

## Studio i mekanik och hållfasthetslära

– utveckling av laborationer för förståelse av grundläggande principer och fenomen

### Kandidatarbete inom Tillämpad Mekanik

Simon Eliasson

Anna Jösok

Lars Nävert

Louise Sundbeck

Institutionen för Tillämpad mekanik

*Avdelningarna för Material- och Beräkningsmekanik och Dynamik*

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2013

Kandidatarbete 2013:13



# Studio i mekanik och hållfasthetslära

– utveckling av laborationer för förståelse av grundläggande principer och fenomen

## Kandidatarbete inom Tillämpad Mekanik

Simon Eliasson  
Anna Jösok  
Lars Nävert  
Louise Sundbeck

Institutionen för Tillämpad mekanik  
*Avdelningarna för Material- och Beräkningsmekanik och Dynamik*  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg, Sverige 2013

# Studio i mekanik och hållfasthetslära

– utveckling av laborationer för förståelse av grundläggande principer och fenomen

## Kandidatarbete inom Tillämpad Mekanik

Simon Eliasson  
Anna Jösok  
Lars Nävert  
Louise Sundbeck

Institutionen för Tillämpad mekanik  
*Avdelningarna för Material- och Beräkningsmekanik och Dynamik*  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg, Sverige 2013

Studio i mekanik och hållfasthetslära

– utveckling av laborationer för förståelse av grundläggande principer och fenomen

Kandidatarbete inom Tillämpad Mekanik

SIMON ELIASSON

ANNA JÖSOK

LARS NÄVERT

LOUISE SUNDBECK

© SIMON ELIASSON · ANNA JÖSOK · LARS NÄVERT · LOUISE SUNDBECK, 2013

Kandidatarbete 2013:13

ISSN 1654-4676

Institutionen för Tillämpad mekanik

Avdelningarna för Material- och Beräkningsmekanik och Dynamik

Chalmers tekniska högskola

SE-412 96 Göteborg

Sverige

Telefon: + 46 (0)31-772 1000

Omslag:

Exempel på framtagen demonstrations materiel

Tryckeri/Institutionen för Tillämpad mekanik

Göteborg, Sverige 2013



## Abstract

A studio in Engineering Mechanics and Solid Mechanics is created for educational purposes at Chalmers University of Technology. The studio will be used as a supplement to regular education. Students in groups will investigate, study, analyze and reflect upon the phenomena that the experiments in the studio will illustrate. The studio will also serve as storage space for lecture material.

Studies of the objectives for the courses in Engineering Mechanics and Solid Mechanics, in programs for Mechanical Engineering and Civil Engineering were analyzed. From these objectives, together with results from an initial study and guidelines for the design, the studio was produced. The initial study consisted of an educational literature study and three inspirational visits. Idea generation and selection methods have been used to generate experiments and these have been developed in more detail. A lot of experiments already existed and these have been reworked and improved. Experiments used for demonstration, particularly during lectures, have been improved with the aim to increase the clearness and make the experiments easier to see even from a distance.

A dozen experiments have been made with associated manuals. In the manuals there is a task, a description and a proposed solution. The manuals are produced based on theories that were encountered during the initial study.

The studio room was designed with furniture so that several smaller groups of students could work together. Even room for further work and expanding of the studio has been considered. The hope is that similar projects will further develop the studio with more experiments and illustrations.

This report can serve as inspiration and basis for similar studios that will be designed to teaching and learning.

## Sammanfattning

En studio i mekanik och hållfasthetslära har skapats i undervisningssyfte på Chalmers tekniska högskola. Studion kommer att användas som ett komplement till ordinarie undervisning. Där kommer studenter i grupper att undersöka, studera, analysera och reflektera över de fenomen som experimenten i studion illustrerar. Lokalen kommer också att fungera som förvaringsutrymme för föreläsningmateriel.

Genom studier av kursmålen för kurserna inom mekanik och hållfasthetslära på civilingenjörsprogrammen för Maskinteknik och Väg- och vattenbyggnad har, tillsammans med resultat från en förstudie, riktlinjer för utformning av studion tagits fram. Förstudien bestod dels av en litteraturstudie om pedagogik och dels tre stycken inspirations- och studiebesök. Idégenerering och urvalsmetoder har används för att generera experiment och dessa idéer har sedan kunnat utvecklas mer detaljerat. En hel del experiment fanns sedan tidigare och dessa har återanvänts och förbättrats. Experiment som används för demonstration under framför allt föreläsningar har förbättrats med målet att öka tydligheten och göra experimenten enklare att se även från långt avstånd.

Ett tiotal experiment har tillverkats med tillhörande manualer. I manualerna finns en problemställning, en beskrivning och ett lösningsförslag. Manualerna är framtagna utifrån teorier som påträffades under förstudien.

Studios lokal har utformats med möbler anpassat för att flera mindre grupper ska kunna arbeta samtidigt. Även utrymme för vidarearbete och expandering av studion har beaktats. Förhoppningen finns att liknande projekt ska vidareutveckla studion med fler experiment och illustrationer.

Denna rapport kan tjäna som inspiration och underlag när liknande studios ska utformas med direkt koppling till undervisning och lärande.



## Innehållsförteckning

Abstract.....	1
Sammanfattning.....	2
1 Bakgrund.....	5
2 Syfte.....	5
3 Projektets utgångspunkt .....	5
4 Metod .....	6
4.1 CDIO .....	6
4.2 Kursmål .....	6
4.3 Pedagogik .....	7
4.4 Inspirations- och studiebesök.....	7
4.5 Experimentgenerering .....	9
4.5.1 Mekanik .....	10
4.5.2 Hållfasthetslära .....	11
4.6 Tillverkningsprocess.....	12
4.7 Framtagning av manualer .....	14
4.8 Utvärdering av studion .....	15
4.9 Utformning av lokalen.....	17
5 Resultat.....	18
5.1 Experiment i studion.....	18
5.1.1 Låda för att illustrera linkrafter .....	19
5.1.2 Spänningsoptik .....	20
5.1.3 Flytta moment .....	22
5.1.4 Gemensam tyngdpunkt.....	22
5.1.5 Stabilitetsmodell.....	23
5.1.6 Euler's knäckfall.....	24
5.1.7 Förflyttning av last på balk .....	25
5.1.8 Nedböjning.....	26
5.1.9 Betongbalk med armeringsjärn .....	26
5.2 Implementering av CDIO .....	27
5.3 Lokal och upplägg .....	28
6 Diskussion och rekommendationer till framtida projekt.....	28
7 Referenser .....	29

Bilaga A – Lärandemål

Bilaga B – Manualer med lösningsförslag

# 1 Bakgrund

Mekanik och hållfasthetslära är centrala och grundläggande vetenskaper inom ingenjörsutbildningar på universitetsnivå inom maskinteknik och samhällsbyggnad. Mycket av dagens samhälle byggs och utvecklas kring dessa kunskaper. Därför är det viktigt att, genom rätt pedagogik, kunna ge studenterna djup förståelse och att skapa nyfikenhet kring mekanik och mekaniska fenomen. Fysiska exempel som används som ett komplement till teori och beräkningar ger i regel en bra visualiserad bild och en känsla för vad som händer och för hur olika fenomen kan förklaras.

## 2 Syfte

Projektet syftar till att utforma en studio för kurser i mekanik och hållfasthetslära för studenter vid Chalmers tekniska högskola. Studion ska utformas med exempel och experiment inom statik, hållfasthetslära och dynamik där studenterna själva kan tänka ut lösningar och sedan testa sina hypoteser. Kurserna<sup>1</sup>, som projektet anknuter till, läses under grundutbildningen på civilingenjörsprogrammen för Maskinteknik och Väg- och vattenbyggnad och studion syftar till att komplettera den övriga undervisningen.

## 3 Projektets utgångspunkt

Utformningen av experimenten sker med utgångspunkt från kursmålen i respektive kurser, se bilaga A. En noggrann genomgång av dessa ger en bred grund för utformningen av projektet. Idéer till experiment utformas utifrån kursmålen. Parallellt görs en studie som syftar till att experimenten och studion utformas rätt ur ett pedagogiskt perspektiv, vilket bidrar till en djupare förståelse.

Från förstudien av kursmål och pedagogik kan koncept genereras. Relevansen av de genererade experimenten måste fastställas och vidareutvecklas innan tillverkningen startar.

Projektet syftar även till att förbättra äldre, redan existerande experiment. En inventering av dessa måste göras och även idégenerering för förbättringar.

Till varje experiment ska tillhörande manualer utvecklas. Manualerna ska användas under laborationen som ett stöd för användaren och innehålla beskrivning av utrustningen, uppgiften och målet. Manualerna ska utformas enligt den pedagogiska förstudien för att uppnå största möjliga förståelse. Utformningen av uppgiften måste vara tydlig så att studenten enkelt ska kunna sätta sig in i problemet. Dessutom får uppgifterna varken vara för svåra eller för lätta utan de måste hålla rätt svårighetsnivå. Detta för att studenterna ska kunna se laborationerna som utmanande men inte omöjliga.

Experimentstudion kommer att vara belägen i maskinhusets källare vid *Vibrations and smart structures lab*. Att utföra aktiviteter i studion kommer att vara undervisningsmoment i de berörda kurserna. Lokalen passar ändamålet väl och ska inredas på ett funktionellt sätt. Experimenten

---

<sup>1</sup> MTM021-Statik- och hållfasthetslära, MTM026-Hållfasthetslära, TME031-Mekanik - dynamik, MME180-Mekanik, VSM031-Hållfasthetslära

ska i möjligaste mån vara portabla för att kunna medföras till föreläsningar för att demonstrera fenomen. Metoden för uppbyggnaden av studion dokumenteras för en framtida utveckling men även som en processbeskrivning för att andra institutioner ska kunna skapa liknande utställningar, kopplade till sina ämnesområden.

Uppbyggnaden av studion har en budget på 42 000 kr, vilket kommer från anslag av Väg- och vattenbyggnadsprogrammet och från ett generellt anslag till alla kandidatarbeten.

## 4 Metod

### 4.1 CDIO

Arbetet har genomförts efter ett tillvägagångssätt som kallas *CDIO*, vilket är en arbetsmetod som lärs ut till blivande ingenjörer. *CDIO* står för *Conceive – Implement – Design - Operate* och är framtagen av ledande tekniska universitet från bland annat USA, Europa och Kanada. Arbetsmetoden går ut på att blivande ingenjörer ska lära sig att förstå, designa, implementera och använda komplexa maskiner eller produkter som har något att tillföra för ingenjören eller en kund [1].

I detta projekt har alla dessa steg använts i framtagningen av de olika experimenten. Först gjordes en brainstorming för att generera idéer till experiment (*conceive*). Där efter gjordes skisser av olika förädlingsgrad för att vidareutveckla koncepten (*design*). Under framställningen av experimenten användes olika tillverkningsmetoder (*implement*) och till sist ska experimenten användas av studenter som läser grundkurser i mekanik och hållfasthetslära på Chalmers tekniska högskola (*operate*) [2].

### 4.2 Kursmål

Utgångspunkten för studion var kurserna i mekanik och hållfasthetslära vid Chalmers tekniska högskola. Därför gjordes en förstudie som syftade till att sammanställa de olika tänkbara ämnesområden som kunde behandlas, med koppling till dessa kurser. Förstudien utfördes främst genom granskning av de olika kursernas lärandemål. Valet av kurser som skulle behandlas begränsades till de kurser som ingår i Maskinteknik- och Väg- och vattenbyggnadsprogrammen. Se bilaga A för en lista av de olika kursmålen.

Efter en sammanställning av de gemensamma kursmålen delades de in i tre olika kunskapskategorierna: Statik, Dynamik och Hållfasthetslära. Eftersom gruppmedlemmarna i projektet har läst kurserna kunde den egna erfarenheten också användas genom att reflektera över vilka problem och svårigheter som upplevdes under kursernas gång. Kortare diskussioner med medstudenter gjordes också för att få ytterligare synpunkter.

### **4.3 Pedagogik**

För att studion skulle utformas rätt ur ett pedagogiskt perspektiv krävdes även en förstudie om pedagogik. Denna gjordes genom granskning av den forskning och de undersökningar som fanns att tillgå inom ämnet. Detta gjordes genom sökning kring området på internet och en mindre litteraturstudie på biblioteket Pedagogien, tillhörande Göteborgs Universitet. Utformningen av både experimenten och de tillhörande manualerna har sedan präglats av förstudien. Den pedagogiska studien gav flera användbara teorier. Dessa kunde tillämpas för utformandet av manualerna samt utformningen av övningarna och experimenten.

Uppgifternas utformande måste vara utmanande för användaren samtidigt som de inte bör uppfattas som för svåra. De bör även bygga på tidigare kunskaper inom ämnet för att studenterna ska kunna ta till sig uppgiftstypen och problemlösningen på bästa sätt [3]. Problemlösning utvecklar lärandet och är alltså en effektiv metod till ökad förståelse.

En tillämpning av detta kan vara att utforma experimenten så att studenten "får lista ut det själv". Vikten av detta styrks av Elmgren och Henriksson [5] som menar att det troligen blir lättare att överföra kunskapen till yrkesmässiga förhållanden vid problembaserat lärande. Det innebär därför en bättre komplettering till teorin än en ren beräkningsuppgift.

Mycket av den övriga undervisningen inom dessa ämnen är teoretiska men Patricia Benner [4] har utifrån forskningsredovisning analyserat utvecklings- och kompetensstadier och menar att teori och praktik är ömsesidigt beroende av varandra och krävs för expertkunskap.

Det är viktigt att studenterna tydligt ser en direkt koppling mellan uppgifterna och kursmålen. Om den länkningen inte fungerar så blir det praktiska målet för studenterna att blir klara [5]. "Först färdig vinner och får gå hem!" blir då metoden och det är oftast inte vad som eftersträvas. Detta är viktigt att tänka på vid utveckling av de manualer som ska leda studenterna igenom arbetet.

