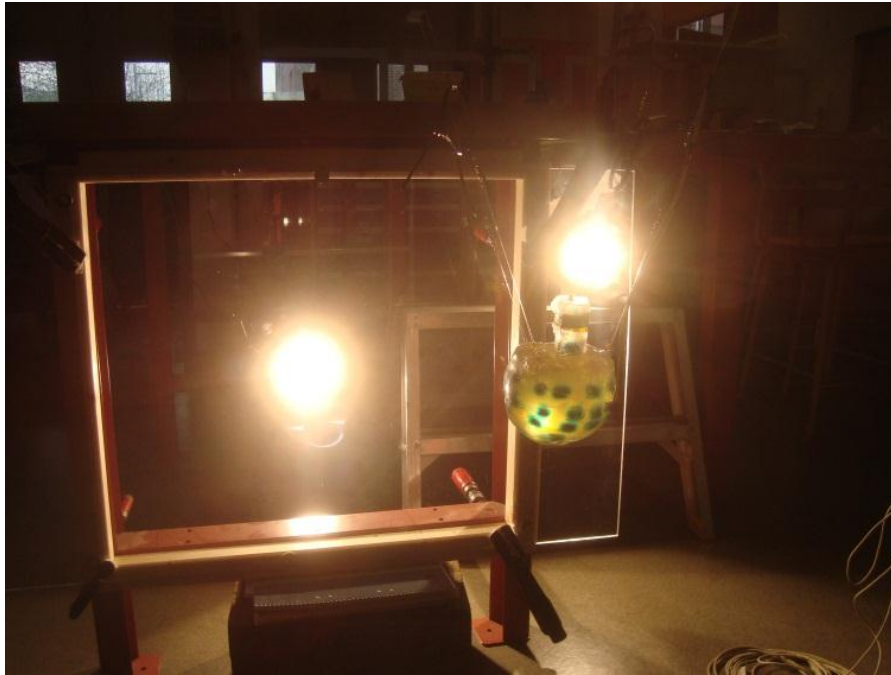


CHALMERS



Mekanisk modell av människans huvud för simulering av skalltrauma och hjärnskada

Mechanical model of the human head for simulation of head
trauma and brain injury

Examensarbete inom högskoleingenjörprogrammet Maskinteknik

ANDREAS JOHANSSON

MARCO SUNEBRAND

Institutionen för Tillämpad mekanik
Avdelningen för Fordonssäkerhet
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2012
Examensarbete 2012:03

EXAMENSARBETE 2012:03

Mekanisk modell av människans huvud för simulering av skalltrauma och hjärnskada

Mechanical model of the human head for simulation of head trauma and brain injury

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet Maskinteknik

ANDREAS JOHANSSON

MARCO SUNEBRAND

Institutionen för Tillämpad mekanik
Avdelningen för Fordonssäkerhet
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2012

Mekanisk modell av människans huvud för simulering av skalltrauma och hjärnskada
Mechanical model of the human head for simulation of head trauma and brain injury
Examensarbete inom högskoleingenjörprogrammet Maskinteknik
ANDREAS JOHANSSON
MARCO SUNEBRAND

© ANDREAS JOHANSSON, MARCO SUNEBRAND, 2012

Examensarbete 2012:03 ISSN 1652-9901
Institutionen för Tillämpad mekanik
Avdelningen för Fordonssäkerhet
Chalmers tekniska högskola
SE-412 96 Göteborg
Sverige
Telefon: + 46 (0)31-772 1000

Omslag:
Bild av testriggen

Tryckeri/Institutionen för Tillämpad mekanik
Göteborg, Sverige 2012

FÖRORD

Detta examensarbete har utförts på SAFER som är Chalmers forskningscenter inom fordonssäkerhet. Vi som har utfört arbetet går på Maskiningenjörsprogrammet (180 hp) med inriktningen konstruktion på Chalmers Tekniska Högskola i Göteborg. Arbetet har utförts under vårterminen på utbildningens tredje och sista år och omfattar 15 hp/person.

Vi vill tacka följande personer:

- Mats Svensson, biträdande professor inom fordonssäkerhet och vår handledare och examinator inom SAFER, för all support och coaching samt för att ha möjliggjort detta arbete.
- Sven Ekered, forskningsingenjör inom Produkt- och produktionsutveckling på Chalmers, för att ha låtit oss vistas i V-laboratoriet samt stöd under arbetets gång.
- Samt övrig hjälpsam personal på Chalmers och SAFER.

