna plasten och svetstrådarna.



Figur 7, Prototyper av fästen till kulbanan

Arbetet gick vidare med en ny plan vilken innebar att även trådarna skulle vara 3D-utskrivna i samma material som fästena. Denna variant skulle kunna limmas ihop utan problem då båda ytorna var av samma material. Efter test med denna typ av konstruktion upptäcktes att övergången från en modul till en annan var mycket svår att passa in. För att undvika glapp eller kanter som skulle påverka kulans rörelse krävdes att limningen var identisk för samtliga fästen. Eftersom detta endast kunde limmas för hand blev passningen för dålig, därmed lades även denna plan ner.

För att lösa de problem som uppstått konsulterades personalen i prototyplabbet. Ett förslag om att svetsa ihop samtliga delar av banan diskuterades men valdes bort då detta minskade möjligheten att göra kulbanan modulär.

Ett sista förslag, som visade sig vara lyckosamt, utvecklades utifrån den tidigare idén om att samtliga delar skulle vara 3D-utskrivna. I detta fall separerades inte fästen och tråd utan i stället undersöktes möjligheten till en sammansatt kropp. Trådarna byttes ut mot en ränna för att minska antalet komponenter per modul. Precis som i de inledande försöken användes neodymmagneter i rännans ändar för att kunna fästa banan på en magnetisk tavla samt koppla samman moduler. Samtliga komponenter i alla iterationer skapades i CAD-programmet Autodesk Fusion 360. När en fungerande kulbana hade skapats kunde även manualen till experimentet sammanställas.

3.6.4 Masströghetsmoment

Inledande fokus för masströghetsexperimentet var att förändra den stora roterande skivan. Skivans massa behövde minskas för att ge tydligare utslag av skillnaden mellan de olika massorna på det roterande systemet. För att lyckas med detta bestämdes att den massiva träskivan skulle fräsas ur för att skapa ett hjul med tunna ekrar och på så sätt avlägsna en stor del av massan. Innan denna plan realiserades konsulterades personal i prototypplabbet för att bekräfta att det var ett lämpligt tillvägagångssätt. Under denna rådföring bestämdes att den gamla träskivan skulle kasseras och i stället skulle ett helt nytt hjul tillverkas i aluminium. En tunnare aluminiumskiva valdes ut och en modell av hjulet med lämpliga dimensioner och mått skapades i CAD-programmet Catia V5 [10], se Bilaga B. Denna modell användes sedan för att vattenskära ut det nya hjulet i prototypplabbet.

Under arbetet med det nya hjulet upptäcktes att de rullager som satt monterade på ställningen rullade med hög friktion vilket medförde oönskad påverkan på experimentets resultat. Först testades om smörjning av lagren kunde lösa problemet men då detta inte hjälpte beslutades att helt nya behövdes. De stängda rullagren byttes ut mot öppna kullager då detta minskade friktionen betydligt. Efter konsultation med handledaren togs den lättare massan på 500 gram bort från experimentet. Detta då den dels var bristfälligt utformad, dels inte tillförde tillräcklig skillnad till experimentet. Skillnaden på masströgheten när experimentet utförs med den tillförda massan på två kilogram och utan massa, det vill säga endast axeln och hjulet, är tillräcklig för att kunna demonstrera fenomenet. Avslutningsvis markerades en av ekrarna i hjulet för att studenterna enklare ska kunna mäta vinkelhastigheten på hjulet.

Det beslutades att en ny manual skulle skapas till detta experiment då omfattande förändringar hade genomförts. Denna manual skulle presentera de nya och korrekta beräkningarna.

3.6.5 Tyngdpunktsplatta

Tyngdpunktsplattans felplacerade hål i mitten spacklades igen för att skapa en slät yta som sedan målades med svart tavelfärg. Efter konsultation med handledare beslutades att nya genomgående hål inte skulle borraras. I stället skapades endast en nedsänkning i ytan på den plats där plattans tyngdpunkt finns.

3.6.6 Lyfta sig själv

För att lösa problemet med vajern som hoppade av trissorna byttes denna ut mot en lina som kunde fästas för att ständigt vara i ett spänt läge. I repets ände placerades ett nytt handtag, i form av en bagagevåg, för att kunna beräkna lyftkraften. Utöver detta byttes den övre träplattan ut mot en ny.

4 Resultat

Här presenteras de slutgiltiga resultaten av både nya och uppdaterade experiment. Till respektive experiment presenteras även de beräkningar som gjorts för att kontrollera att experimenten och dess materiel ger tänkta utslag.

4.1 Enkätundersökning

Enkäten och dess svar hade stor betydelse för utformningen av nya experiment. Sammanställning och utvärdering gjordes dels för samtliga svar, dels utefter programtillhörighet. Detta för att få en uppfattning gällande om det fanns tydliga skillnader i svar mellan programmen och därmed något som borde beaktas för att gynna undervisningen i olika kurser.

Från svaren på den första frågan gällande mekanik framgick det tydligt att fyra ämnesområden uppfattades som särskilt svåra, oberoende av program. Dessa var:

- Påtvingade och fria svängningar (63,5 % respektive 39,6 %)
- Masströghetsmoment (51 %)
- Partikelsystem (45,8 %)
- Cirkel- och kaströrelse (35,4 %)

Samma mönster återfanns i svaren angående vilka områden inläringen skulle underlättas av experiment. De fyra områden som upplevdes vara särskilt utmanande var också de där experiment önskades. Utöver det noterades att det fanns önskemål om fler experiment inom samtliga ämnesområden i mekanik, även om dessa inte uppfattades som svåra. Inläring med hjälp av experiment efterfrågades alltså generellt för att förtydliga alla sammanhang.

Svaren på frågan om vilka ämnesområden inom hållfasthetslära som upplevs vara svåra resulterade i att fem ämnesområden urskilde sig:

- Skjuvning (41,7 %)
- Vridning (30,2 %)
- Effektivspänningar (29,2 %)
- Huvudspänningar/huvudtöjningar (28,1 %)
- Yttröghetsmoment (27,1 %)

Även här återfanns samma resultat gällande för vilka områden inläringen skulle kunna underlättas av experiment. Den generella uppfattningen om att experiment önskades inom alla ämnesområden, oavsett om de upplevdes vara svåra eller inte, fanns likt mekaniken även för hållfasthetsläran. Dock påträffades mindre skillnader mellan programmen. Studerande på Teknisk design önskade fler experiment medan studenter på Maskinteknik inte var lika intresserade av experiment i hållfasthetslära som i mekanik. Studenter på Samhällsbyggnadsteknik samt Automation och mekatronik önskade experiment inom de ämnesområden de uppfattade som svåra. För samtliga svar och statistik se Bilaga A.

4.2 Nya och uppdaterade experiment

Tre nya experiment utvecklades under arbetet och i detta avsnitt presenteras tillverkning och slutgiltigt resultat för var och ett av dessa. Även resultat och beräkningar för de uppdaterade experimenten presenteras.

4.2.1 Tensegritetsspall

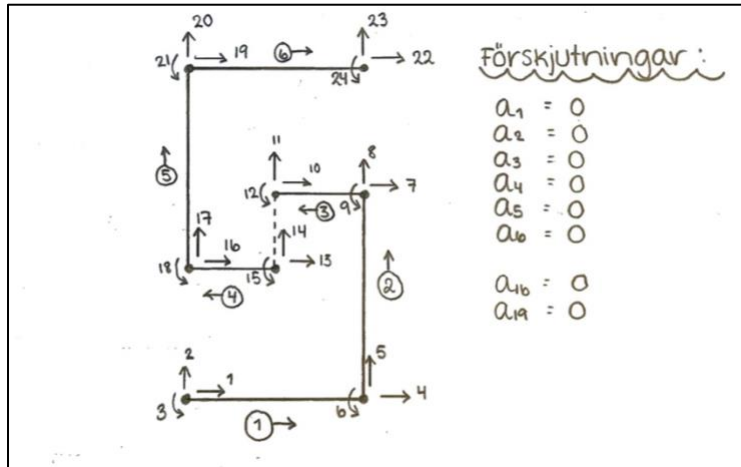
Den slutgiltiga tensegritetsspallen visas i Figur 8. Denna fungerar som planerat och visar den tensegritetsstruktur som tidigare förklarats. Den kan belastas med varierande massa så att förlängning av den utbytbara mittenlinan kan mätas. Detta innebär att pallens utöver att påvisa tensegritetsstrukturen även kan vara ett typ av dragprovstest där olika linors E-moduler kan undersökas. Med hjälp av vantskruvarna kan de yttre balanslinorna spännas för att stabilisera konstruktionen eller lossas för att kunna byta mittenlinan.



Figur 8, Färdig tensegritetsspall

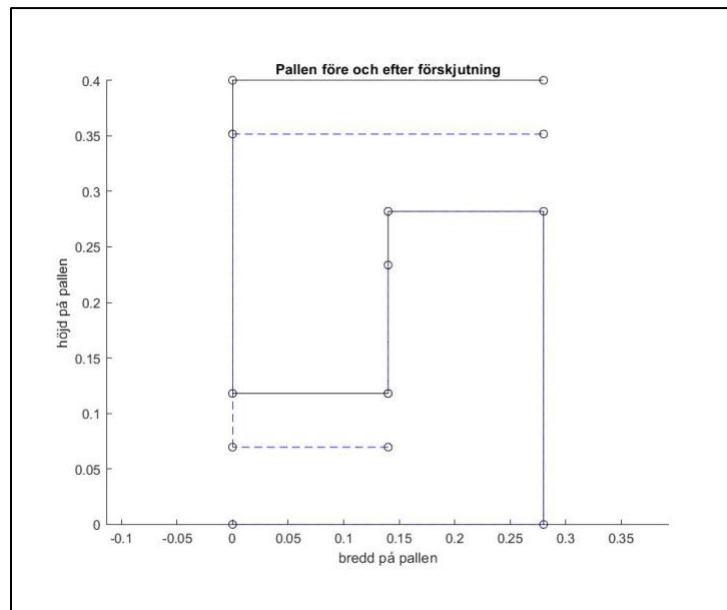
När beräkningar skulle genomföras på pallens var det viktigt att ta hänsyn till flera aspekter. Dels hållfastheten och den deformation som uppstår när pallens belastas, dels de materialegenskaper som delarna besitter samt de tryck- och dragkrafter som uppstår i strukturen. På grund av dessa faktorer gjordes en strukturmekanisk modell av pallens tvärsnitt som sedan modellerades med hjälp av MATLAB [11] och CALFEM [12]. CALFEM är ett add-on till MATLAB och kan användas vid beräkning av förskjutningar och krafter i olika delar av en struktur. Ett problem som uppstod vid beräkningen var att CALFEM inte har funktioner för beräkningar av linkrafter. De stabiliserande linorna i pallens yttre hade enligt den första iterationen tryckkrafter, något som är fysikaliskt omöjligt. Efter konsultation med examinator åtgärdades problemet genom att ta bort linorna på sidorna och i stället låsa den övre delen av pallens i x-led för att förhindra att en mekanism uppstod.