### **4.4 Inspirations- och studiebesök**

Akustikstudion och Fysikaliska leksaker på Chalmers tekniska högskola samt Universeum besöktes relativt tidigt under projektet för att få inspiration i utvecklingsarbetet.

Akustikstudion är placerad i A-studion på Chalmers. Studion är uppbyggd under ett examensarbete av bland andra Emma Gjers, student på Arkitektur och teknik. Under besöket visades studion och tips gavs om framförallt utformning av lokal och uppgifter. Viktigt att tänka på är att studion ska användas som ett komplement till undervisningen och måste utformas därefter. Gruppstorleken ska vara anpassad efter lokalen och för stora grupper bör undvikas.

Akustikstudion var utformad för stora och tidskrävande laborationsuppgifter. All information var bunden till datorer vilket passar för ändamålet men även kräver lång uppstartstid. I studion för mekanik och hållfasthetslära bör inte all information enbart vara bunden till datorer på detta sätt utan även finnas utskrivet. De fysiska manualerna underlättar för studenten att själv börja arbeta

utan uppstart av lärare. Därför kommer alla manualer att finnas både digitalt och fysiskt utskrivet på papper i studion.

Fysikaliska leksaker är en verksamhet som riktar sig till i stort sett alla målgrupper. Syftet är att visa upp fysikaliska fenomen som existerar i vardagen och samtidigt väcka intresse för teknik och naturvetenskap [6]. Verksamheten drivs av Per-Olof Nilsson, professor emeritus i teknisk fysik, och består av ca 300 experiment. De flesta experimenten är utformade så att de ska gå att återskapa hemma i köket utan att behöva någon specialutrustning.

Under besöken hos Fysikaliska leksaker förklarades vikten för inläringen genom stimulering av så många sinnen som möjligt. De finns, enligt grundaren av verksamheten Per-Olof Nilsson, tolv sinnen som är bra att ha i åtanke under utformningen av experimenten. Dessa tolv är enligt den antroposofiska sinnesläran: hörsel, syn, smak, lukt, känsel, värme, ord, jämvikt, rörelse men också sinnen för tanke, liv och jag.

Experimenten har olika svårighetsnivåer för att passa alla typer av besökare. Manualer bör placeras så att lösningen inte syns direkt. På Fysikaliska leksaker användes laminerade informationsblad med lösning och beskrivning av experimentet på baksidan som fästes i pärmringar. På så sätt måste utövaren vända på pappret för att se lösningen som sedan täcks automatiskt igen när pappret åter hängs tillräta. Detta verkar vara ett koncept som fungerar väldigt bra.

Informationsbladen bestod av beskrivande bilder och uppfattades som lättlästa tack vare utformningen med frågeställning på framsidan och lösning på baksidan. Att deras manualer hade relativt lite text leder till att användaren snabbt tar till sig informationen och lyckas hålla intresset uppe. Om dess innehåll bestått av enbart mycket text finns risken att användaren skulle strunta i att läsa helt.

På sättet som Fysikaliska leksaker lyckas fånga besökarens intresse och göra fysikaliska grundlagar till roliga experiment är fascinerande. Detta kommer även eftersträvas under skapandet av Studion för mekanik och hållfasthetslära.

Ett besök gjordes även på Universeum i syfte att få inspiration om utformningen av experimenten, men även för att få goda råd kring upplägget av arbetet. Studiebesöket bestod av en rundvandring inne i Universeum och ett möte, båda tillsammans med projektledaren Doktor Håkan Sigurdsson.

Besöket på Universeum bidrog till många användbara tips och idéer. Det viktigaste, som kommer att tillämpas i studion, handlar om utformningen av experimenten för att kunna engagera utövaren. Håkan Sigurdsson hade flera användbara tankar och metoder för detta. Enligt hans egna erfarenheter uppskattas det när en uppgift involverar en persons sinnen på så många sätt som möjligt. Ett exempel på detta är att använda sin kropp som massa istället för en annan dito.

Han berättade om en av deras montrar med en mätutrustning. Denna utrustning användes för att mäta besökarens längd med hjälp av en lasermätare ifrån taket. För att göra detta var det ofta lång kö, med personer i alla åldrar, trots att uppgiften bestod av att stå still och att de flesta antagligen redan visste sin längd. Anledningen till den långa kön var att aktiviteten engagerade användaren, både som ett verktyg (kroppen) och som ett resultat.

Ett annat enkelt sätt att engagera, förklarade han, var genom tävlingsmoment. Genom att skapa ett tävlingsmoment som är mätbart uppmuntras bättre prestationer, både för att lyckas bättre än sig själv och andra. Detta kan tillämpas på de experiment där det finns många typer av lösningar. Tävligen kan mätas på olika sätt, t.ex. på tid eller bäst möjliga lösning, teoretiskt eller enligt test. Universeums målgrupp är barn men oberoende av ålder är detta ett bra sätt att engagera och skapa en mer positiv upplevelse kring lärande. Experimentets karaktär kan senare riktas åt olika åldrar.

Ett bra sätt att lyckas engagera människor med olika kunskapsnivå är att blanda experiment med tanke på svårighetsgrad, komplexitet och hur mycket personen involveras. I vilken ordning experimenten ska utföras kan bland annat anpassas efter detta. Experimenten bör placeras så att aktiveringen hos utövaren varierar. Då typerna av experiment varierar kan effekten förstärkas genom att blanda mer teoretiska lösningsexperiment med experiment där kroppen används.

En fungerande metod för att skapa vidare intresse och djupare förståelse menade Håkan Sigurdsson var att ha en tydlig och rolig koppling till vardagslivet. Detta ger en intuitiv förförståelse och genom att hänvisa ett fenomenens existens i vardagen kommer utövaren bli påmind om fenomenet även efter experimentet och därmed ökar förståelsen och intresset ytterligare. Detta är tillämpligt på de teoretiska manualer som finns till varje enskilt experiment i studion.

#### **4.5 Experimentgenerering**

Med förstudien kring kursområden som grund började en idégenerering kring olika experiment och uppgifter. Detta gjordes främst genom sökning på internet men även med hjälp av egna och andras tankar och erfarenheter. Sökningarna bestod till stor del av olika experimentsidor men även av vad andra skolor gjort och flera experiment med relevant teori hittades.

Ofta anpassades experimenten för barn vilket försvårade sökningen då de teorier som studion skulle behandla var på högskolenivå. Men alla experiment, oberoende av målgrupp, har en teoretisk grund och uppgiften kan sedan anpassas efter önskad svårighetsgrad.

Samtidigt som experimentgenereringen pågick skedde en inventering av befintligt illustrationsmateriel på de olika institutionerna. Av det befintliga materialet var endast några fungerande, andra i behov av förbättring/lagning och många var svåra att förstå syftet med. Därför har manualer framtagits för att kunna ge en tydlig bild av problemställningen.

När idégenereringen var klar strukturerades experimenten upp i kunskapskategorierna: Statik, Dynamik och Hållfasthetslära.

### 4.5.1 Mekanik

Nedan redogörs och förklaras de idéer som genererades.

## Statik

### *Stöd krafter*

Två vågar och en plankan används och utslaget på vågarna visar hur stöd krafterna ändras då lasten flyttas till olika positioner på plankan.

### *Moment*

Experimentet visar att ett rent moment kan förflyttas längsmed en linje. Det finns ett färdigt experiment på institutionen för Tillämpad mekanik så när som på att en momentnyckel måste förbättras. Att göra experimentet mer synligt från avstånd vore också bra.

### *Friktion*

Ett glidplan tillsammans med klossar av olika material används för att testa och beräkna antingen friktionstal eller vinkel för glidning. Både vilofriktion och glidfriktion ska demonstreras.

### *Kraft på liten yta*

Detta experiment illustrerar hur stor inverkan tryckfördelning har med hjälp av en ballong och massvis med spikar. Ballongen kan pressas ihop innan den spricker om trycket fördelas jämt över en yta jämfört med om endast en punkt blir belastad av kraften.

### *Linkrafter*

För att illustrera linkrafter ska det byggas en låda innehållande block som skapar en utväxling vilket ger möjlighet till att lyfta sig själv.

### *Komposantuppdelning*

En låda med tre lampor i olika färger visar komposantuppdelning av en vektor genom att projicera vektorn på tre ytor och därmed få x-, y- och z-komposanternas.

### *Tyngdpunkt och masscentrum*

Två olika experiment är tänkta här. Det första har x antal lika stora klossar med vilka man ska bygga en "balkong" ut från ett bord och beräkna hur långt utanför bordet man kan bygga utan att balkongen välter. I nästa experiment används en kloss som står på ett plan där tyngdpunkten mäts ut med ett lod. När man lutar planet så att lodlinjen från tyngdpunkten hamnar utanför basen välter klossen.

---

## Dynamik

### *Lagen om rörelsemängdens bevarande*

Newton's vagga används med kulor av samma storlek men olika massa för att göra experimentet lite svårare.

### *Newton's lagar/Kinetisk- & potentiell energi, arbete och samband mellan dessa*

Ett experiment med en kulbana ska demonstrera detta. Innan man släpper kulan har den bara potentiell energi som sedan övergår till rörelseenergi för att sedan återgå till potentiell energi igen.



### ***Masströghetsmoment och Steinerssats***

Tanken är att ha en cylinder med flera genomgående hål där en axel kan monteras och på detta sätt illustrera masströghetsmoment genom att rotera kroppen i de olika fallen. Masströghetsmomentet är litet om man roterar kring cylinderns tyngdpunkt och större om rotationsaxeln förflyttas från tyngdpunkten etc.

### ***Rörelsemängdsmoment***

Experimentet visas av en roterande massa som ökar i varvtal då massan flyttas mot centrum.

---

## **4.5.2 Hållfasthetslära**

### ***Spänningskoncentrationer och sprickor***

Med hjälp av polykarbonat och polariserat ljus kan spänningar i olika geometrier visas. Önskvärt vore att även kunna binda samman detta med Paris lag. De olika geometrierna bör vara behandlade i FEM, antingen utskrivet i förväg som ett facit eller genom att arbeta direkt mot programmet.

### ***Yttröghetsmoment och E-modul***

Flera balkar med samma area fast olika tvärsnitt och av olika material ska användas för att beräkna yttröghetsmoment och E-modul.

### ***Euler's knäckfall***

Det finns redan en illustrationsmodell för Euler's knäckfall på institutionen för Tillämpad mekanik som illustrerar de olika fallen mycket bra. Denna ska bara förtydligas med symboler samt rustas upp, allt för att även de bakre raderna i klassrummet ska kunna se.

### ***Huvudspänningar***

Ett datorprogram kan användas för att illustrera huvudspänningar.

### ***Vridcentrum***

Gummi-C-balken används och genom att hänga vikter i olika punkter hittas och demonstreras vridcentrum. Det finns redan en modell av detta på institutionen för Tillämpad mekanik.

### ***Snittkrafter, snittmoment, normalspänning och skjvuspänning***

En balk med en mjuk led kan visa snittkrafter och snittmoment.

### ***Fackverk***

Fackverk uppfattas ofta som kluriga. Målet med uppgiften är att visa hur reaktionskrafterna balanserar varandra. Detta visas i datorprogram och eventuellt med fysiskt experiment.

---

Idégenereringen ledde till fler experiment än vad som var rimligt att hinna skapa under projekttiden. Därför gjordes en rangordnande prioritering av de möjliga experimenten. Inom de olika kategorierna (statik, dynamik och hållfasthetslära) skedde denna utvärdering med hjälp av en Pugh-matris, se figur 1. Matrisen syftar till, att genom vägning av olika faktorer, kunna lista relevansen för de olika experimenten. De faktorer som användes vid utvärderingen var *roligt*, *relevans* och *genomförbarhet*.

Statik				
	Roligt	Relevans	Genomförbarhet	Summa
Stödkrafter	2	3	3	8
Moment och flytt av moment	1	3	3	7
Friktion	2	2	3	7
Kraft på liten yta	3	1	3	7
Linkrafter	3	2	2	7
Komponenter förflyttning	1	3	2	6
Tyngdpunkt och masscentrum	2	1	3	6
Fackverk	1	2	1	4
Dynamik				
	Roligt	Relevans	Genomförbarhet	
Stöt/bevarande av rörelsemängd	3	2	3	8
Newton kinetiskt potentiell arbete	2	3	2	7
Masströghetsmoment Steinerssats	2	1	3	6
Rörelsemängdsmoment	2	2	2	6
Hållfasthet				
	Roligt	Relevans	Genomförbarhet	
Spänningskoncentrationer och sprickor	3	2	3	8
Yttröghetsmoment-E-modul	2	3	2	7
Euler's knäckfall	1	3	2	6
Vridcentrum	2	1	3	6
Snittkrafter moment, tvärkraft, normalkraft	1	3	1	5

Figur 1 Pugh-matris

För varje experiment utvärderades de olika parametrarna med poäng 1, 2 eller 3. **Roligt** beskriver hur positivt användaren skulle uppfatta det enskilda experimentet. Med **relevans** utvärderades hur de olika kursmålen uppnåddes och hur viktiga dessa var för kurserna. Angående **genomförbarhet** togs tillverkning i beaktning. Övriga avgränsningar så som kostnad, storlek och egenskaper hos materialen beaktades också under denna parameter.

Utifrån delpoängen sammanställdes Pugh-matrisen och tillverkningen av experimenten kunde starta. Experimenten med högst poäng skulle prioriteras först. De experiment som inte framtoogs under projektiden kan användas för en vidareutveckling av studien. Ytterligare experiment har senare tillkommit då de efterfrågats.