SAMMANFATTNING

I det här arbetet har en genomskinlig skallmodell tillverkats vilken fylldes med en hjärnliknande massa som sedan krocktestades. Detta gjordes för att undersöka hur en genomskinlig skallmodell kan tillverkas för att kunna erhålla riktiga mätdata från krocktester. Det gjordes även för att undersöka hur islag på framsidan av huvudet deformerar hjärnans baksida. Då huvudet bromsas upp rör sig hjärnan framåt relativt skallen och kan träffa skallens framsida. Man tror att när hjärnan sedan studsar tillbaka kan den komma i kontakt med skallens baksida, vilket kan orsaka hjärnskador på baksidan av hjärnan, så kallade contre-coupskador. Arbetet har utförts hos SAFER i Göteborg, som är Chalmers Tekniska Högskolas forskningscentrum för fordonssäkerhet.

En kvantitativ metod för materialval användes tillsammans med en datorbaserad materialdatabas för att utvärdera olika material som skallen kunde tänkas tillverkas i och materialet som valdes var epoxiplast. I samband med metoden valdes dessutom gjutning som tillverkningsmetod. Som substitution för hjärnan användes en gelatinblandning som hälldes i den färdiga skallen. För att kunna observera hjärnans rörelser i den genomskinliga skallen tillsattes till hjärnblandningen färgade bitar av samma blandning som hjärnsubstitutionen.

Ett första krocktest utfördes genom att hänga skallmodellen i en pendel som sedan fick slå i en plastskiva. Islagsförloppet filmades med en höghastighetskamera, vars film analyserades med hjälp av ett rörelseanalysprogram. På skallen fästes även accelerometrar för att registrera hur stor acceleration skallen påverkades av. När skallen skulle krocktestas för andra gången valdes en högre höjd som skallen släpptes ifrån så skallmodellen hade en högre hastighet när den slog i plastskivan. Detta gjorde dock att skallmodellen sprack och således kunde endast det första krocktestet analyseras.

Eftersom skallmodellen endast hade en hastighet på ca 19 km/h under det analyserade krocktestet kunde tyvärr inte några rörelser i hjärnan utskiljas. Däremot observerades rörelser hos den del av hjärnan som befann sig i ett rör upp från nackhålet i skallen. Detta tyder på en volymändring hos skallen. Det kan även tyda på att hjärnan rör sig inuti skallen vilket kan orsaka contre-coupskador.

SUMMARY

In this thesis, a transparent model of the human head has been constructed which was filled with a substance that represented the brain. This model was later crash tested. This was done in order to examine how a transparent model of the human head can be constructed to generate accurate data from crash tests. It was also done in order to examine how impacts on the front of the head can deform the rear of the brain. When a head is decelerating, the brain moves forward inside the skull and may hit the front of the skull. It is believed that when the brain is bouncing back, it can hit the rear of the skull which can cause brain damage on the rear of the brain, so called contrecoup injuries. This work took place at SAFER Vehicle and Traffic Safety Centre at Chalmers University of Technology in Gothenburg.

In order to choose the most suitable material for construction of the head model, several materials were evaluated with a quantitative method of materials selection with the help of a computer based material database. The chosen material was epoxy. In conjunction with the material selection, molding was chosen as the method for construction of the head model. The skull was filled with a gelatin mix which was used as the brain substitute. In order to observe brain movements within the skull, a number of colored pieces of the same gelatin mix were added as well.

In the first crash test, the head model was mounted on a pendulum which hit a plastic plate. The impact process was recorded by a high-speed video camera. The video recording was analyzed by a motion analysis software. Accelerometers were mounted on the head model which recorded the head acceleration during the impact. The head was dropped from a greater height during the second crash test so the head model would hit the plastic plate at a higher speed. Unfortunately, this caused the head model to break and thus only the first crash test could be analyzed.

Since the head model hit the plastic plate with a speed of only 19 km/h, no brain movements could be distinguished. The only part of the brain whose movements could be observed was located inside a tube at the foramen magnum which is a large opening near the head model's rear. This could indicate a change in the skull volume. It could also indicate brain movements inside the skull which could cause contrecoup injuries.