Detta kan göras i en förenklad beräkning av pallen eftersom linorna på sidorna endast stabiliserar pallen mot vridning och förhindrar att den tippas. De pålagda lasterna och egentyngden bärs endast av linan i mitten. Beräkningsmodellen för pallen återfinns i Figur 9 nedan där frihetsgraderna och de olika komponenterna visas.



Figur 9, Beräkningsmodell för tensegritetspall

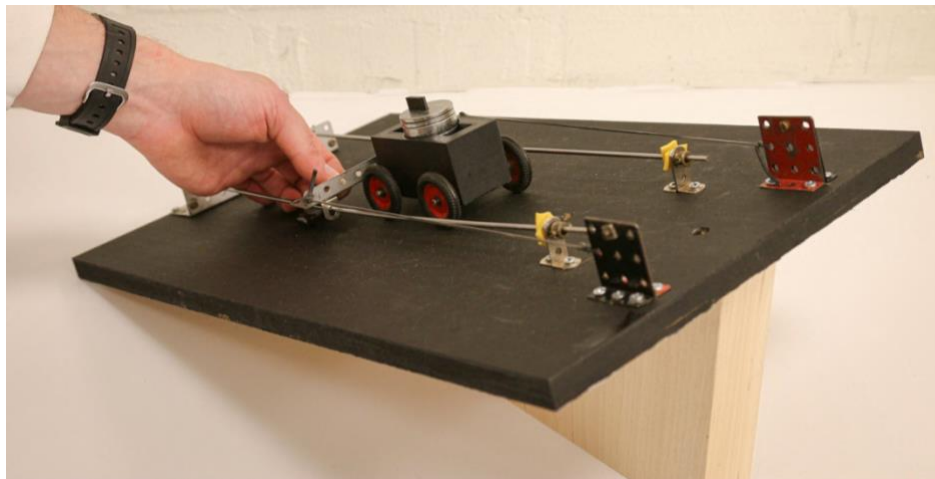
Efter att strukturmodellen anpassats kunde materialegenskaperna för mittenlinan enkelt ändras och de olika förlängningarna av linan beräknas. Det genereras även en bild som visar förskjutningen av systemet, denna kan ses i Figur 10 och skapades med skriptet i Bilaga C. Den manual som utformades för användningen i studion hittas i Bilaga D.



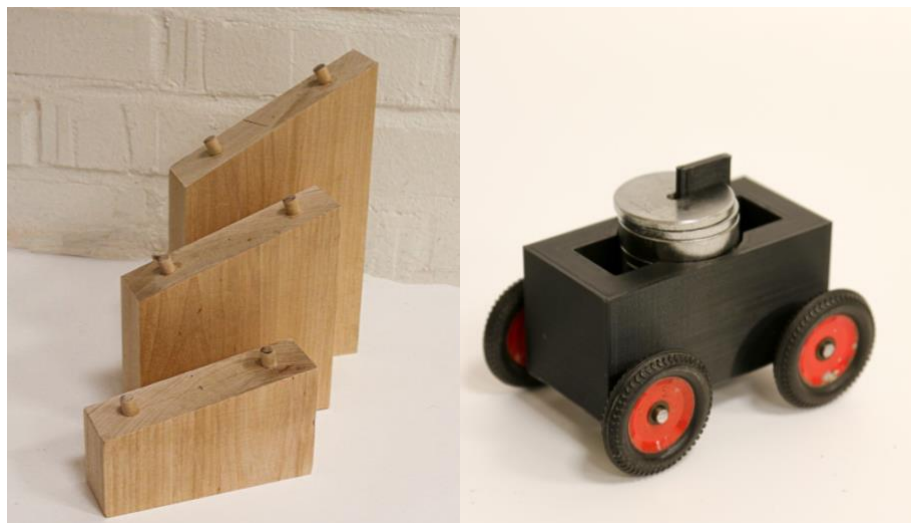
Figur 10, Digital visualisering av pallens förskjutning

4.2.2 Flygande bil

Detta experiment anses vara ett helt nytt experiment snarare än en uppdatering då de förändringar som genomförts är mycket omfattande. Efter att ha implementerat förändringarna och monterat ihop hela experimentet uppnåddes de förbättringar som eftersträvades. Hela anordningen har en betydligt högre grad av modularitet, jämfört med tidigare, i och med att det går att variera såväl massa på bilen som elevationsvinkel för bottenplattan.



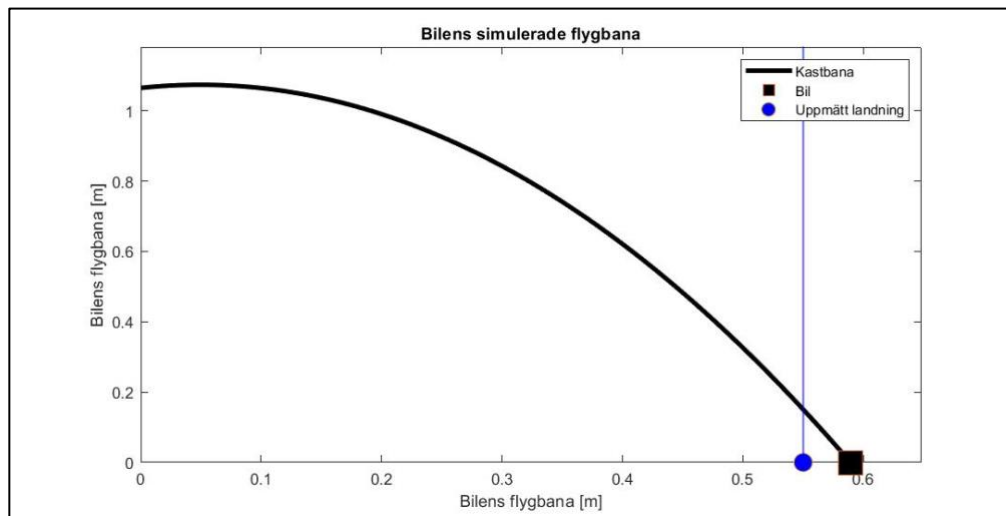
Figur 11, Färdig skjutanordning för bilen



Figur 12, Till vänster: Kilar till bottenplattan. Till höger: Färdig bil med vikter

Huvudsakligt fokus för den flygande bilen var att på ett enkelt sätt visa och låta studenter testa sig fram till vad som påverkar en kastparabel, men även att kunna ställa upp korrekta energisamband. Beräkningarna kan delas upp i två delar: en energibalans innan bilen skjuts ut och en kastparabel som beskriver bilens rörelse i luften. Ett MATLAB-script utvecklades, se Bilaga E, för att kunna

utföra samtliga beräkningar samt presentera en animerad graf som visar bilens flygbana genom luften, se Figur 13. Tanken är att scriptet skall delas med studenter som genomför experimentet för att dessa skall kunna verifiera sina beräkningar. Det skall även underlätta vid olika uppställningar av experimentet med varierande parametrar för att undvika upprepade handberäkningar. Den manual som utformades för användningen i studion hittas i Bilaga F.



Figur 13, Simulerad flygbana från MATLAB

Nedan presenteras en sammanfattning av de beräkningar som genomförts.

Energibalans:

Energibalansen ställs upp där den potentiella energin som lagras i de spända gummibanden jämförs med den potentiella energi som finns vid utskjutningsögonblicket. Differensen mellan dessa två ger den kinetiska energi som resulterar i en hastighet vid utskjutning.

Potentiell energi i två fjädrar eller gummiband:

$$E_{p0} = 2 \cdot \frac{k \cdot r^2}{2}$$

r = sträckning av gummibanden

k = fjäderkonstant

Potentiell energi vid utskjutning:

$$E_{p1} = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \cdot r$$

m = bilens massa

α = elevationsvinkel

Hastigheten vid utskjutning med hjälp av energibalans:

$$E_k = E_{p0} - E_{p1}$$

$$E_k = \frac{m \cdot v^2}{2} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{E_k \cdot 2}{m}} \Leftrightarrow v = \sqrt{\frac{(E_{p0} - E_{p1}) \cdot 2}{m}}$$

Kastparabel:

Den beräknade hastigheten v utnyttjas för att räkna ut tiden t som bilen befinner sig i luften. Därefter används t för att räkna ut förflyttningen i x-led.

$y(t)$ = höjdskillnaden mellan utskjutningspunkten och golvet. (Negativ då nollnivå ansätts till utskjutningspunkten.)

Läge i y-led:

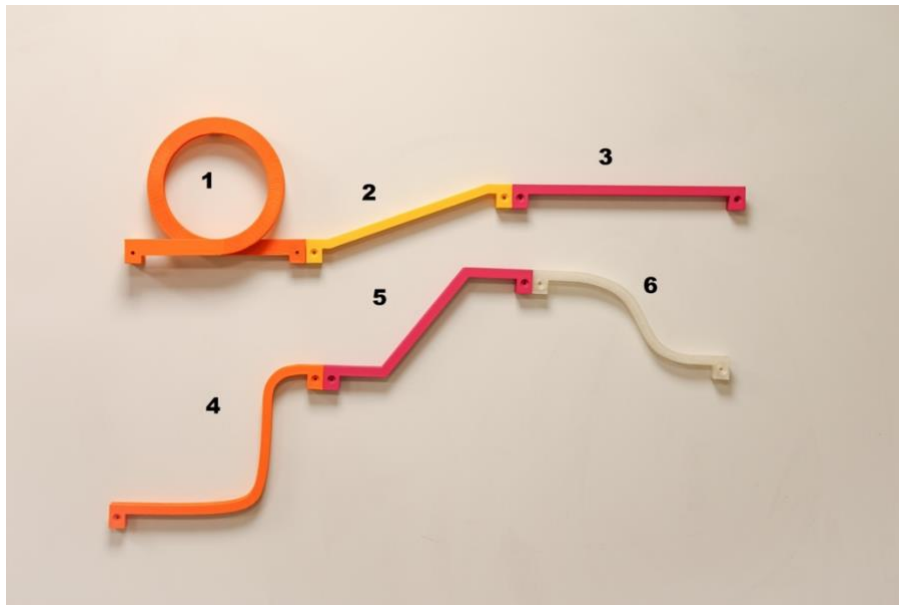
$$y(t) = v \cdot \sin(\alpha) \cdot t - \frac{g \cdot t^2}{2}$$

Läge i x-led:

$$x(t) = v \cdot \cos(\alpha) \cdot t$$

4.2.3 Kulbana

Samtliga av kulbanans moduler visas i Figur 14. Den fungerar i huvudsak men två av modulerna har brister. I modul nummer fyra är radien på den övre kurvan för liten. För modul nummer fem är lutningen för stor. Dessa problem leder till att kulan förlorar kontakt med rännan och faller därmed fritt. Resterande moduler fungerar som planerat både med avseende på modularitet, magnetfästen och möjlighet att placera dem på en magnetisk tavla. Den manual som utformades för användningen i studion hittas i Bilaga G.