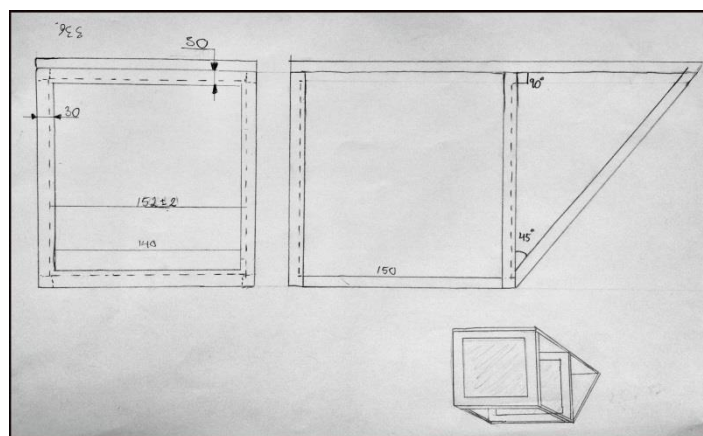
#### 4.6 Tillverkningsprocess

En stor del av projektet bestod av att bygga nya experiment och förbättra äldre. För varje experiment har gruppen diskuterat utformning och användning för att sedan skapa en enklare skiss inför tillverkningen. Ett urval av dessa skisser kan ses i figur 2-4. Arbetet gjordes i Prototypverkstaden som ligger i maskinhusets källare och som varit tillgänglig för bland annat kandidatarbeten. Personalen i Prototypverkstaden har varit till stor hjälp. Genom diskussioner kring skisserna erhöles rekommendationer och förslag för tillverkningen.

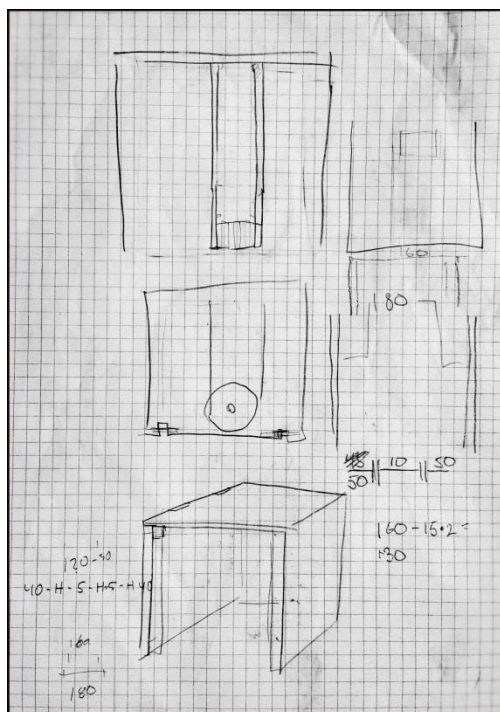
Materialvalen gjordes genom att testa och undersöka de material som fanns att tillgå i verkstaden. En del produkter och material har även inhandlats.

Vid tillverkningen av de olika experimenten fördelades arbetet i gruppen beroende på experimentens omfattning. Oftast skedde utformningen av många experiment parallellt.

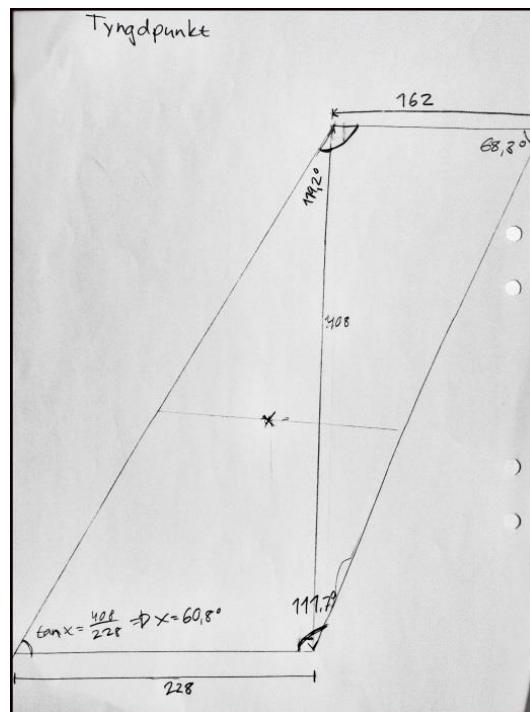
Flera färdiga experiment fanns sedan tidigare på institutionen. Vissa av dessa har förbättrats med utgångspunkt från de pedagogiska teorier som ansågs relevanta. Ett önskemål var att experiment skulle kunna användas i samband med föreläsningar, vilket togs hänsyn till då det var möjligt och i de fall där det kändes betydelsefullt. För detta ändamål krävs det att experimenten utformas så att de kan uppfattas på längre avstånd eftersom att föreläsningssalarna är stora och rymmer cirka 200 personer.



Figur 2. Ritning till spänningsoptik



Figur 3. Skiss över lådan till linkrafter



Figur 4. Skiss över Stabilitetsmodellen

#### **4.7 Framtagning av manualer**

Manualer utformades för varje experiment och ska förklara problemställningen och leda användaren under laborationen. Vid skapandet av dessa tillämpades de pedagogiska teorierna från förstudierna. Alla manualer tillverkades därefter utifrån samma mall, gjord i Powerpoint, för att få en enhetlig känsla i studion. På första layouten var uppgiften utskrivnen liggandes på pappret. På baksidan presenterades lösningen, även den liggandes, på samma sätt som på Fysikaliska leksaker.

Nedan förklaras innehållet till manualerna samt en kort motivering ur ett pedagogiskt perspektiv.

##### *Koppling till vardagen*

På varje manual ska en bild av något vardagligt användningsområde presenteras tillsammans med en kort beskrivning. Bilden ska ha en koppling till experimentet och på så sätt kommer användaren påminnas om experimentet senare i vardagslivet. Detta kan innebära ökat intresse och djupare förståelse även efter experimentet. Håkan Sigurdsson berättade att denna effekt eftersträvas på Universeum. Att använda just bilder är bra då vi människor har en förmåga att enkelt minnas dem. Detta är förknippat med vikten av att använda olika sinnen vid inläring som Per-Olof Nilsson på Fysikaliska Leksaker poängterade.

##### *Lärandemål*

Här ska de kursmål som behandlas i experimentet redovisas. Genom att presentera ett fåtal kursmål på manualerna förväntas kopplingen mellan experimentet och kursen öka. Vikten av att denna koppling är tydlig redogörs i förstudien om pedagogik och är avgörande för att öka användarens motivation och engagemang.

##### *Utförande*

Under denna rubrik presenteras själva problemställningen. Denna kan variera beroende på typ av experiment. Som regel ska en presentation av labbutrustningen samt en bild på experimentet visas. Detta för att enkelt förstå vilken manual som tillhör vilket experiment. På detta sätt kommer experimenten inte bli stående på grund av bristande kunskap om hur de bör användas, som många andra av de tidigare experimenten.

Uppgiften ska vara tydlig och innehålla den teori som krävs. En del av uppgifterna kommer bestå av en mindre utförlig beskrivning och syftar istället till att studenten själv får testa olika typer av metoder för att komma fram till en lösning. Denna metod utvecklar problemlösningsförmågan och enligt den pedagogiska förstudien ger detta studenten både motivation och utmaning.

##### *Lösning*

I första utkastet till manualen presenteras lösningen på baksidan av dokumentet. Tydliga beräkningar med friläggningar redovisas under lösningsgången. Beroende på uppgiftstypen kan en kortare allmän sammanfattning och slutsats för teorin även redovisas.

Alla manualer har inte en tydlig lösning utan kan bestå av ledtrådar så att studenten själv ska kunna lösa uppgiften.

Eventuella felkällor tas även upp om det finns relevans för det.

##### *Koppling till kursen*

För att koppla experimentet under laborationen till arbetet i kursen kan en typuppgift från kursen redovisas. Återkoppling är viktigt och även detta bekräftas av den pedagogiska förstudien. Meningen är inte att lösa denna uppgift utan bara att observera den och eventuellt följa

uträkningen. Målet med detta är att studenten ska känna igen uppgiften när beräkningar i kursen ska göras och på så sätt förstå uppgiften genom koppling till experimentet.

#### **4.8 Utvärdering av studion**

För att kunna göra en konstruktiv utvärdering av studion innan den färdigställdes togs två teststudenter in som hjälp. Under testet var experimenten och manualerna nästan klara. Fokus låg i att undersöka förståelsen av uppgifterna, hur experimenten ska användas fysiskt och hur tydliga manualerna var att följa. Testet bestod av att iakta testpersonerna för att se hur de utförde uppgifterna och vidare diskutera detta med dem. Bra konstruktiv kritik erhöles och vidare förbättring möjliggjordes.

Testpersonerna hade vissa problem med experimentens olika komponenter och hur de skulle användas. Detta underströk behovet av en tydligare beskrivning i manualerna. Vissa uppgifter uppfattades även som för svåra eller tidskrävande och behöver göras om.

Något som uppmärksammades var att vissa av lösningarna var svårbegripliga, vilket kunde kopplas till utformningen. Detta grundades i att manualerna var utformade med en liggande fram- och baksida. Eftersom arket var liggandes blev det inget naturligt flöde i lösningsgången. Denna utformning begränsade även lösningen till en sida och helhetsintrycket blev för mycket information på för liten yta.

Manualerna förbättrades genom att ha lösningen på ett eller flera separata och stående ark. En ytterligare anledning att separera problemställning och lösningsförslag till två olika ark grundar sig i att experimenten inte har en permanent placering. Utan permanent placering möjliggörs inte upphängning av manualerna på väggen enligt samma princip som används på Fysikaliska leksaker. Eftersom inte upphängningen av manualerna var möjlig skulle risken vara stor att studenterna ofrivilligt ser lösningen före uppgiften.

Eftersom manualerna innehåller relativt mycket information är det viktigt att läsaren fokuserar på de mest relevanta, i detta fall utförandet. Testpersonerna konstaterade att de hade problem med just detta. Därför ändrades layouten på texten så att uppgiftsdelen fick större plats och större teckenstorlek.

Ett exempel på en slutgiltig manual visas i figur 5. De övriga manualerna går att se i bilaga B. Alla manualer är utformade utifrån metoden i avsnittet 4.6 och den respons som teststudenterna gav.

### Labbutrustning:

2 badrumsvågar  
2 stöd  
Måttband och bräda

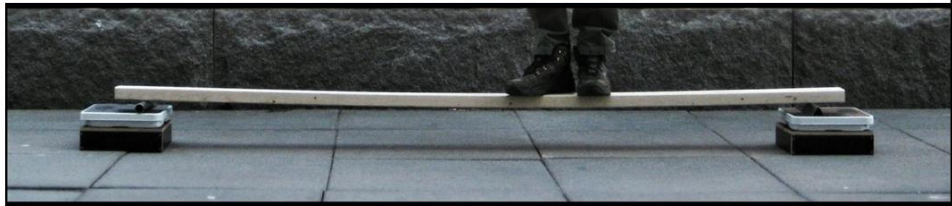


Säckkärna implementerar principen för förflyttning av last. Vikten är placerad nära stödhjulet samtidigt som handtagen ligger längre ifrån lasten.

#### Lärandemål:

- Frilägga materiella system, ställa upp jämviktsekvationer och lösa dessa

## #2 Förflyttning av last på balk

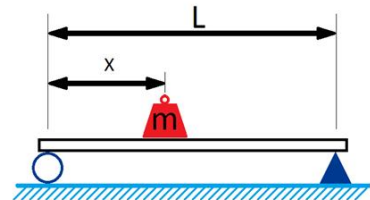


### Syfte:

Att förstå hur stödkrafterna ändras beroende på positionen av last på en balk.

### Uppgifter:

- Börja med att mäta ut längden mellan stöden.
- Gör exempelvis 4-5 mätningar där du står på olika positioner på balken (stå inte för nära rullstödet för då kan balken bli ostabil och börja rulla)
- Skriv ner resultaten i en tabell och illustrera sedan dessa för båda reaktionskrafterna i exempelvis en graf
- Uttryck resultaten i en formel eller ett samband som visar hur reaktionskrafterna beror på placeringen av lasten



Position	Ra	Rb
0,4m	38 x g	...
0,5m	...	...
0,75m	...	...

Exempel på tabell med värden

Figur 5. Exempel på layout för manual

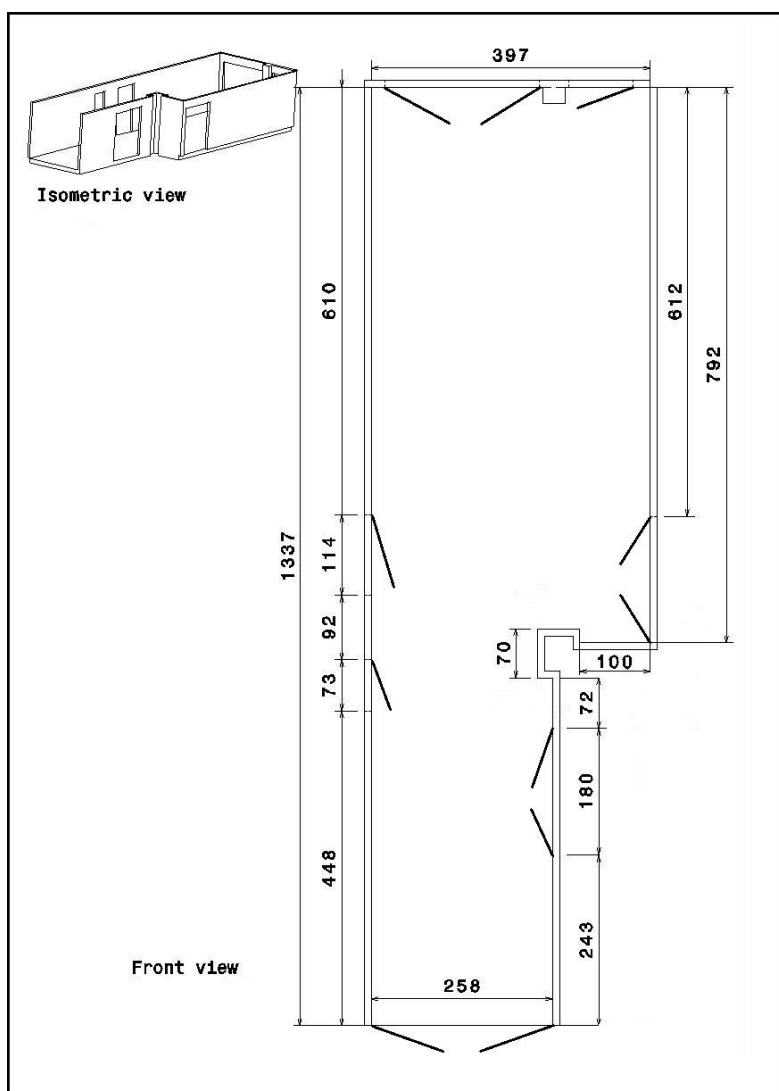
#### 4.9 Utformning av lokalen

Parallellt med framställningen av experiment gjordes en plan för inredningen av själva lokalen. Beroende på experimentens storlek och användning skulle rummet anpassas. Hyllor, bänkar och eventuellt datorer kan komma att behövas allt eftersom studion växer.