INNEHÅLL

BETECKNINGAR.....	1
1. INLEDNING.....	2
1.1 Bakgrund.....	2
1.2 Syfte.....	2
1.3 Avgränsningar.....	2
1.4 Precisering av frågeställningen.....	2
2. TEORETISK REFERENSRAM.....	3
2.1 Statistik över traumatiska hjärnskador.....	3
2.2 Skelettets egenskaper och konstruktion.....	5
2.3 Hjärnans anatomi.....	6
2.4 Olika typer av traumatiska hjärnskador.....	8
2.4.1 Kontusion.....	8
2.4.2 Hjärnblödning.....	9
2.4.3 Subduralblödning.....	9
2.4.4 Subarachnoidalblödning.....	9
2.4.5 Extraduralblödning.....	10
2.4.6 Hjärnskakning.....	10
2.4.7 Diffus axonskada.....	10
2.5 Förklaring av kvantitativ metod för materialval.....	10
2.6 Tillverkningsmetoder för plaster.....	13
2.6.1 Formsprutning.....	13
2.6.2 Extrudering.....	14
2.6.3 Profildragning.....	14
2.6.4 Formblåsning.....	15
2.6.5 Rotationsgjutning.....	16
2.6.6 Gjutning.....	16
2.6.7 Termoformning.....	16
2.6.8 Rapid prototyping.....	17
2.6.9 Fräsning.....	17
2.6.10 Handuppläggning.....	18
2.7 Litteraturinventering över tidigare arbeten.....	19
2.7.1 Experimental Studies of Mechanical Effects in Head Injury.....	19

2.7.2 Physical modeling of brain and head kinematics	20
3. METODÖVERSIKT	21
4. VAL AV SKALLMATERIAL	22
4.1 Kravprofil	22
4.2 Materialfiltrering i CES-databasen	22
4.3 Summering av tillverkningsmetoder	23
4.4 Gjutning av termoplast?.....	24
4.5 Material som uppfyller krav och tänkta tillverkningsmetod	25
4.6 Metod för materialval	25
5. TILLVERKNING AV SKALLMODELL	29
5.1 Förenkling av skallmodellens utformning	29
5.2 Förklaring av gjutningsidé.....	29
5.3 Val av släppmedel	30
5.4 Framtagning av gjutform	31
5.5 Framtagning av kärna	35
5.6 Gjutning av skallmodell.....	37
5.7 Påfyllnad av hjärnsubstitut	40
6. VAL AV TESTRIGG.....	42
6.1 Koncept 1 – Lutande skiva	42
6.2 Koncept 2 – Gummiband.....	42
6.3 Koncept 3 – Pendel.....	43
6.4 Koncept 4 – Fritt fall	44
6.5 Koncept 5 – Roterande islagsanordning.....	44
6.6 Val av testrigg.....	45
7. TILLVERKNING AV TESTRIGG	46
8. KROCKTEST AV HUVUDMODELLEN	48
9. ANVÄNDNING AV RÖRELSEANALYSPROGRAM	50
10. FRAMSTÄLLNING AV GRAFER.....	52
10.1 Exempel 1	52
10.2 Exempel 2	56
11. ANALYS AV GRAFER	59
11.1 Exempel 3	60

11.2 Exempel 4.....	61
11.3 Exempel 5.....	63
11.4 Beräkning av skallmodellens volymändring under islaget.....	66
11.5 Analys av skallmodellens volymändring under islaget.....	66
12. SKALLMODELLENS TJOCKLEK.....	67
13. SLUTSATS.....	69
13.1 Resultat.....	69
13.2 Diskussion.....	69
13.3 Att tänka på vid framtida projekt.....	71
REFERENSER.....	72
BILAGA 1 – BERÄKNAD EPOXIÅTGÅNG OCH EPOXIPRIS.....	
BILAGA 2 – FÖRDJUPANDE ANALYS AV FIGUR 10.12.....	
BILAGA 3 – RESULTAT FRÅN ACCELEROMETRARNAS.....	
BILAGA 4 – GRAFER FÖR PUNKTERNAS RÖRELSE.....	
BILAGA 5 - MATERIALKOSTNADER.....	

BETECKNINGAR

CAD = Computer-aided design (datorstödd design) - Digital framtagning av modeller och ritningar.

CFD = Computational fluid dynamics (beräkningsbar strömningsdynamik) - En metod som används för att analysera strömningsproblem med hjälp av numeriska beräkningar.

CR-39 = Columbia Resin 39 (polyallyldiglycolkarbonat) - En genomskinlig hårdplast som idag används till linser.

CSV = Cerebrospinalvätska - Den vätska som finns mellan hjärnan och skallen som bland annat transporterar näringsämnen till hjärnan.