Figur 14, Samtliga moduler till kulbanan



Figur 15, Magnetfäste mellan moduler

Loop:

Kulbanan kan användas för att visualisera och utföra beräkningar av kraften F som beror av centripetalaccelerationen a_c . Även gravitationskraften F_g på kulan kan beräknas i loopen. Beräkningar av dessa krafter visas nedan:

$$a_c = \frac{v^2}{r}$$

m = kulans massa

v = kulans hastighet

$$F = m \cdot a_c \Leftrightarrow F = \frac{m \cdot v^2}{r}$$

r = radie

g = gravitation

$$F_g = m \cdot g$$

För att kulan nätt och jämt ska klara att ta sig igenom loopen måste centripetalkraften och gravitationskraften vara lika stora. Detta ger att hastigheten v som krävs kan beräknas enligt följande:

$$F_c = F_g \Leftrightarrow \frac{m \cdot v^2}{r} = m \cdot g \Rightarrow v = \sqrt{r \cdot g}$$

För beräkning av höjden h kulan måste färdas från för att nå tillräcklig hastighet antas att hela potentiella energin E_p i viloläge omvandlas till kinetisk energi E_k . All friktion försummas. Detta ger:

$$E_p = m \cdot g \cdot h$$

h = höjd

$$E_k = \frac{m \cdot v^2}{2}$$

Vilket ger följande samband:

$$E_p = E_k \Leftrightarrow m \cdot g \cdot h = \frac{m \cdot v^2}{2} \Leftrightarrow h = \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

Stöt:

Även rörelsemängden p vid stöt kan visualiseras och bestämmas. I detta fall innebär begreppet stöt att två kulor färdas mot varandra för att sedan kollidera. Efter kollision färdas de båda åt samma håll och därmed ha en av dem ändrat riktning. För beräkning av rörelsemängd används följande:

$$p = m \cdot v$$

m = objektets massa

v = objektets hastighet

Likt för loopen försummas friktionen och formeln för kinetisk energi används. Rörelsemängden är densamma före och efter stöt så länge ingen extern kraft appliceras. Om båda kulorna rör sig mot varandra innan stöt och med varandra efter stöt ger detta, efter förenkling, följande:

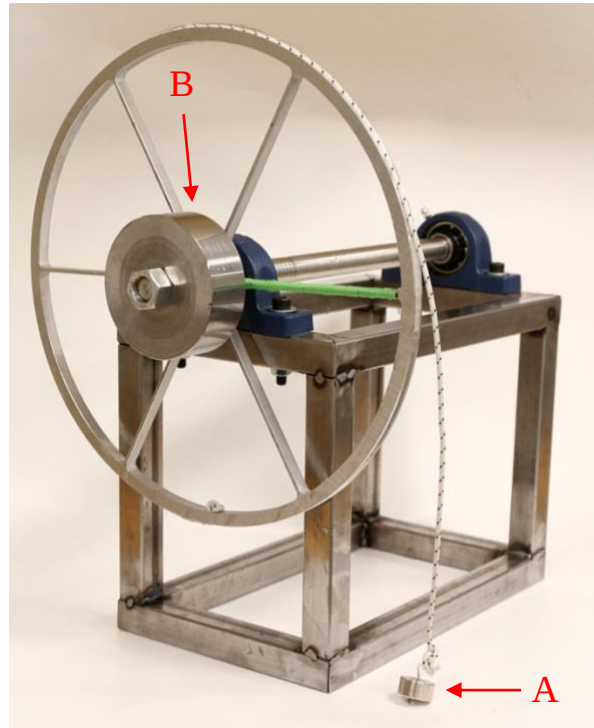
$$m_1 \cdot v_1 - m_2 \cdot v_2 = (m_1 + m_2) \cdot v$$

Om en kula är stilla innan stöt sätts $v_2 = 0$, vilket ger:

$$m_1 \cdot v_1 = (m_1 + m_2) \cdot v \Leftrightarrow v = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \cdot v_1$$

4.2.4 Masströghetsmoment

Det nya roterande hjulet består av sex tunna ekrar och väger 345 gram, detta är en minskning med över 800 gram jämfört med originalsivan. I den tidigare konstruktionen krävdes cirka 500 gram pålagd massa (massa A i Figur 16) för att få hjulet att rotera, efter lagerbytet och massreduktionen på hjulet behövdes endast 20 gram.



Figur 16, Uppdaterat masströghetsmoment

Efter att det fysiska experimentet uppdaterats behövde även beräkningarna ses över. Syftet med experimentet är att mäta tiden det tar för hjulet att snurra ett varv. För att kunna göra beräkningar av vinkelhastigheten behövdes masströghetsmomenten för de olika komponenterna beräknas. Efter att ha mätt diameter och massa på delarna gjordes beräkningar med följande förenklingar:

1. Inverkan av muttern och distansen försumrades på grund av den låga massan och lilla radien.
2. Massa B betraktades som en cylinder utan hål i mitten.
3. Hjulet delades upp och betraktades som tre stavar (sex ekrar) som roterar genom tyngdpunkten och en tunnväggig cylinder (fälgen).

Förenkling 1. och 2. kan anses ta ut varandra då den försummade massan av mutter och distans i stället adderas till massa B. Parametrarna i förenkling 3. anpassades så att summan av massan på de olika komponenterna resulterade i den uppmätta massan på 345 gram av hjulet. För beräkning av masströghetsmomentet J i de olika delarna användes följande formler:

$$J = \frac{mr^2}{2}$$

för axeln och massa B

$$J = m \cdot r^2$$

$$J = \frac{m \cdot l^2}{12}$$

för den tunnväggiga cylindern

för de tre stavarna

Vinkelhastigheten ω i slutet av varvet beräknas med energiekvationen enligt:

$$\omega(J) = \sqrt{\frac{2 \cdot m_p \cdot g \cdot h}{m_p \cdot R^2 + J}}$$

m_p = pålagd massa A

h = fallhöjd

R = radie på hjulet

Den pålagda massan A bör inte förväxlas med massan B av den roterande cylindern. I detta experiment kan den pålagda massan vara 20 gram eller 50 gram och fallhöjden är lika stor som hjulets omkrets.

Eftersom vinkelhastigheten är svår att mäta i det fysiska experimentet måste resultatet ändras till tiden det tar att snurra ett varv. För att göra detta kan två beräkningsgångar användas. I båda är lagen för rörelsemängdsmomentet och kraftmomentet M en väsentlig del av beräkningen. I ekvationen ingår även masströghetsmomentet I för det sammansatta systemet enligt Steiners sats. Detta ger:

$$M = I \cdot \frac{d\omega}{dt}$$

$$M = m_p \cdot g \cdot R$$

$$I = m_p \cdot R^2 + J$$

1. Beräkna tiden med hjälp av energiekvationen:

Vinkelhastigheten ur energiekvationen är hastigheten efter att hjulet snurrat ett varv och därför maxhastigheten ω_{max} . Eftersom vinkelaccelerationen är konstant enligt lagen för rörelsemängdsmomentet och hjulet släpps från stillastående $\omega = 0$ kan en medelhastighet $\omega_{medel} = 0,5 \cdot \omega_{max}$ beräknas. Tiden t_{varv} för ett varv fås som:

$$t_{varv} = \frac{2\pi}{\omega_{medel}}$$

2. Beräkna tiden med hjälp av lagen för rörelsemängdsmomentet:

Om lagen för rörelsemängdsmomentet integreras över förloppet av ett varv, det vill säga från $t = 0$ till $t = t_{varv}$ och $\omega = 0$ till $\omega = \omega_{max}$ fås resultatet:

$$M \cdot t_{varv} = I \cdot \omega_{max}$$

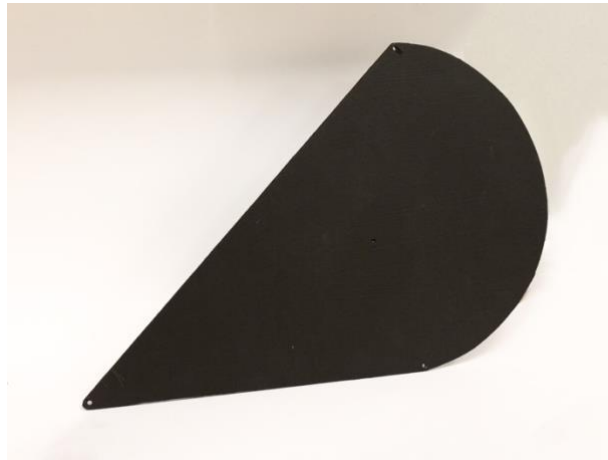
Tiden för ett varv kan då enkelt beräknas enligt:

$$t_{varv} = \omega_{max} \cdot \frac{I}{M}$$

Båda beräkningsgångarna ger samma resultat. För att få en uppfattning om hur väl experimentet fungerar utfördes mätningar på det fysiska experimentet. De uppmätta och de beräknade resultaten stämde bra överens. Detta visar att förändringarna som gjordes på experimentet var lyckade. Den manual som utformades för användningen i studion hittas i Bilaga H.

4.2.5 Tyngdpunktsplatta

I Figur 17 visas resultatet av den uppdaterade tyngdpunktsplattan. Plattan har nu en jämn yta där föreläsaren har möjlighet att göra markeringar med hjälp av tavelkrita. Även nedsänkningen som markerar plattans tyngdpunkt kan urskiljas i Figur 17. Inga beräkningar presenteras här då de redan fanns i studion sedan tidigare.



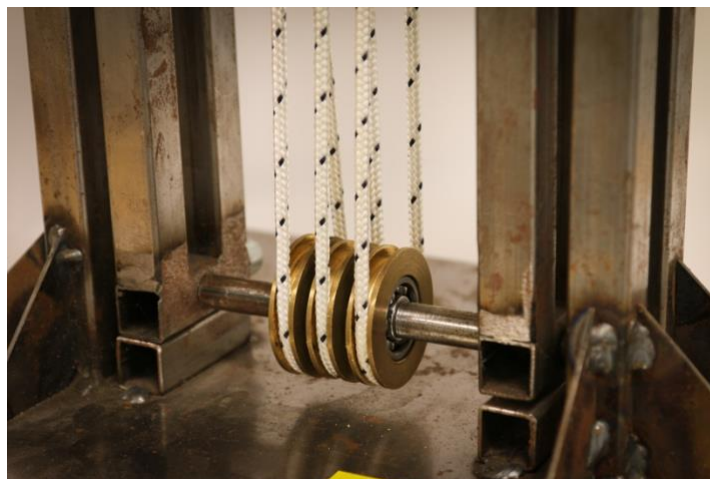
Figur 17, Uppdaterad tyngdpunktsplatta

4.2.6 Lyfta sig själv

I Figur 18 visas det slutgiltiga resultatet av experimentet "Lyfta sig själv". Det som är mest relevant att notera är att repet som nu löper över trissorna är spänt även då plattan är i sitt nedre läge vilket motverkar att det lossnar. I Figur 19 visas en närmare bild av detta rep och dess väg runt trissorna. Inga beräkningar presenteras här då de redan fanns i studion sedan tidigare.



Figur 19, Uppdaterad "Lyfta sig själv"



Figur 19, Närbild av det nya repet

4.2.7 Övriga uppdateringar

Övriga förändringar och tillskott som gjordes till studion bestod främst av inköp av ny utrustning. Dessa inköp presenteras i listan nedan.