Laborationslokalen ligger i källaren i maskinhuset, samma lokal som *Vibration and smart structures lab*. För att enklast kunna planera rummet skapades en planlösning av rummet i CAD-programmet CATIA V5 som kan ses i figur 6.

Med denna arbetsmetod kan olika inredningsalternativ enkelt testas virtuellt. 3D-vyn ger en tydlig överblick över rummet.

Målet är att det ska finnas olika arbetsstationer så att tre mindre grupper kan arbeta i studion samtidigt. Belysningen i rummet behöver förbättras genom fler armaturer. Rummet behöver förvaringsplats och arbetsyta för de olika experimenten. Det är även viktigt att planera studion så att det finns extra plats för framtida experiment. Angående inredning och möblemang finns ett antal restriktioner. Begränsningarna gäller möbelleverantörer, befintlig design och säkerhet.



Figur 6. Plan av lokalen

## 5 Resultat

### 5.1 Experiment i studion

Genom den studien om pedagogik undersöktes vikten av att använda experiment tillsammans med problembaserat lärande i undervisningen och teorier kring detta utvärderades. Inspirations- och studiebesöken bidrog framför allt med ökad kunskap och inspiration om upplägg och utformning av experimenten. Resultaten från den pedagogiska studien tillsammans med studiebesök ledde fram till de nio slutgiltiga experimenten. Vid tillverkning av de nya experimenten har dessa teorier speglat hela tillverkningsprocessen, allt från design till funktion. De redan existerande experimenten har förbättrats enligt de framtagna riktlinjerna i största möjliga mån. Nedan visas de genererade experimenten, de flesta är nytillverkade medan två experiment är förbättrade. Manualer till samtliga experiment går att se i bilaga B.



### 5.1.1 Låda för att illustrera linkrafter

Lådan där man kan lyfta sig själv är tänkt att vara ett roligt experiment, samtidigt som den illustrerar linkrafter och hur man kan tjäna in på kraft i utbyte mot att linan måste dras en längre sträcka. Studenten ska stå på lådan och dra i linan och på så sätt lyfts övre delen av lådan och personen förflyttas uppåt, se figur 7 och 8. Kraften som går åt mäts av en dynamometer som sitter i handtaget.

Lådan är uppbyggd av en bottenstomme med två linhjul och en toppstomme med tre linhjul. I stommen är även styrning inbyggd så att övre delen av lådan bara åker uppåt och nedåt när man drar i linan och inte roterar eller flyttar sig i sidled. Fyrkantsplåtar har fästs med trekantiga stag för bättre styvhet och stabilitet. I änden av både den övre och den undre ställningen går axlar där mässingshjul är fästa för styrning. I mitten av vardera axeln sitter tre respektive två linhjul med kullager för att minimera friktionen.

Med den uppställning av linhjul som finns i lådan så krävs en kraft motsvarande en femtedel av personens massa för att kunna lyfta personen uppåt. Om en bredvidstående person drar i linan så krävs istället en kraft motsvarande en sjättedel av personens massa.



Figur 7. Uppställning av låda med våg



Figur 8. Student lyfter sig själv

### 5.1.2 Spänningsoptik

Spänningsoptik är ett fenomen som möjliggör att spänningarna i ett material kan illustreras. Ett genomskinligt material som polykarbonat blir vid deformation dubbelbrytande. Det som händer då materialet sträcks eller komprimeras är att avståndet ändras mellan atomerna i materialet. Ljusets hastighet varierar i materialet beroende på hur tätt atomerna är packade. Detta leder till att brytningsindex för material påverkas av avståndet mellan atomerna. Brytningen får även en effekt på ljusets polarisation. Figur 9 visar den ljuslåda som skapats för experimentet.

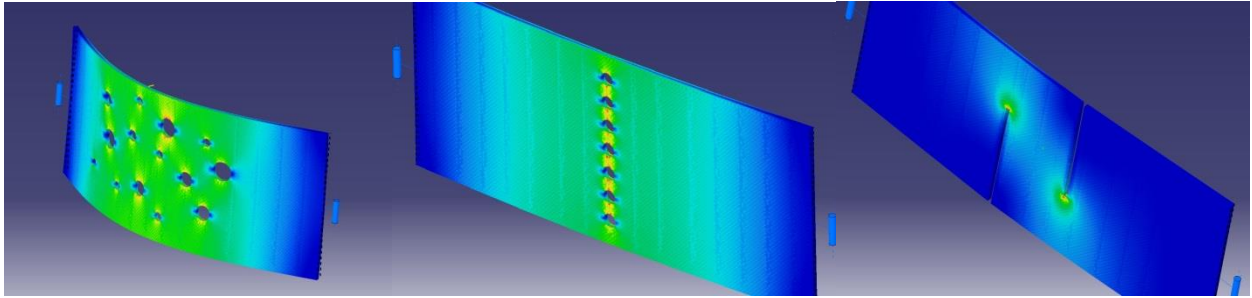
I experimentet polariseras ljuset i ett första filter för att sedan stoppas i ett andra filter som är vridet 90 grader mot det första filtret. Ska ljuset kunna passera båda filtren måste ljusets polarisation ändras mellan de två filtren. Det deformerade polykarbonatet polariserar om ljuset olika beroende på hur deformerat det är.

Resultatet blir att desto större deformation leder till desto tätare mellan färgskiftningarna. Då deformationen är proportionell mot spänningarna kan färgskiftningarna ses som ett spänningsmönster.[7]

Genomförandet av uppgiften går ut på att förstå var belastningen är som störst för en given geometri. Detta görs genom att jämföra sin hypotes med resultatet av spänningsoptiken och sedan verifiera resultatet med resultatet av en FEM-beräkning för samma geometri och randvillkor. Några exempel på dessa FEM-beräkningar kan ses i figur 10.



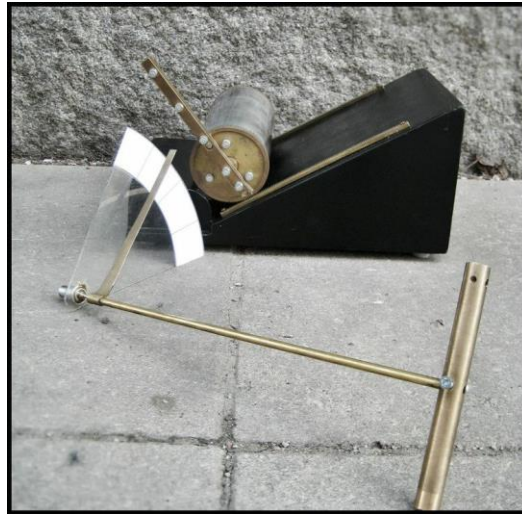
Figur 9. Ljuslåda med polariserade filter och skivor av polykarbonat



Figur 10. FEM analyser av skivor med motsvarande geometri som de av polykarbonat

### 5.1.3 Flytta moment

Ett tidigare befintligt experiment som illustrerar hur moment kan förflyttas har förbättrats och visas i figur 11. Ett handtag har skapats så att ett rent moment enklare ska kunna överföras. Med den tidigare lösningen var det svårt att inte anbringa en sidokraft vilket innebar att experimentet enkelt kunde tappa sitt syfte och leda till en felaktig slutsats. Denna rigg används bland annat som föreläsningmaterial och kräver därför tydlighet. Den tidigare skalan var svår att se på grund av det transparenta materialet och har därför ersatts. Experimentet är även ommålat och åtgärder mot förslitning har gjorts genom att fästa en gummilist för dämpning av den tunga vikten.



Figur 11. Momentbacke med momentnyckel

### 5.1.4 Gemensam tyngdpunkt

Gemensam tyngdpunkt illustreras av nio klossar av vilka en utkragande balkong ska byggas, se figur 12. Målet är att få balkongen att sticka ut så långt som möjligt från bordskanten. Detta görs genom att placera översta klossen på halva längden av underliggande kloss. Andra klossen placeras en fjärdedel från kanten av tredje klossen. Tredje klossen placeras en sjättedel från kanten på den fjärde klossen osv. Den gemensamma tyngdpunkten kommer enligt detta mönster placeras precis vid bordskanten och balkongen uppnår sin maximala längd. Studenten ska också härleda ett samband för maximala balkonglängden med godtyckligt antal klossar.



Figur 12. Block placerade som en utkragande balkong

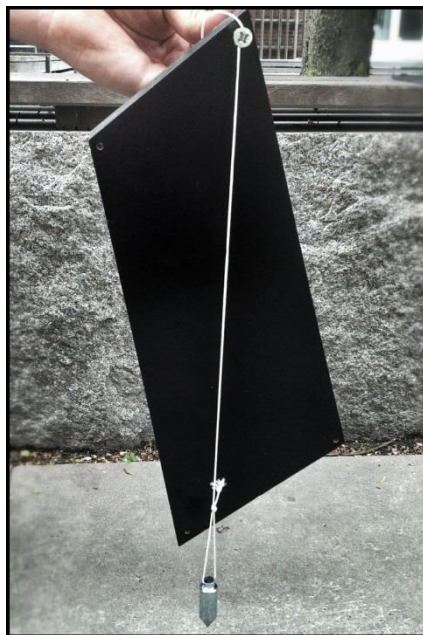
### 5.1.5 Stabilitetsmodell

Stabilitetsmodellen har utformats för att kunna illustrera två fenomen. Först visas hur tyngdpunkten kan fastställas utan beräkning. Vidare förklaras också hur förhållandet mellan tyngdpunkten och basen påverkar ett objekts statiska stabilitet.

Modellen visar hur tyngdpunkten kan hittas med hjälp av ett lod. Genom att hänga lodet i ett hörn samtidigt som modellen hänger fritt i samma punkt kommer lodet alltid att skära tyngdpunkten. Om lodlinjen markeras och processen upprepas för fler hörn, kommer linjerna att skära varandra i tyngdpunkten, se figur 13.

Vidare undersöks modellens statiska stabilitet. Formen är gjord så att modellen på ena sidan har tyngdpunkten innanför basen och kan därmed stå upp. För att se om tyngdpunkten ligger innanför modellens bas används en pil. Pilen är ledad i tyngdpunkten och hänger vertikalt. Så länge pilen pekar inom basen står modellen stabilt. Detta visas i figur 14.

Vänder man på modellen kommer tyngdpunkten hamna utanför basen och modellen välter. Om modellen ställs på ett lutande plan, så att pilen hamnar innanför modellens bas, kan modellen stå även på den smalare sidan.



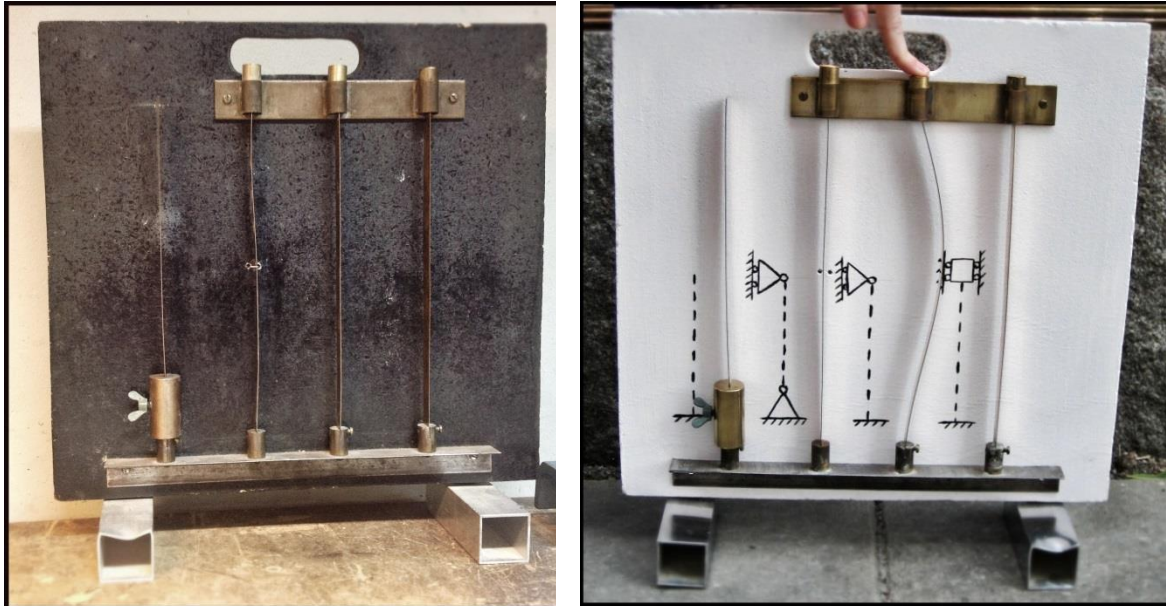
Figur 13. Framtagning av tyngdpunkt



Figur 14. Modellens statiska stabilitet

### 5.1.6 Euler's knäckfall

En tidigare lösning för illustration av Euler's knäckfall har förbättrats. Då denna ofta används i föreläsningssyfte har tydlighet beaktats. Bakgrundsfärgen har ändrats från svart till vit för att modellen tydligare ska kunna ses även av de som sitter långt bak i föreläsningssalen. Infästningarna från de fyra fallen var svåra att se och därför har symbolerna för dessa målats bredvid de olika knäckfallen. Dessa har målats relativt stora för att kunna urskiljas på avstånd.