FEM = Fenita elementmetoden - En datorbaserad metod som används för att beräkna hur en produkt påverkas av yttre pålagda laster.

PE-LD = lågdensitetspolyeten - En vanlig termoplast som bland annat används till plastpåsar.

RP = Rapid prototyping - En tillverkningsmetod som används för att tillverka en modell utifrån en tredimensionell CAD-modell.

THS = Traumatisk hjärnskada - En hjärnskada som uppkommer på grund av yttre våld mot huvudet.

1. INLEDNING

När huvudet utsätts för ett islag kan hjärnan röra sig och komma i kontakt med skallen och orsaka blåmärken som kan leda till hjärnskador; skadas hjärnan vid islagspunkten kallas detta för en coupskada och skadas hjärnan vid den motsatta sidan kallas detta för en contre-coupskada. I detta arbete har en genomskinlig huvudmodell tagits fram för att kunna studera hjärnans rörelser i samband med ett islag.

1.1 Bakgrund

Chalmers avdelning för fordonssäkerhet är en del av institutionen tillämpad mekanik på Chalmers Tekniska Högskola. De arbetar med att förebygga skador på människokroppen i samband med till exempel trafikolyckor. Ungefär 1/3 av alla traumatiska dödsfall orsakas av huvudskador. Arbetet gjordes tillsammans med dem eftersom man idag inte har någon bra bild av vad som sker i huvudet vid ett islag eftersom människans huvud inte är genomskinligt.

1.2 Syfte

Under projektet skulle en förenklad mekanisk modell av huvudet utvecklas och tillverkas. Modellen var tänkt att bestå av en skalle och en hjärna som skulle krocktestas och användas för att studera principerna för hur skallen accelereras och deformeras vid ett islag samt hur detta i sin tur skapar deformationer på hjärnan. Modellen skulle provas och mätresultaten analyseras.

1.3 Avgränsningar

Huvudmodellen är inte tänkt att utsättas för våld som ger en roterande rörelse. Testhuvudet kommer inte att vara en exakt modell av ett människohuvud, ty det skulle bli för komplicerat att tillverka. Dessutom kommer inte det här arbetet att använda sig av biologiska huvudmodeller.

1.4 Precisering av frågeställningen

- Hur kan en modell av ett människohuvud förenklas men ändå ge en god bild av ”coup/contre-coup” skador i hjärnan?
- Hur deformeras hjärnan och skallen då huvudet utsätts för yttre våld?
- Vilka material och tillverkningsmetoder kan användas för att tillverka en modell av ett människohuvud?
- På vilka sätt kan en huvudmodell krocktestas?

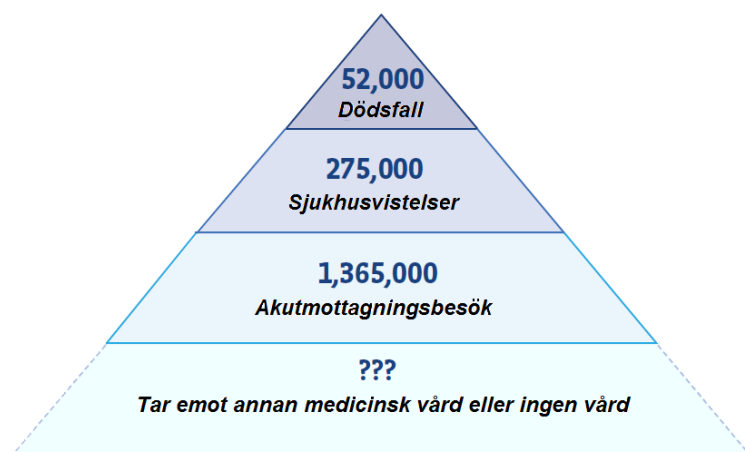
2. TEORETISK REFERENS RAM

I det här kapitlet behandlas den teori som legat till grund för de val som har gjorts i arbetet såsom materialval, tillverknings teknik och utformning av huvudmodellen.