- Två nya personvågar som kan användas i ett experiment för upplagskrafter.
- En uppsättning handverktyg för att underlätta tillverkningsarbete i studion.
- En förbandslåda för att behandla mindre skador.

5 Diskussion och slutsats

I detta kapitel diskuteras arbetets genomförande och resultat genom resonemang kring vad som lyckades och vad som hade kunnat göras annorlunda samt felkällor. Även idéer och förslag om möjligt fortsättningsarbete med experimenten presenteras och diskuteras.

5.1 Planering

Den inledande planeringen av arbetet lades upp veckovis med hjälp av ett Gantt-schema. I slutskedet av arbetet kan det konstateras att denna följdes relativt väl men en betydande skillnad är att tillverkningen av experimenten tog längre tid än planerat. Denna del planerades vara avslutad i vecka 17 men pågick i verkligheten ända in i vecka 19. Detta är självklart något som kan hända i alla arbeten och gruppen var medveten om risken tidigt i processen. Kontinuerlig dialog pågick i gruppen för att stämma av inom vilka områden extra mycket arbete behövdes. Detta var ett bra sätt för samtliga medlemmar att ha kontroll på var i processen respektive experiment befann sig. Det är möjligt att resultatet hade gynnats av att tillverkningen hade kunnat påbörjats någon vecka tidigare men det är svårt att, i efterhand, säga hur mycket det hade påverkat slutprodukternas kvalitet. Sammantaget följdes planeringen väl och alla mål uppnåddes.

5.2 Förarbete

Att inventeringen genomfördes tillsammans med både examinator och handledare medförde att de beslut som togs godkändes direkt och därmed behövde gruppen inte oroa sig för att göra felprioriteringar. Eftersom både examinator och handledare tillhör användargruppen för utrustningen i studion var det av vikt att ta del av deras tankar och resonemang kring vad som ansågs vara användbart och inte. Om detta moment inte hade genomförts i samråd med de ansvariga för studion finns en stor risk att det material som slängdes egentligen borde sparats eller tvärtom.

Enkätundersökningen besvarades av studenter utanför undervisningen. Detta kan ha lett till att svaren fylldes i hastigt, utan större reflektion. Detta blir tydligt när en studerar det faktum att 27 % av studenterna på Samhällsbyggnadsteknik svarade att de upplevde ångpanneformlerna som svåra, trots att detta ämnesområde inte ingår i hållfasthetslära på programmet. Eftersom samma enkät skickades ut till fyra program kan det finnas fler fel av liknande karaktär från flera studenter. Att enkäten hade 100 respondenter kan innebära att resultatet inte är representativt för användargruppen då detta endast är en liten del av de berörda studenterna. Om en identisk undersökning hade genomförts på 100 nya respondenter finns en risk att resultatet skulle skilja sig mot det första. Denna risk anses dock inte vara avgörande i detta arbete då resultatet ändå är representativt för en del av användargruppen. Tanken med att utveckla och inkludera experiment i grundutbildningen är att underlätta inläring och förståelse för olika koncept eller teorier. Eftersom den kommande idégenereringen baserades på resultatet från inventering och enkätundersökning har en del av användargruppens behov tillgodosetts och därmed kan förhoppningsvis inläringen förenklas för denna del. En annan felkälla skulle kunna vara att det var möjligt för samma person att svara på enkäten flera gånger. Sannolikheten för detta är svår att bedöma men det finns troligtvis inget stort intresse av att förfälska enkäten genom att ge flera svar.

Att enkätundersökningen genomfördes innan idégenereringsfasen påbörjades innebär att de förslag som utvecklades är relevanta och stämmer överens med användargruppens behov. Om dessa steg hade utförts i omvänd ordning hade det förmodligen inneburit att en mängd idéer hade behövt strykas då de inte mötte kraven. Detta hade resulterat i onödigt arbete som inte bidragit till slutresultatet. Därför anser vi att den arbetsgång som användes fungerade på ett mycket bra sätt. Något som däremot kan ha påverkat och begränsat slutresultatet är att ingen specifik idégenereringsmetod användes under denna fas. Detta kan ha medfört att gruppen gått miste om relevanta idéer som hade kunnat utnyttjats i arbetet. Valet av de nya experiment som skulle tillverkas gjordes främst utifrån gruppens egna preferenser gällande vad som ansågs mest lockande. Eftersom listan hade skapats baserat på enkätsvaren uppfyllde samtliga alternativ de identifierade behoven. Vi känner oss nöjda med den undersökning som gjordes innan idégenereringen då vi vet att en del av behoven har tillgodosetts av vårt arbete.

Att gruppen fick möjlighet att medverka som handledare vid en laboration i hållfasthetslära var värdefullt för att få ta del av en verklig situation. I efterhand konstaterades dock att det även hade varit givande att kunna närvara vid en laboration där beräkningar skulle utföras. Det hade varit intressant att se hur denna typ av experiment påverkade studenterna och på vilket sätt de interagerade med utrustningen och varandra.

Den teori som presenteras kopplad till pedagogik kan ifrågasättas då källorna till denna är flera år gamla. Pedagogik är ett område som är under kontinuerlig utveckling och synsätten kan således förändras ofta. Teoriavsnittet förklarar hur kunskap är något som ges av den som lär ut. Det påpekades av examinatorn att detta är ett något föråldrat sätt att se på området och att det idag snarare handlar om att studenten erövrar kunskapen. Detta sker genom aktivt lärande med hjälp av alla sinnen. Detta påvisar att det är viktigt att vara medveten om att den teori som var relevant för bara några år sedan snabbt kan bli förlegad.

5.3 Nya och uppdaterade experiment

Nedan diskuteras resultaten av experimenten som behandlats i arbetet. Bland annat resoneras det gällande om det uppfyller sina syften och om det finns några felkällor.

5.3.1 Tensegritetspall

Tensegritetspallen har den struktur som planerades i början av arbetet och kan därför anses ha uppfyllt sitt ursprungliga syfte. Genom kontinuerlig revision har arbetet med pallen ändrats under arbetets gång, detta för att så många parametrar som möjligt ska vara reglerbara och att samtliga delar ska vara tillräckligt stadiga. Processen har varit iterativ och olika aspekter har gått igenom metodiskt upprepade gånger för att göra experimentet så välfungerande som möjligt.

Experimentet kan, till viss mån, anses vara för komplicerat i förhållande till grundkurser inom mekanik och hållfasthetslära. Detta eftersom det resulterade i en invecklad friläggning av strukturen som tar hänsyn till aspekter inom både mekanik och hållfasthetslära. Studenterna behöver ha en djupare kunskap inom båda ämnena för att förstå hur deformationer, krafter och material analyseras. Bedömningen är att pallen ändå uppfyller sitt syfte och visar koncepten tensegritet och linkrafter på ett bra sätt.

Om det i framtiden finns önskemål om att skapa ytterligare komplexitet och djup i experimentet hade fenomenet kunnat visas på fler sätt än bara med en pall. Genom variation av stöddlinor åt flera olika håll hade det kunnat visas att denna typ av struktur kan sammansättas på fler sätt än endast en pall.

5.3.2 Flygande bil

Genom att det nya experimentet är mer modulärt än det tidigare kan ett större antal faktorer som påverkar bilens flygbana studeras. Detta möjliggör en högre grad av interaktion mellan studenterna och själva experimentet. Ett flertal parametrar kan justeras och anpassas för att sedan kunna jämföra resultaten. De syften som sattes i början av arbetet gällande att omarbete experimentet uppfylls därmed. Vidare kan användbarheten av experimentet anses vara högre än tidigare, då det nu finns fler aspekter som kan beaktas. Med allt detta i åtanke bör den nya versionen av experimentet ses som en förbättring som kan ge djupare förståelse för de mekaniska fenomen som uppstår.

5.3.3 Kulbana

Kulbanan uppfyller i huvudsak sitt syfte då majoriteten av modulerna fungerar. Dock kan två moduler inte användas som planerat vilket påverkar helheten. Möjligheten till variation av kulbanan minskar och dessutom skulle dessa två moduler bidra med stor höjdskillnad. Detta medför att de moduler som skulle skapa störst hastighet saknas, vilket försvårar möjligheten för kulan att ta sig igenom loopen.

Resultatet anses visualisera koncepten stöt/rörelsemängd samt hastighet och centripetalkraft på ett önskvärt sätt. Den främsta anledningen till de konstaterade bristerna är antalet iterationer som krävdes innan ett fungerande koncept hittades. På grund av tiden som gick åt till att lösa de tidiga problemen kunde inte lika mycket tid läggas ned på optimal utformning av modulerna. I efterhand visade det sig att detta var ett steg i processen som hade behövt mer arbete.

Experimentet är användbart men har också utvecklingsmöjligheter. Exempelvis skulle helt nya geometrier kunna skapas vilket i sin tur skulle medföra möjligheter till nya koncept och beräkningar. Ett sådant koncept skulle exempelvis kunna vara att undersöka vilken sammansättning av moduler som medför att kulan rör sig snabbast från en punkt till en annan. En annan möjlighet är att räkna på kastparabler om kulan inte stoppas i slutet av banan. Eftersom nya moduler enkelt kan designas och skrivas ut kan dessa möjligheter realiseras relativt enkelt. Då kandidatarbetet genomförs årligen kommer dessutom alla ritningar av moduler att överlämnas till framtida grupper för att underlätta modifiering och vidareutveckling.

5.3.4 Masströghetsmoment

Bytet av lager ledde till att friktionen numera kan försummas. Eftersom de nya lagerna är öppna finns dock en risk att friktionen ökar med tiden allt eftersom smuts tränger in i dessa. Ett förslag för att motverka denna risk är att placera en plastpåse som skydd över experimentet när detta inte används. Denna lösning kan i framtiden behövas ses över då det inte garanterar lufttätethet. Reduktionen av massan på hjulet resulterade i att skillnaden mellan experimentet med och utan massa blev tydlig. De olika hastigheterna och tiderna skiljer sig åt med cirka 8–10 % vilket är

tillräckligt för att kunna påvisa fenomenet. Trots att hjulets massa reducerats avsevärt är det fortfarande den komponent som har den största masströgheten. En möjlighet för framtida arbete skulle kunna vara att minska radien på hjulet för att sänka masströgheten ytterligare. Om detta görs finns en risk att den pålagda massan om 20 gram inte längre räcker för att sätta hjulet i rörelse. Resultatet av experimentets uppdatering är lyckat och medför att det nu kan användas i undervisningen.

Utöver att mäta tiden för ett varv skulle det kunna vara intressant att även mäta hjulets vinkelhastighet. För att kunna göra detta skulle infästningen av snöret behöva ändras så att det inte bromsar hjulet efter att den pålagda massan har accelererat det. Detta skulle till exempel kunna uppnås genom att snöret faller av efter ett varv.