Figur 15. Euler's knäckfall före (t.v.) och efter (t.h.) modifiering.

### 5.1.7 Förflyttning av last på balk

Detta experiment ska visa hur stöd krafter ändras beroende på hur lasten placeras på en balk. En våg i varje ände av plankan mäter reaktionskrafterna. En rulle och en avlång trekant är byggda för att symbolisera fri uppläggning på samma sätt som det illustreras i läroböckerna för statik och hållfasthetslära.

Genom att placera lasten i olika positioner på plankan ger vågarna olika utslag. Analys av den uppmätta datan ger räta linjer i den graf som ska ritas. Den uppritade grafen visar stödreaktionernas influenslinjer.



Figur 16. Uppställning med plank, våg och rullstödet



Figur 17. Student fungerar som last

### 5.1.8 Nedböjning

Tanken bakom experimentet är att studenten ska få en bättre känsla för hur både material och geometri påverkar storleken för nedböjningen. Samma planka och stöd som i experimentet "Förflyttning av last på balk" används tillsammans med ett digitalt skjutmått som mäter nedböjningen. Genom att lägga plankan ner eller ställa den på högkant blir det två olika yttröghetsmoment att beräkna.

Uppgiften går ut på att med hjälp av den uppmätta nedböjningen beräkna E-modulen för trä. Dessutom ska en tänkt spännvidd mellan stöden beräknas för en angiven nedböjning.



Figur 18. Uppställning med digitalt skjutmått

### 5.1.9 Betongbalk med armeringsjärn

Denna balk efterfrågades i föreläsningssyfte och illustrerar hur armeringsjärn och betong samverkar i en konstruktion. Balken är gjord av skumgummi och illustrerar en betongbalk med sprickor. Vid böjande belastning spricker balken och armeringen blir statiskt verksam genom dragning. I sprickorna syns armeringsjärnen som illustreras av resårband. Eftersom huvudändamålet med denna illustration är att visas på föreläsningar har storlek och tydlighet prioriterats.



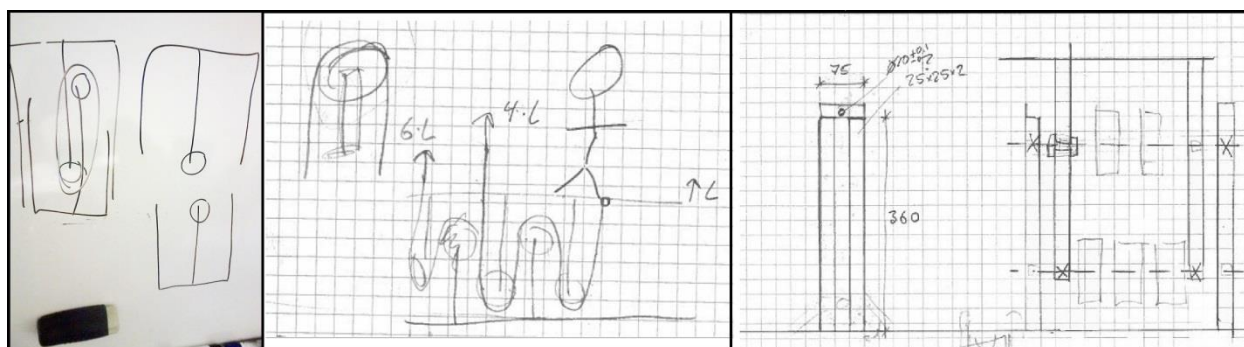
Figur 19. Modell av armerad betongbalk i nedböjt läge



## 5.2 Implementering av CDIO

Här följer ett konkret exempel för hur CDIO-processen har använts för ett av experimenten som arbetats fram. [2]

**Conceive:** Processen började med idégenerering. För det här experimentet skulle linkraft och utväxling med block demonstreras. Det bestämdes tidigt att den egna kroppen skulle involveras för att få ett större engagemang från studenten. Olika förslag för att personen skulle kunna lyfta sig själv begrundades. Många av förslagen involverade att borra upp krokar i taket för att på så sätt få en fästpunkt. Att borra hål i taket var dock inte tillåtet så experimentet behövde en annan lösning men med bibehållet mål att använda kroppen som massa. Den första skissen på experimentet med linkraft och utväxling som inte krävde någon upphängning i taket kan ses nedan, figur 20.



Figur 20. Tre steg av skisser för linmodellen från whiteboardidé till delvis måttsatt skiss

Mittenbilden visar beräkningar med olika antal trissor för att få olika utväxling. Ingen riktig design för experimentet ingick dock i skisserna.

**Design:** När konceptet var klart gjordes lite mer detaljerade och ingående skisser. Här togs det hänsyn till bland annat hur högt studenten ska kunna lyfta sig själv i experimentet. Ungefärliga dimensioner och utformning för hur exempelvis stag ska fästas för att göra konstruktionen mer robust beslutades under denna fas.

**Implement:** Tillverkningen skedde i tidigare nämnda Prototypverkstaden. Ritningarna på experimentet med linkraft och utväxling var inte helt färdiga vad gällde dimensioner för bland annat material. Dessa bestämdes senare i verkstaden utifrån de material som fanns tillgängliga. Det behövdes trekantiga förstövningar intill de vertikala fyrkantsrören för att göra konstruktionen mer stabil. Detta beslut gjordes efter att ha testat experimentet utan förstövningar.

**Operate:** I samband med det fysiska bygget skrevs också en manual som ska användas av studenterna under laborationen. Utformningen av manualen följde samma fyra steg som framtagningen av det fysiska experimentet. Manualen ska stödja studenterna i användandefasen för experimentet. Bland annat ges ett antal uppgifter som ska lösas. Hur detta görs får studenten själv bestämma. Manualen innehåller också ledning för att kunna lösa uppgifterna om så behövs.

### 5.3 Lokal och upplägg

Rummet är designat tillsammans med Input interiör för att få en levande och funktionell studio. Den begränsade ytan lämpar sig bäst till att ha tre olika stationer med fyra stycken studenter vid varje station. På hyllorna förvaras experimenten och hämtas till arbetsbänkarna för användning. Det finns två arbetsbänkar som är höga och där arbetet är tänkt att ske stående för att ge ett friare och mer flytande arbete. Vissa experiment kräver även en stående position. En tredje arbetsbänk finns där studenter kan sitta ner och jobba med experiment som är mer lämpade att genomföra i denna position.



Figur 21. Planlösning för studion

## 6 Diskussion och rekommendationer till framtida projekt

Projektet syftade i att utforma en studio för kurser i mekanik och hållfasthetslära och detta syfte har uppnåtts. På grund av tidsbegränsningen för projektet har en fullständig studio inte kunnat utformas men studion har i dagsläget en stor utvecklingspotential utifrån de framtagna grunderna. Förhoppningarna är att kommande kandidatarbeten, eller liknande projekt, väljer att vidareutveckla studion med utgångspunkt i de metoder som detta projekt har lett fram till.

Inspirations- och studiebesök gjordes tidigt i projektet vilket gav en bra uppstart och mycket idéer kring utvecklingen av studion. Tillsammans med en förstudie kunde metoder och teorier styrkas av forskning och tillsammans med inspirations- och studiebesöken gav detta en bra utgångspunkt till själva utformningen av experimenten.

De experiment som genererades men inte tillverkades under projektiden kan användas vid en vidareutveckling av studion. Dessa experiment kan ses under avsnitten 4.5.1 och 4.5.2.

Projektet har kunnat följa den uppsatta tidsplanen till ganska stor del. De största avvikelserna har skett vid tillverkningen av experimenten. Detta tog längre tid än beräknat och därmed har stor del av projektiden gått åt till tillverkningsprocessen.

Att använda utomstående teststudenter för utvärdering gav en tydlig bild av vad som behövdes förbättras. Den konstruktiva kritiken ledde bland annat fram till en tydligare struktur för de manualer som har framtagits till varje experiment. Efter uppstart av studion kommer även en utvärdering av experimenten behöva göras för att underlätta för vidareutveckling.

Ett förslag till utvecklingsarbete för studion skulle kunna vara att starkare implementera arbetsmetoden *CDIO* för experimenten. Experimenten kan då göras helt utan instruktioner och studenterna får på egen hand arrangera uppgiften och materialet. Detta för att en djupare förståelse och ett ökat lärandet.

## 7 Referenser

[1] <http://www.cdio.org/benefits-cdio>

[2] <http://www.cdio.org/implementing-cdio/standards/12-cdio-standards#standard10>

[3] J. Boesen, G. Emanuelsson, A. Wallby, K. Wallby, 2007, *Lära och undervisa matematik - internationella perspektiv*, Göteborg: Nationellt centrum för matematikutbildning

[4] M. Stigmar, 2009, *Högskolepedagogik: att vara professionell som lärare i högskolan*, Stockholm: Liber

[5] M. Elmgren, A-S. Henriksson, 2010, *Universitetspedagogik*, Stockholm: Nordstedts

[6] [http://fy.chalmers.se/~perolof/fyslek/ovriga\\_html/malsattning.html](http://fy.chalmers.se/~perolof/fyslek/ovriga_html/malsattning.html)

[7] [http://www.fy.chalmers.se/edu/lab/labpm/O4gymn\\_teori.pdf](http://www.fy.chalmers.se/edu/lab/labpm/O4gymn_teori.pdf)

## Bilaga A – Lärandemål

Nedan följer lärandemålen för de fem omnämnda kurserna.

### *MTM021- Statik och Hållfasthetslära*

Efter genomförd kurs ska studenterna kunna:

- förklara innebörden av begreppen fysikalisk storhet, mätetal, enhet och enhetssystem,
- beräkna kraftmoment med avseende på en punkt eller en axel,
- reducera godtyckliga kraftsystem,
- förklara innebörden av begreppen jämvikt och jämviktsvillkor,
- frilägga materiella system samt ställa upp jämviktsekvationer och lösa dessa,
- förklara skillnaden mellan ett statiskt bestämt och ett statiskt obestämt system samt kunna avgöra vilket av dessa som gäller för en given konstruktion,
- förklara innebörden av begreppen masscentrum och tyngdpunkt samt bestämma masscentrums läge för geometriskt enkla kroppar,
- förklara innebörden av begreppen vilofriktion, glidfriktion och friktionsvillkor samt lösa statiska problem med friktion,
- förklara innebörden av begreppen snittkraft och -moment,
- bestämma normalkraft-, tvärkraft- och böjmomentfördelningar i statiskt bestämda balkar,
- beskriva innebörden av begreppen normalspänning och -töjning,
- härleda differentialekvationen för förskjutningen hos axialbelastad elastisk stång, identifiera tillhörande randvillkor samt lösa ekvationen,
- beskriva vad en konstitutiv modell är,
- beskriva innebörden av materialkonstanterna elasticitetsmodul, Poissons tal, värmeutvidgningskoefficient, samt flyt- och brottspänning för vanliga konstruktionsmaterial,
- beskriva innebörden av begreppen skjuvspänning och skjuvning,
- beräkna spänningar och deformationer i plana statiskt bestämda elastiska stångbärverk med förskjutningsbaserad matrismetod, såväl med handräkning som med hjälp av MATLAB,
- härleda differentialekvationen för förvriddningen hos en vridbelastad elastisk axel, identifiera tillhörande randvillkor samt lösa ekvationen,

- bestämma förvriddningar och skjuvspänningar i statiskt bestämda och obestämda axlar,
- bestämma förvriddning och skjuvspänning i axlar vid plasticering inklusive avlastning från plastiskt tillstånd,
- redogöra för viskoelastiska materialmodeller, speciellt Kelvin- och Maxwellmaterial,
- förklara innebörden av begreppet yttröghetsmoment samt bestämma detta för geometriskt enkla tvärsnitt,
- bestämma normalspänning och skjuvspänning i balktvärsnitt vid plan böjning av statiskt bestämda balkar,
- utföra en dimensionsanalys och bedöma rimligheten i svaren.

### **MTM026 – Hållfasthetslära**

Efter genomförd kurs ska studenterna kunna:

- härleda och använda differentialekvationen för en balks utböjning för att bestämma deformation, tvärkraft och momentfördelning.
- använda elementarfall för att bestämma snittkrafter och deformationer hos statiskt obestämda balkar.
- härleda och lösa differentialekvationen för axialbelastad balk.
- bestämma den kritiska lasten vid elastisk instabilitet (knäcklasten) för tryckbelastade balkar med hjälp av differentialekvationen för axialbelastad balk och/eller med hjälp av Eulers knäckfall.
- förklara innebörden av och använda Hookes generaliserade lag för elastiska och termoelastiska material.
- bestämma huvudspänningar och huvudspänningsriktningar.
- beräkna spänningar och töjningar i godtyckliga snitt i 2D och 3D.
- härleda och använda formlerna för spänningar och töjningar i tunnväggiga cylindriska och sfäriska tryckkärl.
- beräkna effektivspänningen enligt von Mises och Tresca. Använda von Mises och Trescas flyt/brottvillkor för att avgöra om risk för plasticering eller brott föreligger vid fleraxliga belastningar.
- härleda och lösa elasticitetsekvationerna för rotationssymmetriska rör och skivor utsatta för trycklast, temperaturlast och rotationslast samt dimensionera krympförband.
- beräkna spänningskoncentrationer vid anvisningar, kälar och hål med hjälp av handbok.
- beräkna spänningar i ett plant elastiskt problem med hjälp av finita-elementmetoden i Matlabs PDE-toolbox och/eller annan programvara.

- använda den linjära brottmekaniken för att beräkna spänningstillståndet vid sprickor och avgöra om risk för sprickpropagering eller brott föreligger.
- beskriva grunderna för utmattningsdimensionering och dimensionera mot högcykel utmattning för enkla geometrier och lastfall.
- kunna använda Paris lag för att bestämma spricktillväxt antal lastväxlingar till brott.
- grafiskt presentera deformationer och spänningar i en konstruktion.

### **VSM031 – Hållfasthetslära**

Efter genomförd kurs ska studenterna:

- kunna härleda, och med hjälp av randvillkor, lösa differentialekvationerna för stångdragning, stångvridning och balkböjning.
- kunna använda materiallagar som beskriver linjär elasticitet, termoelasticitet och idealplasticitet.
- kunna beräkna snittkrafter och deformationer för stänger och balkar.
- kunna beräkna spänningar och töjningar i stänger, balkar och solider.
- vara orienterad om flythypoteser, utmattning och brottmekanik.

### **TME031- Mekanik – Dynamik**

Efter genomförd kurs ska studenterna kunna:

- beskriva och beräkna sambanden mellan läge, hastighet och acceleration vid partikelrörelse samt vid plan stelkroppsrörelse.
- frilägga, ställa upp och lösa Newtons 2:a lag på plana problem. Redogöra för begreppen kinetisk energi, potentiell energi och arbete samt sambanden mellan dem.
- tillämpa energibetraktelser för att lösa enklare dynamiska problem.
- tillämpa begreppen rörelsemängd och rörelsemängdsmoment för partikelsystem och stela kroppar.
- ställa upp och lösa enfrihetsgradssystem för fria och påtvingade svängningsproblem; med eller utan dämpning.
- förklara begreppet masströghetsmoment och beräkna dessa för stela kroppar med användning av formelsamling och parallellflyttningssatsen.
- lösa problem där rak eller sned central stöt förekommer.
- lösa enklare dynamikproblem numeriskt genom Matlab.

## **MME180 – Mekanik**

Efter genomförd kurs ska studenterna kunna:

- frilägga ett materiellt system i jämvikt, samt ställa upp och lösa jämviktsekvationer för det frilagda systemet
- redogöra för innebörden av Newtons lagar inklusive begreppet inertialsystem
- tillämpa Newtons andra lag för att lösa enklare problem för en partikel i såväl rätlinjig som kroklinjig rörelse
- lösa enklare ingenjörproblem, inklusive bestämning av lagerreaktioner, för en stel kropp vid rotation kring en fix axel
- tillämpa energisamband för att lösa enklare dynamiska problem för partiklar, system av partiklar och stela kroppar

## **Bilaga B – Manualer med lösningsförslag**



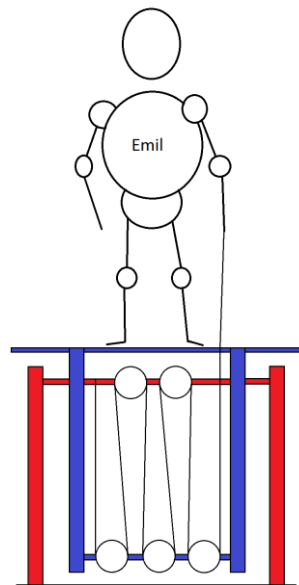
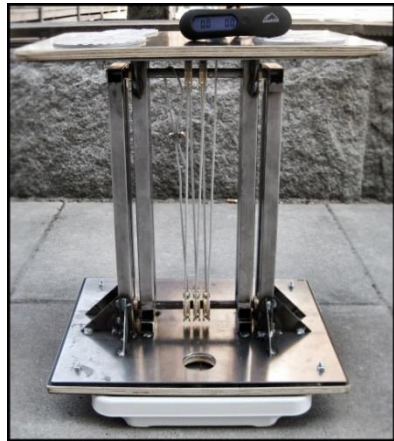
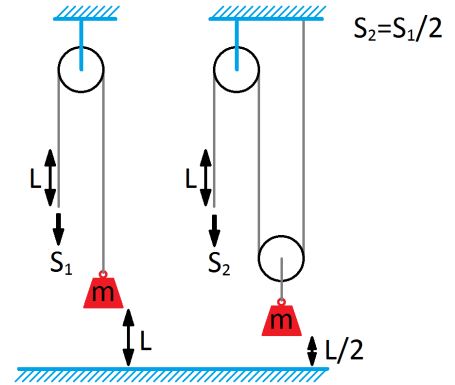
# #1 Linkrafter och block

## Syfte:

Uppgiften är till för att öka förståelsen för linkrafter och utväxling med block och hur detta kan tillämpas i praktiken.  
I ett block byter man kraft mot strecka och/eller byter riktning på en kraft.

## Uppgift:

- Börja med att bekanta dig med labbutrustningen och se vilka delar som rör sig och vilka som är stilla etc. Lyftanordningen benämns som rigg.
- Räkna ut lin- och reaktionskrafter i båda fallen.
- Gör mätningar med våg och dynamometer (i handtaget).
- Jämför med uträkningar och diskutera eventuella felkällor.



$N_1$  = kraft mellan Emil och rigg

$N_2$  = kraft mellan golv och rigg, Emil håller linan

$N_3$  = kraft mellan golv och rigg, Emilia håller linan

$N_4$  = kraft Emilia mot golv

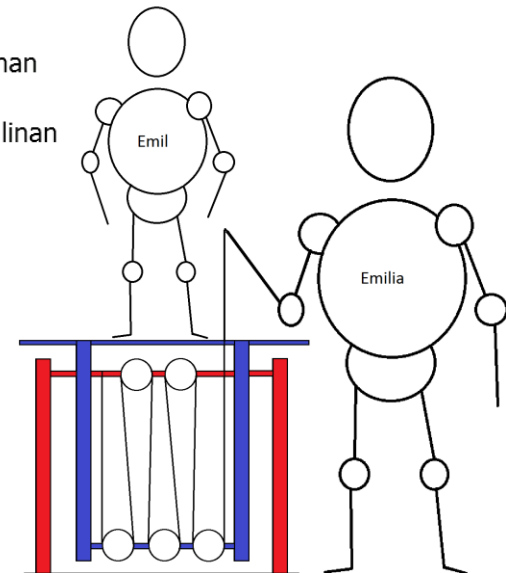
$m_1$  = Emils massa

$m_2$  = Emilias massa

riggens massa försummas

$s_1$  = linkraft när Emil håller linan

$s_2$  = linkraft när Emilia håller linan



Typiska användningsområden för block/talja är på båtar, lyftkranar och traverskranar.

## Lärandemål:

- Frilägga ett materiellt system i jämvikt, samt ställa upp och lösa jämviktsekvationer för det frilagda systemet.

### Labbutrustning:

2 badrumsvågar

2 stöd

Måttband och bräda

# #2 Förflyttning av last på balk

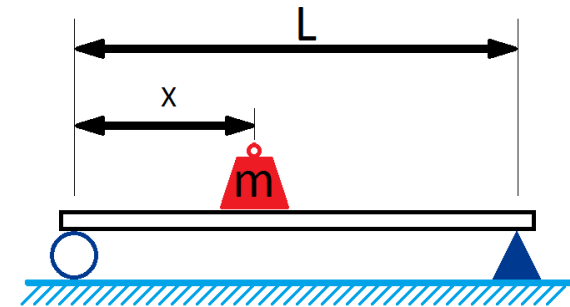


### Syfte:

Att förstå hur stöd krafterna ändras beroende på positionen av last på en balk.

### Uppgifter:

- Börja med att mäta ut längden mellan stöden.
- Gör exempelvis 4-5 mätningar där du står på olika positioner på balken (stå inte för nära rullstödet för då kan balken bli ostabil och börja rulla)
- Skriv ner resultaten i en tabell och illustrera sedan dessa för båda reaktionskrafterna i exempelvis en graf
- Uttryck resultaten i en formel eller ett samband som visar hur reaktionskrafterna beror på placeringen av lasten



Säckkärnan implementerar principen för förflyttning av last. Vikten är placerad nära stödhjulet samtidigt som handtagen ligger längre ifrån lasten.

### Lärandemål:

- Frilägga materiella system, ställa upp jämviktsekvationer och lösa dessa

Position	Ra	Rb
0,4m	38 x g	...
0,5m	...	...
0,75m	...	...

Exempel på tabell med värden

## Labbutrustning:

9 klossar

Linjal

# #3 Gemensam tyngdpunkt



## Syfte:

Få en förståelse för hur den gemensamma tyngdpunkten för flera element beräknas.

## Uppgifter:

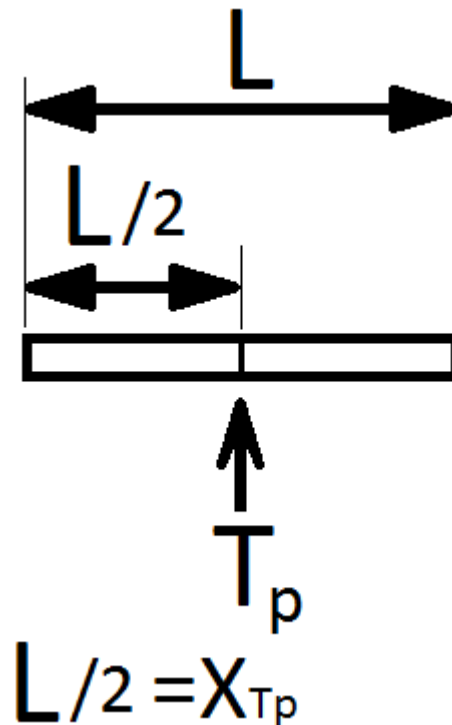
- Använd de nio klossarna för att bygga en utkragande balkong som sträcker sig så långt ut från bordets kant som möjligt. Hur lång kan balkongen bli?
- Härled ett samband för maximala längden av balkongen om du har  $n$ : stycken klossar.

Ledning: Var ska den gemensamma tyngdpunkten vara för att ge balkongen maximal längd?

$$X_{Tp} = \frac{1}{m_{tot}} \sum_{i=1}^n m_i x_i$$

Formel för tyngdpunkt i en dimension där varje element anses vara en punktmassa med läget  $x$ ,  $m$  är massan för varje enskilt element och  $m_{tot}$  är totala massan för alla elementen. Utgå från denna formel för att hitta ett uttryck för maximala längden av balkongen.

Tips: Börja med att räkna ut maximal längd för balkongen för en, två respektive tre klossar.



Originalbild från:

[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kalmar\\_Peinemann\\_reach\\_stack.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kalmar_Peinemann_reach_stack.jpg)

Gemensam tyngdpunkt beaktas t.ex. inom flygindustrin vid packning av flygplan och, som bilden ovan illustrerar, vid design av lyftkranar etc.

## Lärandemål:

- Förklara begreppen masscentrum och tyngdpunkt samt bestämma masscentrums läge för geometriskt enkla kroppar

## Labbutrustning:

Måttband Bräda 2 stöd  
Mätare för nedböjning

# #4 Nedböjning

## Syfte:

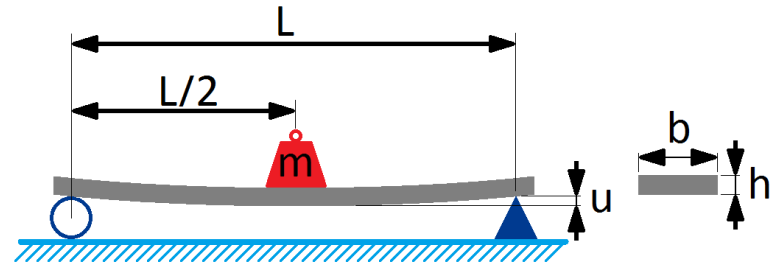
Uppgiften är till för att ge en ökad känsla för hur material och geometrier kan påverka storleken på en balks nedböjning.

Formeln för nedböjning gäller för en fritt upplagd balk som belastas på mitten.

$I$  är yttröghetsmomentet och formeln gäller för kvadratiska tvärsnitt.

$E$  är Elasticitetsmodulen som är materialberoende. Stål har t.ex. en  $E$ -modul på ca. 210MPa.

$$u = \frac{PL^3}{48EI} \quad I = \frac{bh^3}{12} \quad P = mg$$



## Uppgift:

- Börja med att placera ut stöden, träbalken och nedböjningsmätaren.
- För mätarmen upp till undersidan balken och nolla displayen på mätaren.
- Mät avståndet mellan stöden.
- En student ställer sig jämfota på balkens mitt.
- Läs av nedböjningen.
- Gör samma sak med balken på högkant.
- Räkna ut  $E$ -modulen på träbalken, för båda mätningarna. (liggandes och på högkant)
- Bli  $E$ -modulen samma för båda uträkningarna?
- Hur långt mellan stöden ska det vara för att nedböjningen ska bli 1mm/kg?



Nedböjning kan ses på balkar som bär last, t.ex. bjälklag i hus, skivstången på gymmet och svikten på hopptornet.

## Lärandemål:

- Kunna beräkna smittkrafter och deformationer för stänger och balkar.
- Använda elementarfall för att bestämma snittkrafter och deformationer.

**Labbutrustning:**  
Momentnyckel  
Rigg

# #5 Flytta moment

## Syfte:

Uppgiften visar hur positionen för ett moments angreppspunkten påverkar utfallet av momentet.