5.3.5 Lyfta sig själv

Att byta ut den gamla vajern mot ett rep visade sig vara ett effektivt sätt att lösa det tidigare problemet med att vajern hoppade av från trissorna. Repet är förmodligen något mer elastiskt än vajern men detta bör inte påverka utfallet av experimentet. Det finns en viss risk att förslitningen på repet blir större än på en vajer då de tunna trådarna kan brista på grund av exempelvis friktion vid användning. Det skulle dock krävas mycket stor förslitning för att repet skulle brista helt och därmed anses inte detta vara ett avgörande problem. I studion finns även extra rep om det skulle behöva bytas ut i framtiden. Vidareutveckling av detta experiment skulle bland annat kunna innebära att en konstruktion skapas där det är möjligt att själv välja hur många trissor som ska användas vid varje lyft. Detta skulle innebära att studenter då kan resonera kring och testa hur lyftkraften påverkas av fler eller färre antal trissor.

Källförteckning

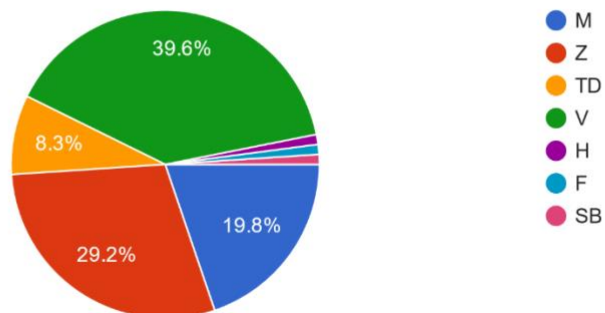
- [1] S. Booth och F. Marton, *Om lärande*, Lund, Sverige: Studentlitteratur, 2008.
- [2] M. Elmgren och A-S. Henriksson, *Universitetspedagogik*, 3. uppl., Lund, Sverige: Studentlitteratur, 2016.
- [3] T. Clemmensen, A. Jacobsen, M. May och C. Rump, "Kvalitetsudviklingsprojekt "Faglig Sammenhæng": Hovedrapport", Kgs. Lyngby, Danmark, CDM:s skriftserie 1, 1999.
- [4] J. Biggs och C. Tang, *Teaching for quality learning at university: What the student does*, 4. uppl., Maidenhead, Storbritannien: Open University Press, 2011.
- [5] T. David, "How to Design and Understand Unusual Tensegrity Structures," *Ansys Blog*, Apr. 2020. [Online]. Tillgänglig: <https://www.ansys.com/blog/design-floating-structures-tensegrity>, Hämtad: 2022-04-26.
- [6] A. Case, "Tensegrity," 2009. [Elektronisk bild]. Tillgänglig: <https://www.flickr.com/photos/caseorganic/4129751491/>, hämtad: 2022-05-12.
- [7] S. Eliasson, A. Jösok, L. Nävert och L. Sundbäck, "Lyfta sig själv", 2013. [Elektronisk bild], hämtad: 2022-05-12.
- [8] P. Borg-Karlsson, A. Fakt, O. Johansen, E. Siöland, S. Svensson och S. Zamola, "Masströghetsmoment", 2021. [Elektronisk bild], hämtad: 2022-05-12.
- [9] Autodesk, 2022 Fusion 360 (2022). Autodesk Fusion 360. <https://www.autodesk.se/products/fusion-360/overview>.
- [10] 3DS, 2019. Catia v5. <https://www.3ds.com/products-services/catia/>.
- [11] Mathworks, 2022. Matlab 2022b. <https://se.mathworks.com/products/matlab.html>
- [12] P-E Austrell et.al. 2004. CALFEM - A finite element toolbox, https://www.solid.lth.se/fileadmin/hallfasthetslara/utbildning/kurser/FHL064_FEM/calfem34.pdf, [Online], hämtad 2022-05-07

Bilagor A-H

Bilaga A, Enkätundersökning

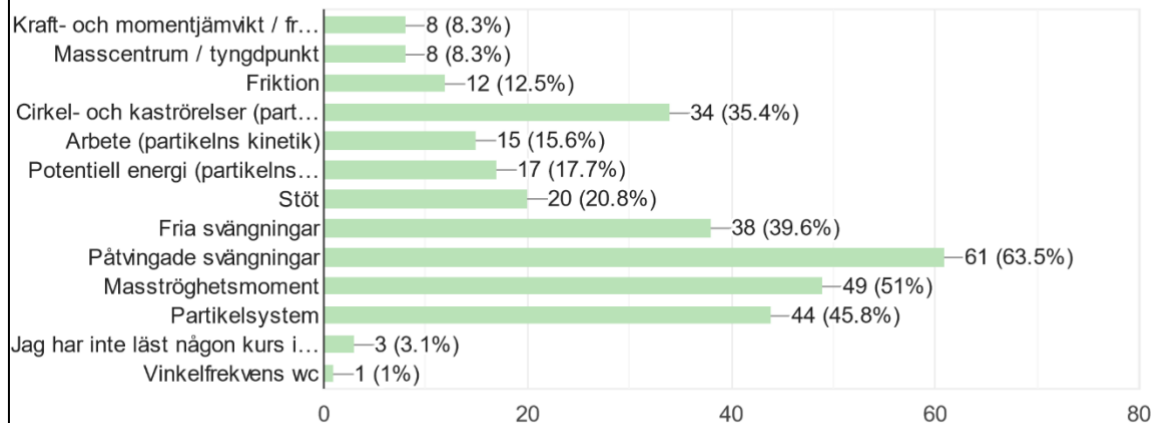
Vilket program tillhör du?

96 responses



Vilket/vilka områden inom grundkursen i mekanik upplevde du var svårast att förstå?

96 responses



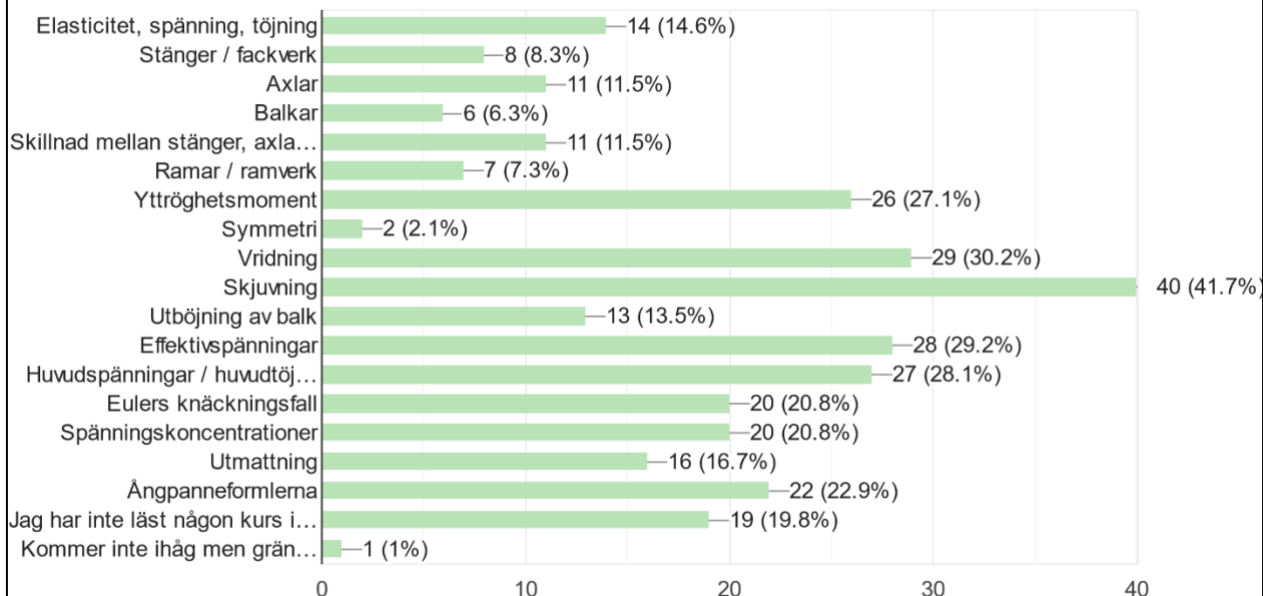
Inom vilket/vilka av dessa områden tror du att inläringen skulle kunna underlättas med hjälp av experiment eller labbar?

96 responses



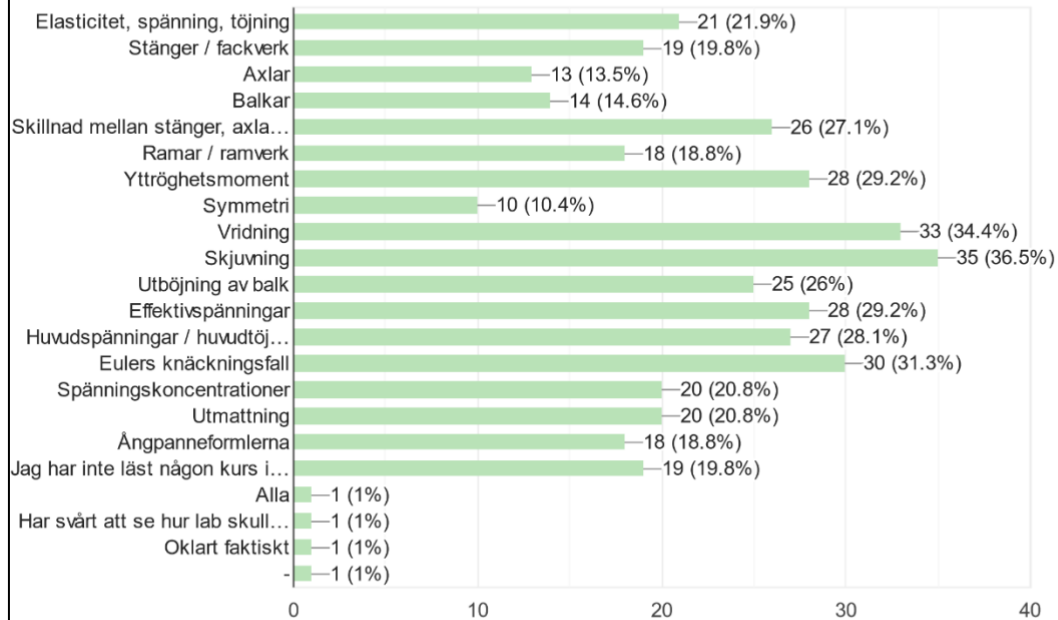
Vilket/vilka områden inom grundkursen i hållfasthetslära upplevde du var svårast att förstå?

96 responses



Inom vilket/vilka av dessa områden tror du att inlärningen skulle kunna underlättas med hjälp av experiment eller labbar?

96 responses



Övrigt

Har du några avslutande tankar eller idéer kring experiment och labbar inom grundkurserna i mekanik och hållfasthet?