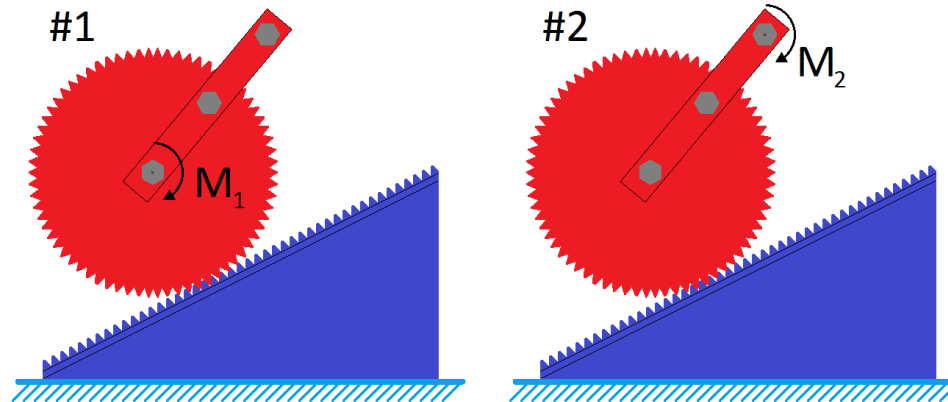
I beräkningsmodeller kan en tänkt förflyttning av ett pålagt moment, underlätta uppställning och lösning av problemet.



Att flytta ett pålagt moment görs nästan bara i beräkningsmodeller.

## Lärandemål:

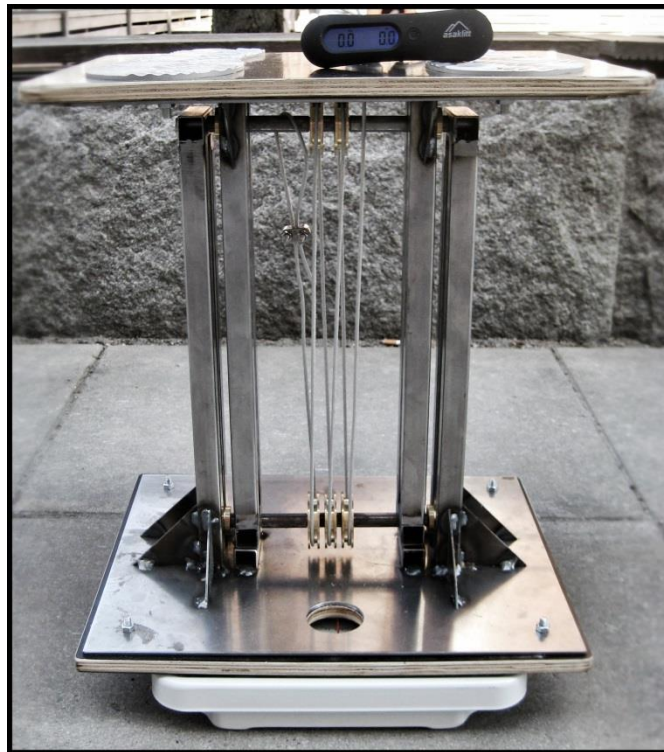
- Kunna reducera godtyckliga kraftsystem.
- Förstå kraftmoment med avseende på en punkt eller en axel.



## Uppgift:

- Börja med att placera backen med rullen på, så att hävarmen kommer mot er.
- Sätt momentnyckeln på skruvskalet i centrum av rullen.
- Vrid nyckeln så att rullen lämnar stödet. Det är mycket viktigt att endast rent moment påförs, så håll nyckeln i en linje parallell med rullen.
- Se storleken på momentnyckelns utslag, en grov uppskattning räcker bra.
- Gör samma sak men flytta nyckeln till en annan skruvskalet.
- Hur påverkas utslaget på momentnyckeln av att byta skruvskalet?
- Hur kan man tolka förhållandet mellan moment och angreppspunkt?

# LINKKRAFTER OCH BLOCK



#1

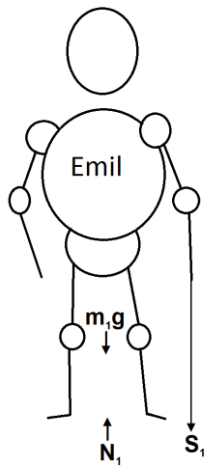
## Lösningförslag

Uppgiften är till för att öka förståelsen för linkrafter och utväxling med block och hur detta kan tillämpas i praktiken.

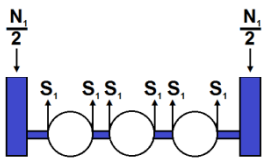
# Linkrafter och block

## LÖSNINGSFÖRSLAG

I fall 1 adderas linkraften till individens egetyngd vilket ökar normalkraften mellan Emil och riggen. Plattans normalkraft mot golvet blir summan av Emils och utrustningens egetyngd och påverkas inte av linkraften.



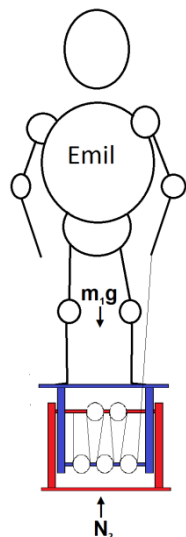
$$\text{Jämvikt } \downarrow: m_1 g + S_1 - N_1 = 0 \Rightarrow N_1 = m_1 g + S_1 \quad (1)$$



$$\text{Jämvikt } \downarrow: N_1 - 6 S_1 = 0 \Rightarrow N_1 = 6 S_1 \quad (2)$$

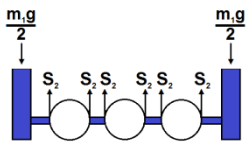
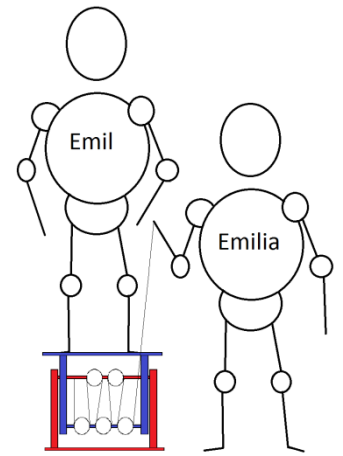
högerleden i (1) och (2) måste vara lika stora:

$$m_1 g + S_1 = 6 S_1 \Rightarrow S_1 = \frac{1}{5} m_1 g$$

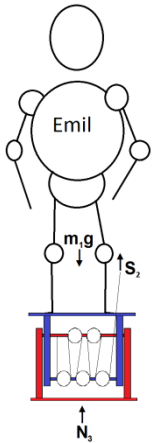


$$\text{Jämvikt } \downarrow: m_1 g - N_2 = 0 \Rightarrow N_2 = m_1 g \quad (3)$$

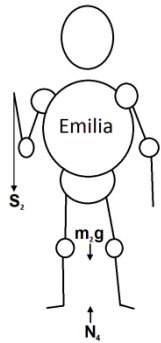
I fall 2 påverkar endast individens egetyngd normalkraften mellan Emil och riggen. Plattans reaktionskraft mot golvet reduceras samtidigt som normalkraften mellan Emilia och golvet ökas med motsvarande kraft.



$$\text{Jämvikt } \downarrow: m_1 g - 6 S_2 = 0 \quad \Rightarrow \quad S_2 = \frac{1}{6} m_1 g \quad (4)$$



$$\text{Jämvikt } \downarrow: m_1 g - N_3 - S_2 = 0 \quad \Rightarrow \quad N_3 = m_1 g - S_2 = \frac{5}{6} m_1 g \quad (5)$$



$$\text{Jämvikt } \downarrow: m_2 g + S_2 - N_4 = 0 \quad \Rightarrow \quad N_4 = m_2 g + S_2 = m_2 g + \frac{1}{6} m_1 g \quad (6)$$

Felkällor:

- När linkraften mäts kan mätaren slå på flera kg. Detta beror på friktion mellan de rörliga delarna. För att minska friktion har det använts kullager.
- Dragvinkel: Riktningen på linan vid drag påverkar reaktionskraften.
- Mätfel



# FÖRFLYTTNING AV LAST PÅ BALK



#2

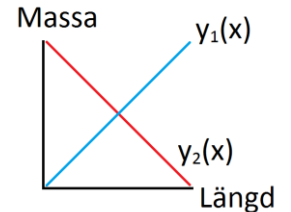
Lösningförslag

Att förstå hur stödkrafterna ändras beroende på positionen av last på en balk.

# Förflyttning av last på balk

## LÖSNINGSFÖRSLAG

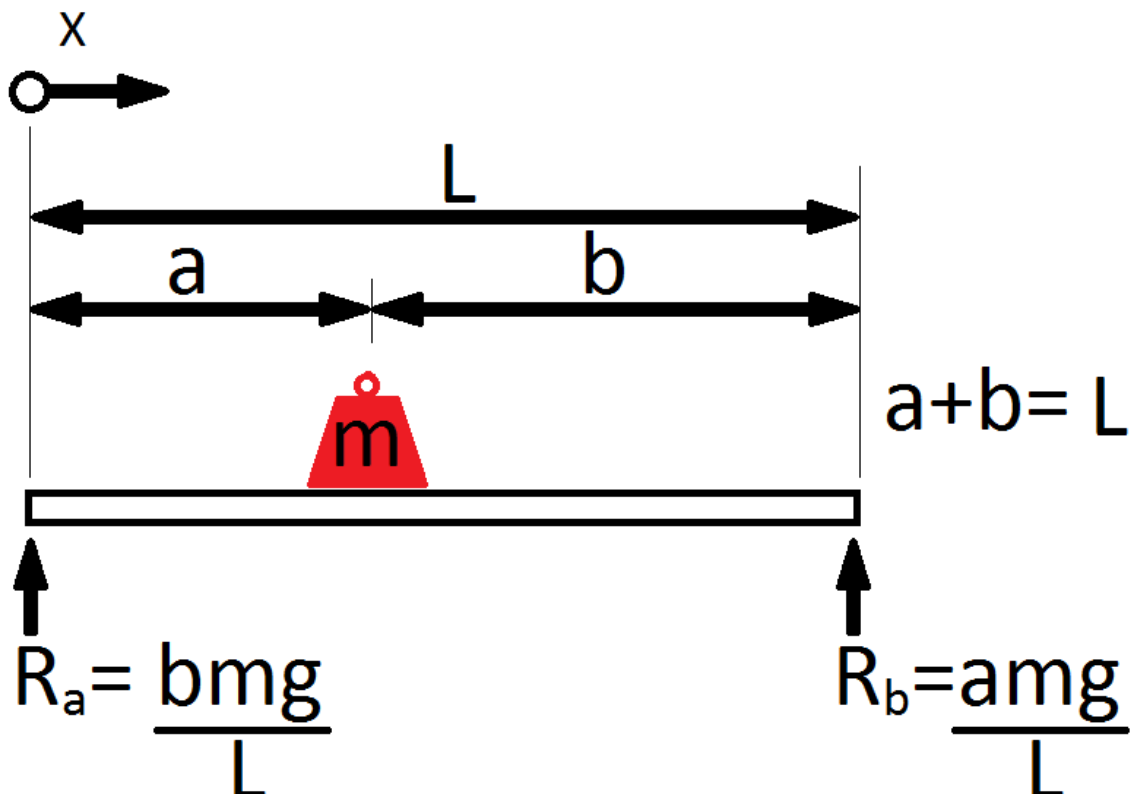
Börja med att mäta avståndet mellan stöden som plankan lutar på. Gör en tabell från de uppmätta resultaten från vågarna. Skriv ner både position av last och utslag på båda badrumsvågarna. Efter en tabell sammanställts är det lämpligt att sammanfatta resultaten i en graf (figur 1). Om mätningar har utförts korrekt kan man notera att utslagen för vardera våg bildar en rät linje, alltså det är lämpligt att utgå från räta linjens ekvation för att finna ett samband mellan lastens position och stödkrafterna.  $V_a$  och  $V_b$  nedan är utslagen på vardera våg.



FIGUR 1

$$y_1(x) = k_1x + q_1 = \frac{m}{L}x + 0 = V_b(x)$$

$$y_2(x) = k_2x + q_2 = -\frac{m}{L}x + m = V_a(x)$$



# GEMENSAM TYNGDPUNKT



#3

Lösningförslag

Få en förståelse för hur den gemensamma tyngdpunkten för flera element beräknas.

# Gemensam tyngdpunkt

## LÖSNINGSFÖRSLAG

### LÖSNING

Här följer en härledning för ett samband över hur lång balkongen kan bli om man använder  $n$  st. klossar, vardera med längden  $L$  och massan  $m$ . Vi utgår i denna härledning från exempel och bilder med en, två respektive tre klossar för att sedan gå över och göra ett samband för  $n$  st. klossar. För att få så lång utkragande balkong som möjligt måste dem gemensamma tyngdpunkten för de överliggande klossarna ligga placerad precis i kanten på den närmaste underliggande kloss.

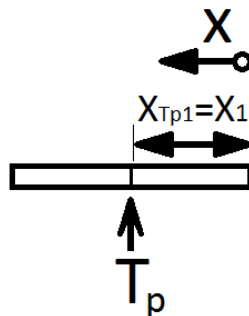
Uttrycket för tyngdpunkten i en dimension lyder:

$$X_{Tp} = \frac{1}{m_{tot}} \sum_{i=1}^n m_i x_i$$

Utifrån detta uttryck får man lätt ut tyngdpunkten för en kloss. Vi ansätter ett koordinatsystem där  $x$ -axeln utgår från slutet av balkongen och är positivt i riktning mot bordet.