17 responses

Simulering i matlab

Praktiska labbar

Dem enkla fallen som experiment ofta handlar brukar vara lätta att förstå - man fattade redan innan laborationen. Dem svåra sakerna i kursen är ofta svåra att visa genom labbar (huvudspänningar, vridning av axlar osv)

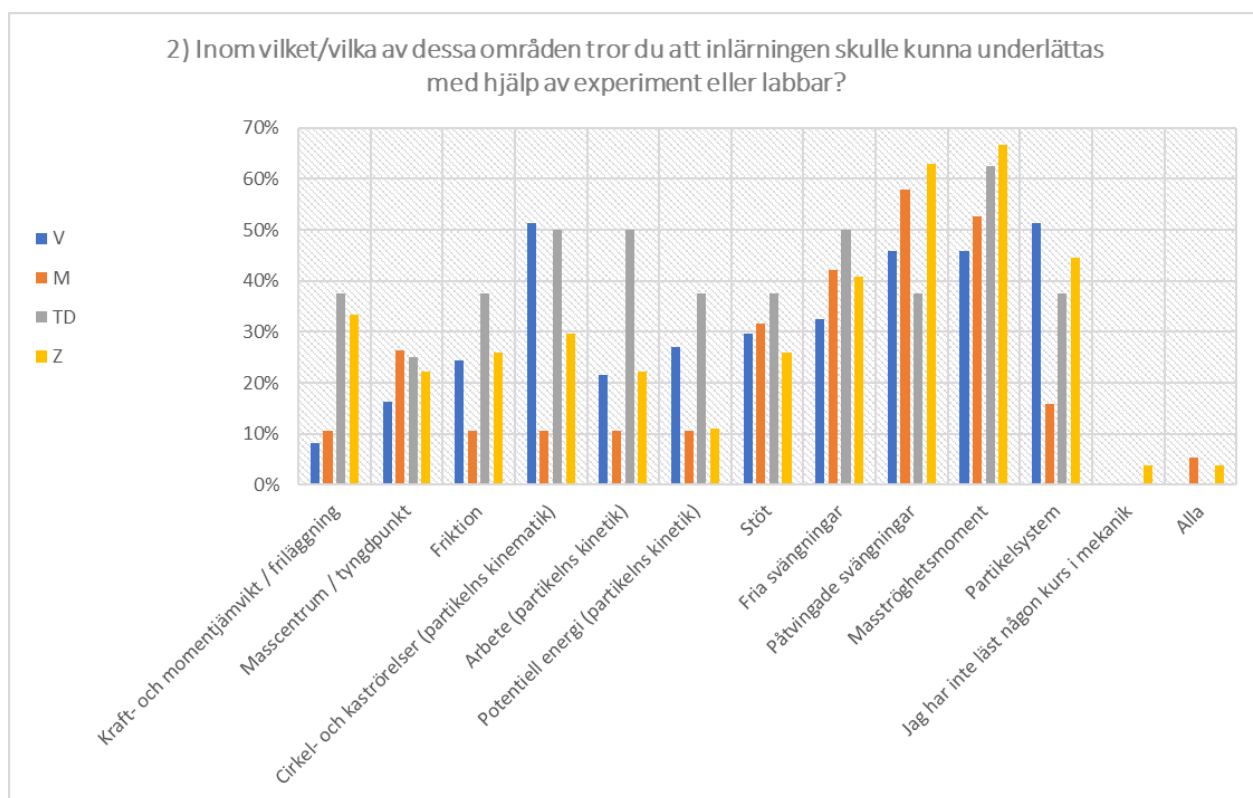
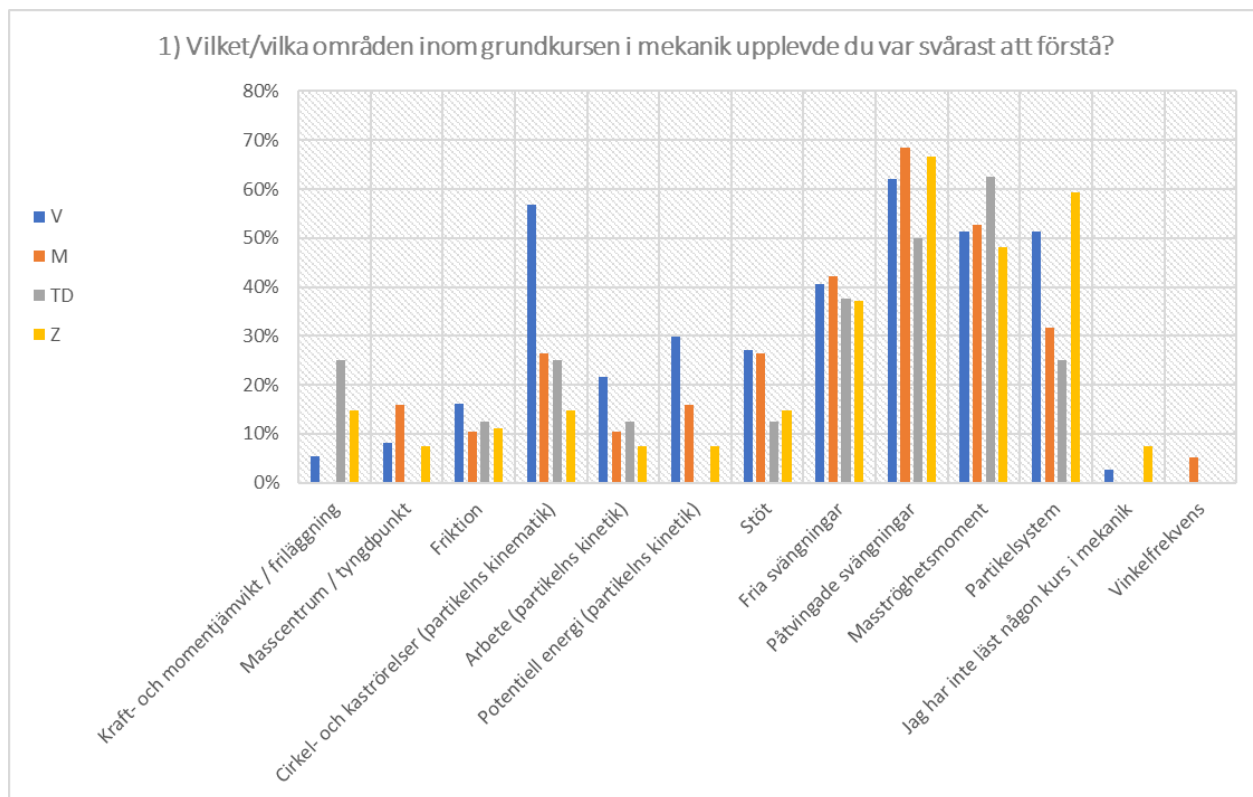
Jag har svårt att minnas kurserna och exakt vad som avsågs inom respektive del, varpå enkäten delvis blev lite svår att svara på för min del

Jag tror typ alla olika ämnen skulle påverkas mkt positivt om det fanns fler labbar. Det ökar förståelsen

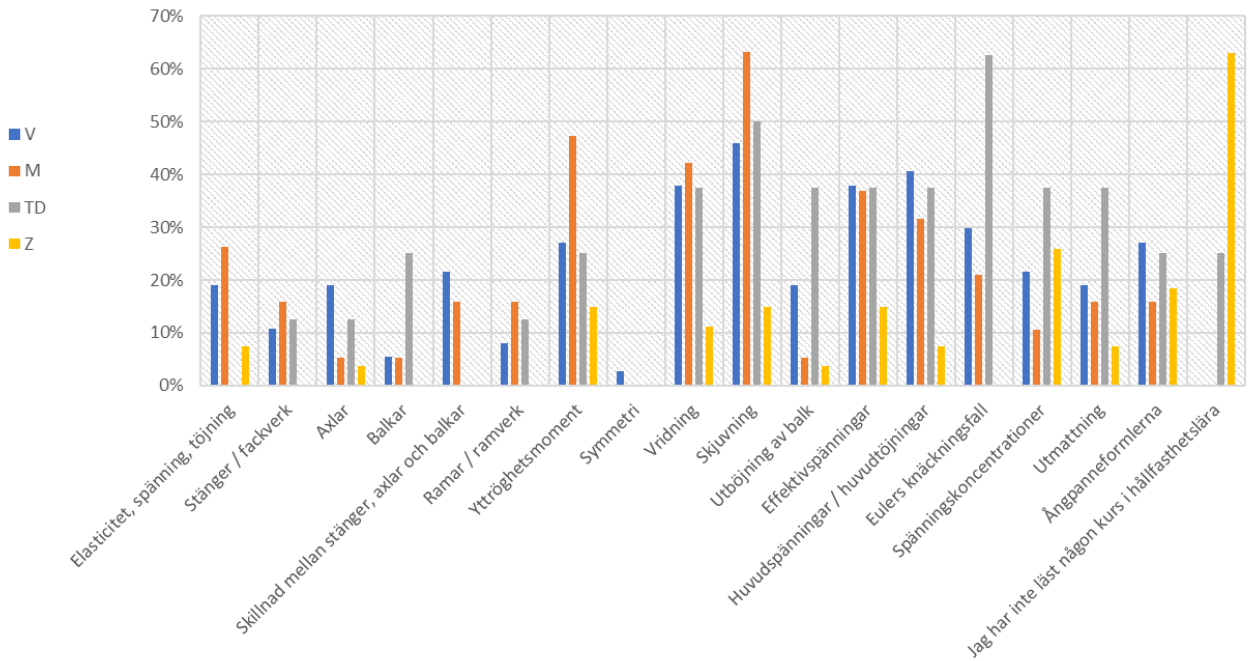
nej :)

Bra att illustrera de fenomen som behandlas för att få en tydlig uppfattning av hur de ser ut i verkligheten

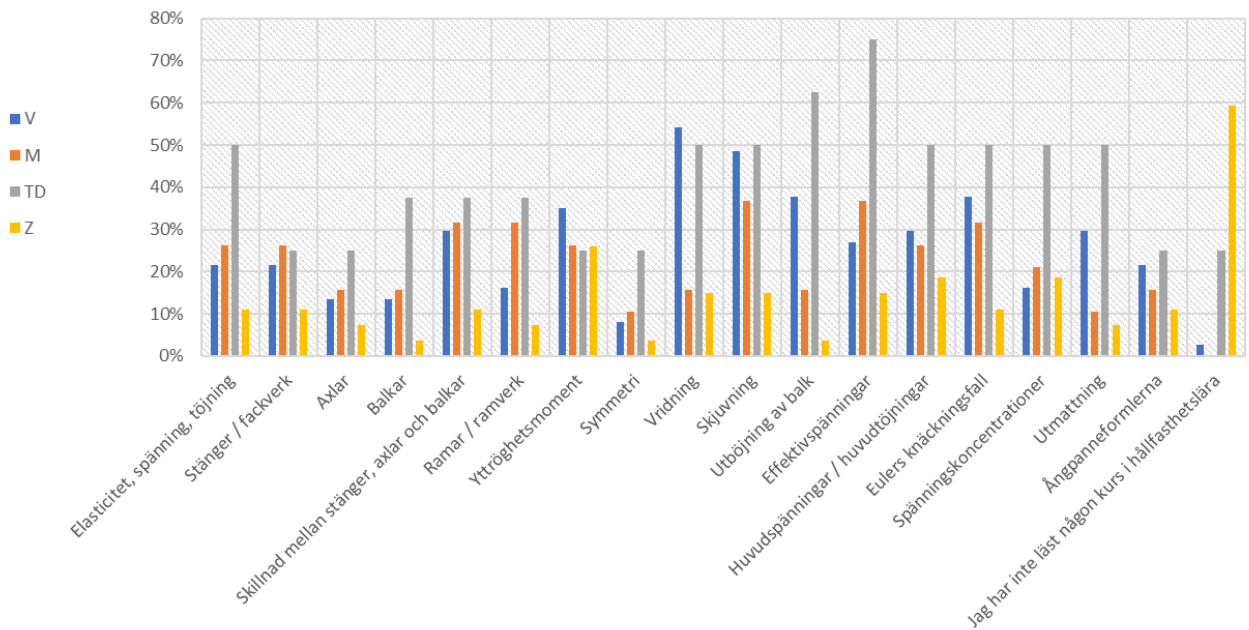
Det är värt att testa för att det kan vara väldigt svårt att förstå teorin vid tillfällen!



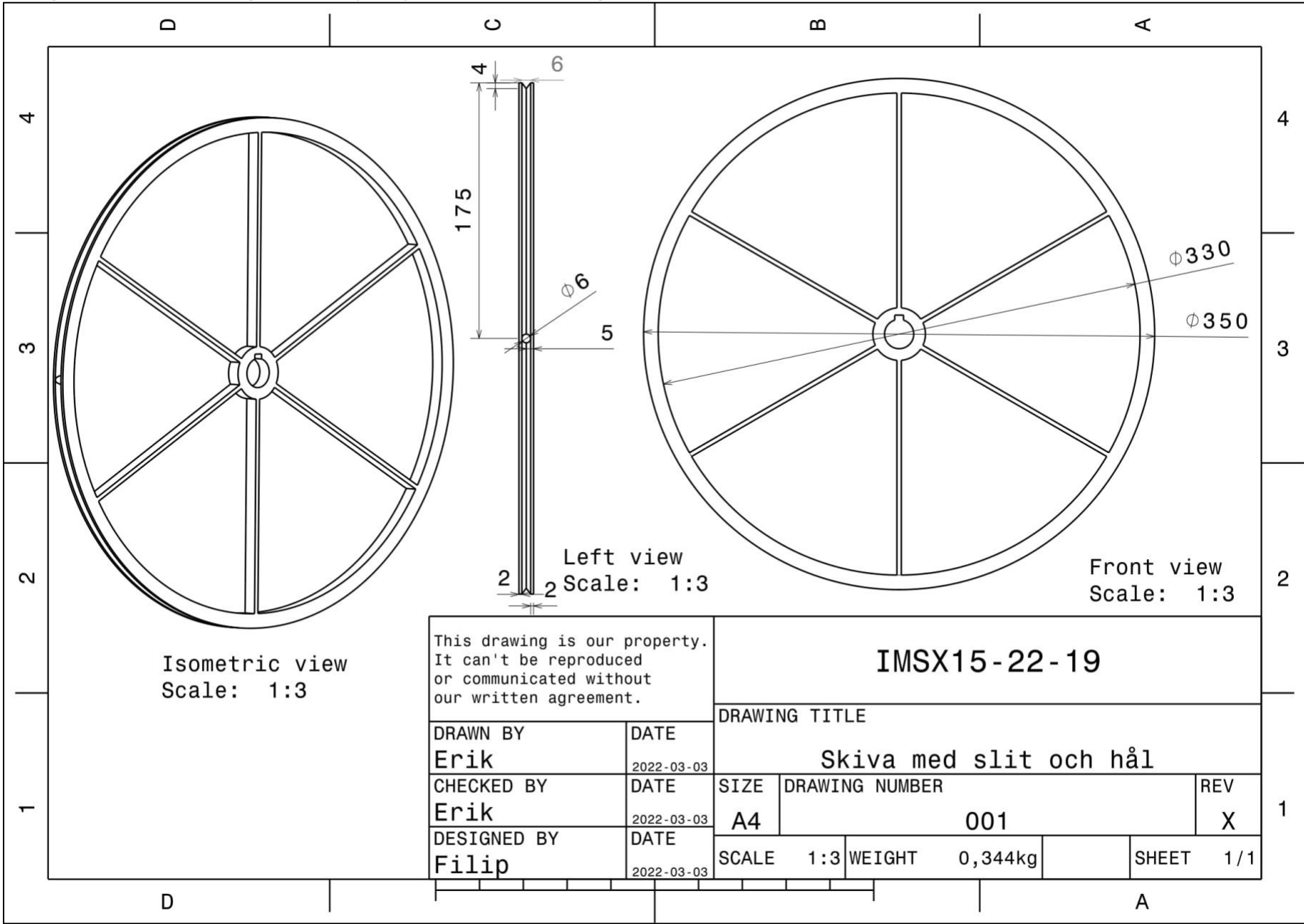
3) Vilket/vilka områden inom grundkursen i hållfasthetslära upplevde du var svårast att förstå?



4) Inom vilket/vilka av dessa områden tror du att inläringen skulle kunna underlättas med hjälp av experiment eller labbar?



Bilaga B, CAD-ritning av det nya hjulet för masströghetsmomentet



Bilaga C, Skript för beräkning av linkraften och deformationen i mittenlinan på tensegritetspallen

```
clear all
close all

% materialdata
Ea = 70e9;           % aluminium
El = 3e9;            % lina
Aa = 0.03*0.01;      % al tvärsnitt
Al = pi*0.00006^2;   % lina tvärsnitt
Ia = 0.01*0.03^3/12; % yttröghet al

epa = [Ea Aa Ia];

% struktur
ex = [0 0.28
      0.28 0.28
      0.28 0.14
      0.14 0
      0 0
      0 0.28
      0.14 0.14];
ey = [0 0
      0 0.282
      0.282 0.282
      0.118 0.118
      0.118 0.4
      0.4 0.4
      0.118 0.282];

Edof_al = [1 1 2 3 4 5 6
           2 4 5 6 7 8 9
           3 7 8 9 10 11 12
           4 13 14 15 16 17 18
           5 16 17 18 19 20 21
           6 19 20 21 22 23 24];

Edof_li = [7 10 11 13 14];

% beräkning
K = zeros(24);
f = zeros(24,1);
f(14)=-10;           % egentyngden 10N + eventuell pålagd last
```

```

for i=1:6                                % tar ut elementstyvhetmatriser för aluminium
    [Ke,fe]=beam2e(ex(i,:),ey(i,:),epa);
    [K,f]=assem(Edof_al(i,:),K,Ke,f,fe);
end

Ke=bar2e(ex(7,:),ey(7,:),[E1 A1]);      % linan i mitten
K=assem(Edof_li(1,:),K,Ke);

bc = zeros(8,2);
bc(1:6,1)=1:6;                          % randvillkor, låser bottenplattan
bc(7,1)=16;                             % låser i sidled för eftersom vi försummar de stabiliserande linorna på sidorna
bc(8,1)=19;
[fsk,krft]=solveq(K,f,bc);

ed_al=extract(Edof_al,fsk);
ed_li=extract(Edof_li,fsk);
ed=zeros(7,6);
ed(1:6,:)=ed_al;
ed(7,1:2)=ed_li(:,1:2);
ed(7,4:5)=ed_li(:,3:4);

eldraw2(ex,ey);                          % plottar ursprungliga systemet
hold on
eldisp2(ex,ey,ed,[2,2,1],1);             % plottar förskjutna systemet på det ursprungliga
xlabel("bredd på pallen")
ylabel("höjd på pallen")
title("Pallen före och efter förskjutning")

%förlängning av linan
xuppe=0.14+fsk(10);
yuppe=0.282+fsk(11);
xnere=0.14+fsk(13);
ynere=0.218+fsk(14);
linany=sqrt((xuppe-xnere)^2+(yuppe-ynere)^2);
disp('förlängning av linan i [m]:')
disp(0.282-0.218-linany)                 % mittlinan vid stående belastning

% normalkraft i linan
disp('kraften i linan i mitten i [N]:')
disp(bar2s(ex(7,:),ey(7,:),[E1 A1],ed_li(1,:)))

```

Tensegritetspall

Hållfasthetslära

Labbutrustning:

- tensegritetspall
- olika linor
- vikter
- digitalt skjutmått



Instruktioner:

1. Sätt ihop pallen med lina av önskat material
2. Belasta med vikter tills linan får en synlig deformation
3. Mät nedböjningen med skjutmåttet
4. Gör om med olika tjocklek och material på linorna

Frågor:

1. Om linorna har en kapacitet på 250N var, med vilken kraft kan pallen belastas?
2. Varför byter vi bara ut linan i mitten?
3. Blir det en skillnad i kraftfördelningen i linorna om pallen hålls i den övre eller undre plattan?

Vänd för att läsa om teorin →

Tensegritetspall

Hållfasthetslära

Teori:

Tensegritetsstrukturen bygger på att en struktur spänns upp av linor som endast tar dragkrafter. De olika komponenterna nuddar inte varandra utan linorna upprätthåller strukturen. En kan tro att de olika linorna belastas på liknande sätt men i verklighet läggs nästintill all vikt på mittenlinan. Linorna längs med randen på cirkeln balanserar och stabiliserar strukturen.

Beroende på var de olika vikterna placeras på topplattan kommer de yttre linorna att belastas på olika sätt. På grund av detta är det också viktigt att ha i åtanke den deformation som uppstår vid användning samt vilka material som är relevanta för de olika delarna av strukturen. När vikterna placeras på ovansidan av pallen kommer mittenlinan att belastas till den punkt att den förlängs, vilket kan användas för att beräkna och analysera deformationen och därmed E-modulen hos de olika linorna.