Tyngdpunkten för en kloss i  $x$ -led:

$$X_{Tp1} = \frac{1}{m_1} (m_1 x_1) = \left\{ x_1 = \frac{L}{2} \right\} = \frac{L}{2}$$

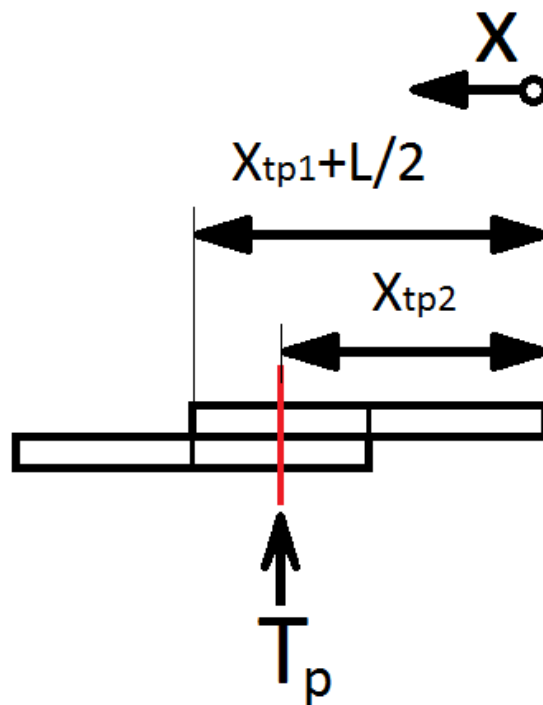


Tyngdpunkten för två klossar i x-led:

$$X_{Tp2} = \frac{1}{m_1 + m_2} (m_1 x_1 + m_2 x_2) =$$

$$= \left\{ \begin{array}{l} m_1 = m_2 = m \\ x_1 = \frac{L}{2}, x_2 = X_{tp1} + \frac{L}{2} = L \end{array} \right\} =$$

$$\frac{1}{2m} \left( m \left( \frac{L}{2} + L \right) \right) = \frac{L}{2} \left( \frac{1}{2} + 1 \right) = \frac{3L}{4}$$

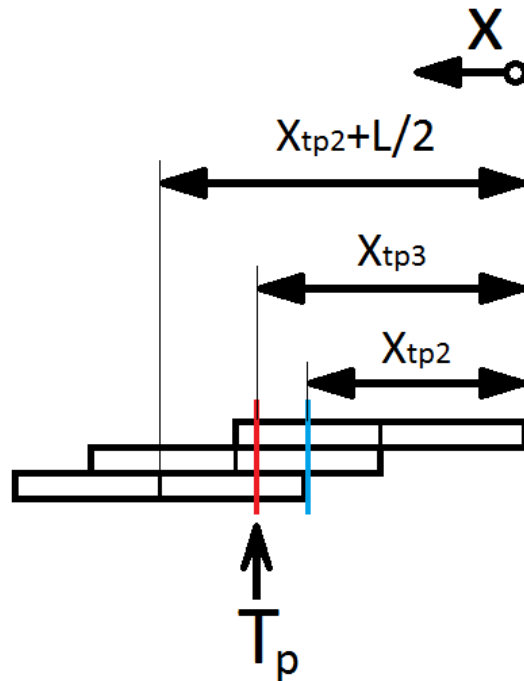


På samma sätt som när vi positionerade den andra klossen så placerar vi kloss tre så att den sammanlagda tyngdpunkten för kloss ett och två hamnar precis på kanten av kloss tre. Koordinaten för den tredje klossens tyngdpunkt fås genom att ta den gemensamma tyngdpunkten för de två övre klossarna och addera  $L/2$ . Tyngdpunkten för tre klossar i x-led

$$X_{Tp3} = \frac{1}{m_1 + m_2 + m_3} (m_1 x_1 + m_2 x_2 + m_3 x_3)$$

$$= \left\{ \begin{array}{l} m_1 = m_2 = m_3 = m \\ x_1 = \frac{L}{2}, \quad x_2 = X_{tp1} + \frac{L}{2}, \quad x_3 = x_{tp2} + \frac{L}{2} = \frac{5L}{4} \end{array} \right\}$$

$$= \frac{1}{3m} \left( m \left( \frac{L}{2} + L + \frac{5L}{4} \right) \right) = \frac{L}{3} \left( \frac{1}{2} + 1 + \frac{5}{4} \right) = \frac{11L}{12}$$



### Gemensam tyngdpunkt

---

Genom att studera ekvationerna kan man finna ett samband för den maximala längden när man har  $n$  st klossar.

$$X_{Tp_n} = \frac{1}{n} (X_{Tp_{n-1}} * (n - 1) + X_{Tp_{n-1}} + \frac{L}{2})$$

# NEDBÖJNING



#4

## Lösningförslag

Uppgiften är till för att ge en ökad känsla för hur material och geometrier kan påverka storleken på en balks nedböjning.



# Nedböjning

## LÖSNINGSFÖRSLAG

Exempel:

Balken liggandes och uppmätt nedböjning med Emil är 17mm.

Emil 75kg       $L=2,4\text{m}$        $b=0.095\text{m}$        $h=0.045\text{m}$        $u=0.017\text{m}$

$$u = \frac{PL^3}{48EI} \Rightarrow E = \frac{PL^3}{48uI} \quad \left\{ \begin{array}{l} P=mg \\ I = \frac{bh^3}{12} \end{array} \right\} \Rightarrow E = \frac{mgL^3}{48u \left( \frac{bh^3}{12} \right)} = \frac{mgL^3}{4ubh^3}$$

$$E = \frac{mgL^3}{4ubh^3} = \frac{75 \times 9.81 \times 2.4^3}{4 \times 0.017 \times 0.095 \times 0.045^3} = 1.73 \times 10^{10} \text{ Pa} = 17.3 \text{ MPa}$$

Balken ståendes på högkant med Emil igen, nedböjning 4mm.

Emil 75kg       $L=2,4\text{m}$        $b=0.045\text{m}$        $h=0.095\text{m}$        $u=0.004\text{m}$

$$E = \frac{mgL^3}{4ubh^3} = \frac{75 \times 9.81 \times 2.4^3}{4 \times 0.004 \times 0.045 \times 0.095^3} = 1.65 \times 10^{10} \text{ Pa} = 16.5 \text{ MPa}$$

Nedböjning med Emilia 60kg blir 14mm med balken på lågkant och ett avstånd mellan stöden på 2,4m. Vi söker ett avstånd mellan stöden där samma balk ska böja ned 60mm.

$$u_1 = \frac{PL_1^3}{48EI} \quad u_2 = \frac{PL_2^3}{48EI}$$

nedböjning vid mätning:  $u_1=0.014$   
 önskad nedböjning      :  $u_2=0.060$   
 längd mellan stöd      :  $L_1=2.4$   
 längd som söks            :  $L_2=?$

$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{\frac{PL_2^3}{48EI}}{\frac{PL_1^3}{48EI}} = \frac{PL_2^3 \cdot 48EI}{48EI \cdot PL_1^3} = \frac{L_2^3}{L_1^3} = \left( \frac{L_2}{L_1} \right)^3$$

$$\left( \frac{u_2}{u_1} \right)^{\frac{1}{3}} = \frac{L_2}{L_1}$$

$$L_2 = \left( \frac{u_2}{u_1} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot L_1 = \left( \frac{0.060}{0.014} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot 2.4 = 3.9\text{m}$$

Diskussion:

- Att E-modulen inte blir helt lika kan bero på träets egenskaper, men mer troligt är det mätningarna som står för största bidraget till skillnaden.
- Länden påverkar nedböjningen med potensen 3. En ökning av längden med ca 62% får nedböjningen att öka med 330%.

# FLYTТА MOMENT



#5

## Lösningförslag

Uppgiften visar hur positionen för ett moments angreppspunkten påverkar utfallet av momentet.

# Flytta moment

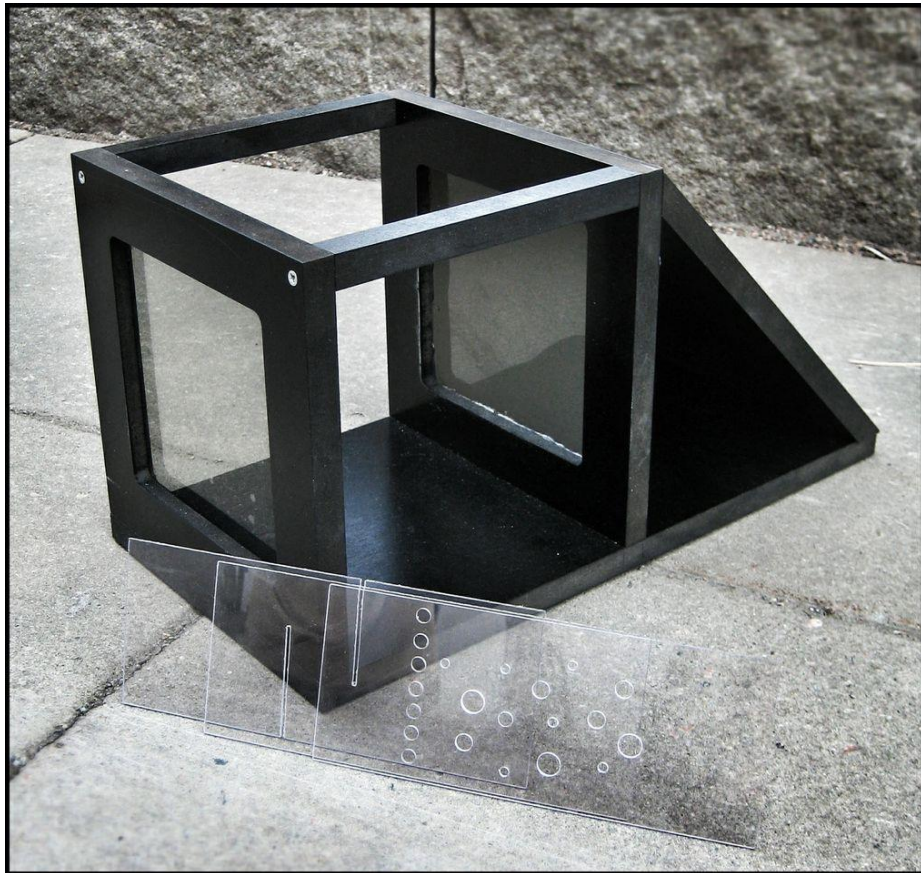
## LÖSNINGSFÖRSLAG

Om allt gått som det är tänkt ska momentet bli det samma oavsett var det anbringas. Det som kan orsaka variationer i mätningarna är om nyckeln också angriper med en kraft. Det är alltså viktigt att endast ett rent moment påförs rullen.

Slutsatsen blir att ett rent moment kan flyttas utan att resultatet ändras.

Med denna kunskap blir det lättare att förstå varför uträkningar för t.ex. bultförband ser ut som de gör.

# SPÄNNINGSOPTIK



#6

## Uppgift och teori

Genom att belysa plasten polykarbonat med polariserat ljus kan spänningskoncentrationer synliggöras. Detta kallas för spänningsoptik. Uppgiften ska ge en förståelse för var spänningar kan uppstå i grundläggande geometrier.

# Spänningsoptik

## UPPGIFT OCH TEORI

### TEORI

Ett genomskinligt material som polykarbonat blir vid deformation dubbelbrytande. Det som händer då materialet sträcks eller komprimeras är att avståndet ändras mellan atomerna i materialet. Ljusets hastighet varierar i materialet beroende på hur tätt atomerna är packade. Detta leder till att brytningsindex för material påverkas av avståndet mellan atomerna. Brytningen får även en effekt på ljusets polarisation.

I experimentet polariseras ljuset i ett första filter för att sedan stoppas i ett andra filter som är vridet  $90^\circ$  mot det första filtret. Ska ljuset kunna passera båda filtren måste ljusets polarisation ändras mellan de två filtren. Det deformerade polykarbonatet polariserar om ljuset olika beroende på hur deformerat det är.

Resultatet blir att desto större deformation leder till desto tätare mellan färgskiftningarna. Då deformationen är proportionell mot spänningarna kan färgskiftningarna ses som ett spänningsmönster.

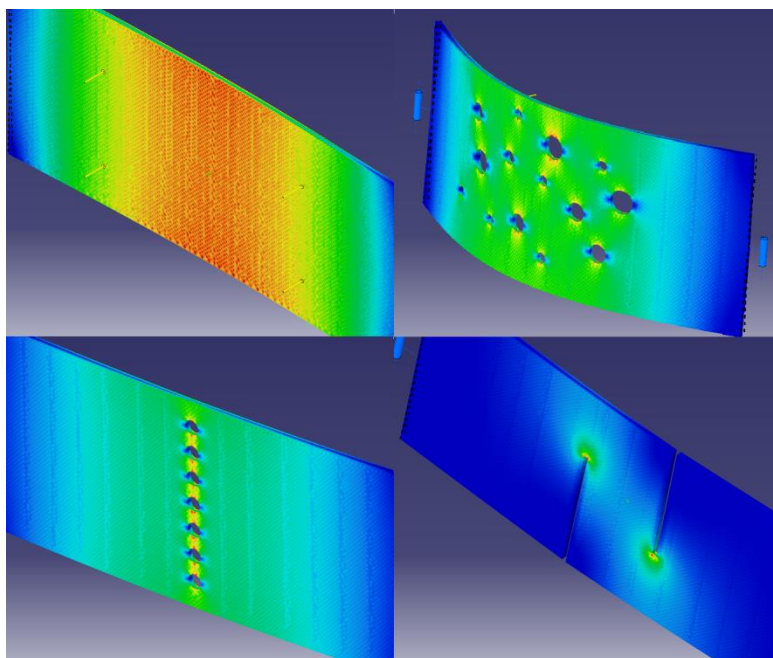
### UPPGIFT

- Testa att böja de olika geometrierna och se var spänningar uppstår.
- Var i geometrin finns de största spänningarna?
- Varför uppkommer spänningarna på just dessa ställen?
- Jämför de spänningar ni ser med de FEM-beräknade spänningarna. Vad är det för skillnader och varför blir det skillnader?

### FEM BILDER

I figur 1 presenteras bilder på polykarbonatskivorna som de ser ut när de modelleras i datorn och FEM-analyserats med en böjande last och ledade kortsidor som ska motsvara samma böjning som man gör med materialet i uppgiften.

De största spänningskoncentrationerna uppkommer där geometrin förändras vid hål, kanter, vid inspänningar och änden på sprickorna.



FIGUR 1: SPÄNNINGS ANALYSER AV DE OLIKA GEOMETRIERNA NÄR DE UTSÄTTS FÖR BÖJNING