Senast reviderad: 2022-05-12

Beräkning:

Eftersom all kraft förs genom linan i mitten kan pallen användas för att bestämma elasticitetsmodulen hos de olika linorna.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

$$\text{där } \sigma = \frac{F}{A} \text{ och } \varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

Bilaga E, Skript och funktioner för beräkningen av kastparabeln

```
%Kastbana
clear all, close all, clc;
g = 9.81;

%% Fyll i dessa
alpha = 20; %Elevationsvinkel [grader]
mbil = 0.104; %Massa på bil [kg]
mvikt = 0.1; %Massa tillagd vikt [kg]
r = 0.2; %Längd som skjutordningen spänns, accelerationssträcka [m]
bord = 0.88; %Höjd från golv till BORDSKANTEN, total höjd räknas ut av programmet [m]
xm = 0.55; %Uppmätt avstånd vid kast [m]

%Fjäderkonstant
deltax = 13.5; %Utsräkning av gummiband [cm]
testvikt = 0.1; %Vikt som testas med [kg]

%% Räknas ut (Rör ej dessa värden)
platta = 0.5; %Plattans längd [m]
tjocklekplatta = 1.5/100; %Tjocklek på bottenplatta [cm]
k = (testvikt*g)/(deltax/100); %Fjäderkonstant för gummiband
h = bord+platta*sind(alpha)+tjocklekplatta*cosd(alpha);
m = (mbil + mvikt);
Fg = m*g;

%% Accelerationsfas
%Potentiell energi i fjädrarna/gummibanden
Ep0 = 2*(k*r^2)/2;
%Potentiell energi vid högsta läget (Utskjutning)
Ep1 = Fg*(sind(alpha)*r);
%Skillnad i energi = kinetisk energi
Ek = Ep0-Ep1;

%Räkna ut v0
v0 = funkv(Ek,m);

%% Kastparabel
%Räkna ut tiden vektorn p avser termerna i pq-formeln
p = [-g/2 (sind(alpha)*v0) h];
t = funkt(p);
tc = linspace(0,t,100);
```

```

%Räkna ut förflyttning i x-led. Vektorn xc används för plot
xc = funkx(tc,v0,alpha);
x = xc(end);

%Läge i y-led. Vektorn y används för plot
y = funky(v0,alpha,tc,g,h);

%% Räkna ut felet och printa
%Räknar ut felet och printar text
error = round(x - xm,3);
if error > 0 && error >= 1 && error > 0.01
fprintf('Bilen flög %3.3f meter för kort. \nDen borde flugit %3.3f meter\n',error, x)
elseif error > 0 && error < 1 && error > 0.01
fprintf('Bilen flög %3.1f centimeter för kort. \nDen borde flugit %3.3f meter\n',error*100, x)
elseif error < 0 && abs(error) >= 1 && abs(error) > 0.01
fprintf('Bilen flög %3.3f meter för långt. \nDen borde flugit %3.3f meter\n',abs(error),x)
elseif error < 0 && abs(error) < 1 && abs(error) > 0.01
fprintf('Bilen flög %3.1f centimeter för långt. \nDen borde flugit %3.3f meter\n',abs(error)*100, x)
else
fprintf('Bilen flög samma längd som den borde!\nDen flög: %3.3f \n',x)
end

%% Ritar bilens bana och visar även vart den faktiskt landade
% Vid upprepade försök kan detta avsnitt kommenteras bort

fh = figure();
fh.WindowState = 'maximized';
plot(xc,y,'Color','black','LineWidth',3);
axis([0 max(x,xm)+max(x,xm)*0.1 min(y) max(y)+max(y)*0.1]);
hold on
point1 = plot(xc(1),y(1),'square','MarkerFaceColor','black','MarkerSize',20);
point2 = plot(xm,y(end),'o','MarkerFaceColor','blue','MarkerSize',12);
xline(xm,'Color','blue','LineWidth',1);
legend('Kastbana','Bil','Uppmätt landning');
title('Bilens simulerade flygbana');
xlabel('Bilens flygbana [m]')
ylabel('Bilens flygbana [m]')
hold off
for i = 2:length(xc)
    point1.XData = xc(i);
    point1.YData = y(i);
    drawnow
end

```

```

%% Skriver ut data för enklare kontrollräkning
fprintf('\nData: \n')
fprintf('Elevationsvinkel: %2.2f grader\n',alpha)
fprintf('Fjäderkonstant: %3.4f N/m\n',k)
fprintf('Höjd från utskjutning till golv: %2.4f m\n',h)
fprintf('Total massa: %2.4f kg\n',m)
fprintf('Potentiell energi i gummibanden (Ep0): %2.4f J\n',Ep0)
fprintf('Potentiell energi vid utskjutning (Ep1): %2.4f J\n',Ep1)
fprintf('Kinetisk energi (Skillnad Ep0-Ep1): %2.4f J\n',Ek)
fprintf('Hatighet v0: %4.4f m/s\n',v0)
fprintf('Tid som bilen befinner sig i luften: %2.4f s\n',t)
fprintf('Maximal höjd under flygningen: %3.3f m\n',max(y))

```

```

function t=funkt(p)
t = roots(p);
t = t(1);
return

```

```

function v0=funkv(Ek,m)
v0 = sqrt(2*Ek/m);
return

```

```

function xc=funkx(tc,v,alpha)
xc=v*cosd(alpha)*tc;
return

```

```

function y=funky(v0,alpha,tc,g,h)
y = (v0.*sind(alpha).*tc-(g*(tc.^2)/2))+h;
return

```

Flygande bil

Mekanik

Labbutrustning:

- Platta med skjutordning
- Tre klossar med olika vinklar (10° , 20° , 30°)
- Gummiband av liknande karaktär som på skjutordningen
- Dynamometer för kontroll av k
- Bil
- Vikter
- Måttband
- Våg



Instruktioner:

1. Väg bilen och anteckna vikten
2. Mät avståndet från överkanten av plattan till golvet (se bild)
3. Välj en vinkel och placera motsvarande kloss i hålen under plattan. (Går även att köra utan kloss, således blir $\alpha=0^\circ$)
4. Sätt plattan så att överkanten är parallell med bordets kant
5. Placera måttbandet på golvet, i linje med plattan och bordskanten
6. Dra tillbaka skjutordningen och mät avståndet från framkanten av skjutordningen till dämparna (gula gummiband), markera avståndet med tejp
7. Placera bilen (och eventuella vikter i bilen) mot skjutordningens gröna del
8. Släpp anordningen och observera vart bilens framkant landar på måttbandet

Frågor:

1. Hur påverkas längden på kastet av olika vikter och vinklar? Påverkas själva kastet eller accelerationen på plattan?
2. Vilken vinkel är optimal för längst möjliga flygtur?
3. Vilka kan eventuella felkällor vara? Flög bilen för långt eller kort?

Vänd för att läsa om teorin →

Flygande bil

Mekanik

Teori:

I början av turen, när bilen accelererar kan vi utnyttja energiprincipen och anta att den potentiella energi som finns i gummibanden när dessa är spända, omvandlas till kinetisk- och lägesenergi när bilen nått slutet på accelerationssträckan.

Följande förenklingar kan göras:

1. Försumma all friktion, dels den när hjulen rullar och den som uppstår när skjutbanordningen glider på stängerna.
2. Antag att accelerationssträckan fortsätter hela vägen fram till kanten på plattan.



Länk till MATLAB-script för kontrollräkning.
Ladda ner samtliga filer och fyll i nödvändiga parametrar.
Observera vilka enheter som ska användas

Senast reviderad: 2022-05-12

Beräkning:

$$k = \frac{F}{\Delta s}$$

beräkna fjäderkonstanten med det lösa gummibandet, OBS tänk på hur kraften fördelas vid mätningen av fjäderkonstanten, det finns två gummiband i anordningen

Energisamband:

$$E_{pot0} = \frac{k \cdot r^2}{2} \quad \text{potentiell energi vid start av acceleration för ett gummiband}$$

$$E_{pot1} = F_g \cdot \sin \alpha \cdot r \quad \begin{array}{l} \text{där } r = \text{sträckning av gummibanden} \\ \text{potentiell energi vid ögonblicket bilen börjar flyga} \end{array}$$

Ställ upp energibalans där $E_k = E_{pot0} - E_{pot1}$ och utnyttja att $E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$

Kastparabel:

$$y(t) = v \cdot \sin \alpha \cdot t - \frac{g \cdot t^2}{2}$$

Ställ upp för $y(t)$ = höjd från kanten på plattan till golvet, tänk på var nollnivån ligger. Lös ut tiden t .

$$x(t) = v \cdot \cos \alpha \cdot t$$

Kulbana

Mekanik

Labbutrustning:

- moduler av kulbanan
- kulor
- våg
- måttband/lineal



Instruktioner:

1. Sätt ihop kulbanan efter önskad utformning på tavlan
2. Mät diametern på loopen
3. Väg kulan

Frågor:

1. Vilken hastighet måste kulan nå för att ta sig igenom loopen? Hur högt upp, relativt loopen, måste kulan starta för att nå denna hastighet?
2. Vad sker när två kulor kommer med fart från varsitt håll och kolliderar? Vad sker om den ena kulan var stillastående? Är respektive fall elastisk eller oelastisk?

Vänd för att läsa om teorin ➔

Kulbana

Mekanik

Teori:

Loop:

För att kulan ska klara loopen måste centripetalkraften och gravitationskraften vara samma vilket gör att man kan beräkna hastigheten som krävs och från hastigheten kan även höjdskillnaden härledas. Friktion bortses ifrån och kulans potentiella energi i viloläge antas omvandlas helt till kinetisk energi.

Stöt:

Vid stöt kommer rörelsemängden vara densamma före och efter så länge det inte appliceras en extern kraft. Även vid stöt bortses friktion och antaganden om att den potentiella energin helt omvandlas till kinetisk kvarstår.

Beräkning:

Loop:

$$F_c = \frac{mv^2}{r}$$

$$F_g = m \cdot g$$

$$F_c = F_g$$

$$\rightarrow v = \sqrt{r \cdot g}$$

$$E_p = m \cdot g \cdot h$$

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

$$E_p = E_k$$

$$\rightarrow h = \frac{1}{2} \cdot \frac{v^2}{g}$$

Stöt:

$$p = m \cdot v$$

$$m_1 v_1 - m_2 v_2 = (m_1 + m_2) \cdot v$$

om $v_2 = 0$:

$$v = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \cdot v_1$$

Senast reviderad: 2022-05-12

Masströghetsmoment

Mekanik

Labbutrustning:

- rigg med axel och hjul
- cylindrisk vikt
- vikt (20g och 50g) med lina
- tidtagarur eller kamera



Instruktioner:

1. Fäst den gängade vikten på axeln.
2. Linda linan med vikten runt det stora hjulet.
3. Släpp vikten och mät tiden det tar för hjulet att snurra ett varv.
4. Gör om utan den gängade vikten.

Frågor:

1. Kommer hastigheten på hjulet att ändras?
2. Om hastigheten ändras, vad beror det på?

Vänd för att läsa om teorin ➔

Masströghetsmoment

Mekanik

Teori:

Alla delar som rör sig runt axeln ger upphov till ett masströghetsmoment. Det är ett moment som måste övervinnas för att sätta kroppen i rörelse. Massan och kroppens storlek har betydelse. De delarna som måste tas hänsyn till är: axeln, hjulet och den stora massan. Hålet i massan och distansen och muttern kan försummas.

OBS:

1. Med massan m menas den gängade massan som ger upphov till ett masströghetsmoment. Med pålagda massan m_p menas den massa som fästs i linan och som ger upphov till en rörelse.
2. Vinkelhastigheten i slutet av varvet är maxhastigheten i experimentet, accelerationen är konstant.

Beräkning:

massan:	$m = 2 \text{ kg}$	$d = 98,8 \text{ mm}$
axeln:	$m = 0,933 \text{ kg}$	$d = 19,9 \text{ mm}$
stavar:	$m = 29,3 \text{ g}$	$l = 32,9 \text{ cm}$
fälg (tunnväggigt):	$m = 258 \text{ g}$	$d = 33,8 \text{ cm}$

Vinkelhastigheten i slutet av varvet:

$$\omega(J) = \sqrt{\frac{2m_p g h}{m_p R^2 + J}}$$

tid för ett varv: $t = \frac{2\pi}{\omega(J)}$

eller $t = \omega(J) \cdot \frac{I}{M}$

där $I = m_p \cdot R^2 + J$
 $M = m_p \cdot g \cdot R$

Tid	m_p	
massa	20 g	50 g
med	2,0 s	1,34 s
utan	1,8 s	1,19 s

Senast reviderad: 2022-05-12