2.1 Statistik över traumatiska hjärnskador

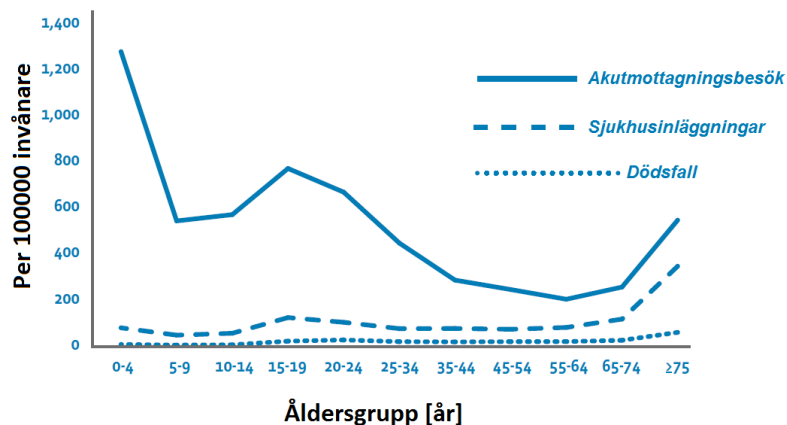
En traumatisk hjärnskada (THS) kan uppstå då huvudet med stor kraft slår i ett föremål, alternativt ett föremål träffar huvudet. Hjärnskadan kan bli allt från lindrig vilket exempelvis kan göra att personen blir trött, får yrsel eller förlorar medvetandet en kort stund, [1] till svår vilket betyder att personen förlorar medvetandet i mer än 6 timmar. [2]

Varje år besöker drygt 20000 personer akutmottagningarna i Sverige på grund av en THS. [3] Antalet akutmottagningsbesök i USA på grund av en THS var i genomsnitt 1365000/år under åren 2002-2006. I genomsnitt lades det in 275000 personer på sjukhuset samt 52000 dog per år, vilket illustreras i figur 2.1. [4] År 2000 beräknades den totala kostnaden på grund av THS i USA till ca 60 miljarder dollar. [5]



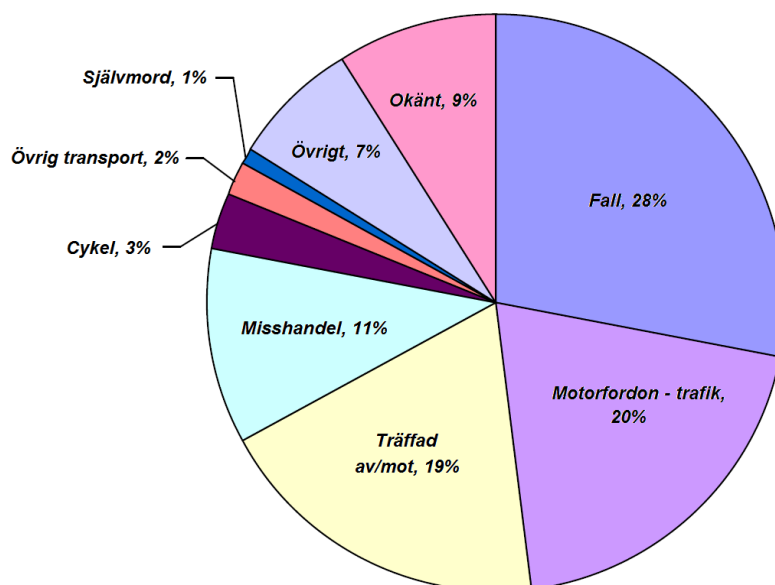
Figur 2. 1 - Genomsnittligt antal dödsfall, sjukhusvistelser och dödsfall per år i USA under åren 2002-2006. [4]

I figur 2.2 visas antalet akutmottagningsbesök, inläggningar på sjukhus och dödsfall på grund av THS per 100000 invånare och år i USA under åren 2002-2006. De som löper störst risk för THS är barn, äldre ungdomar samt personer över 65 år. I samtliga åldersgrupper är män överrepresenterade. I genomsnitt löper männen ca 1,4 gånger större risk för att drabbas av en THS än kvinnor. [4]



Figur 2. 2 - Antalet akutmottagningsbesök, sjukhusinläggningar och dödsfall per 100000 invånare och år i USA under åren 2002-2006 för olika åldersgrupper. [4]

Den procentuella uppdelningen av orsaker till en THS i USA under åren 1995-2001 ses i figur 2.3. I den ses att fall var den vanligaste orsaken till en THS (28 %), motorfordonsrelaterade THS var näst vanligast (20 %). Kategorin där huvudet har kolliderat med ett antingen fast eller rörligt föremål var den tredje vanligaste orsaken till en THS (19 %), men stod bara för 2 % av sjukhusinläggningarna och 1 % av dödsfallen. [6]



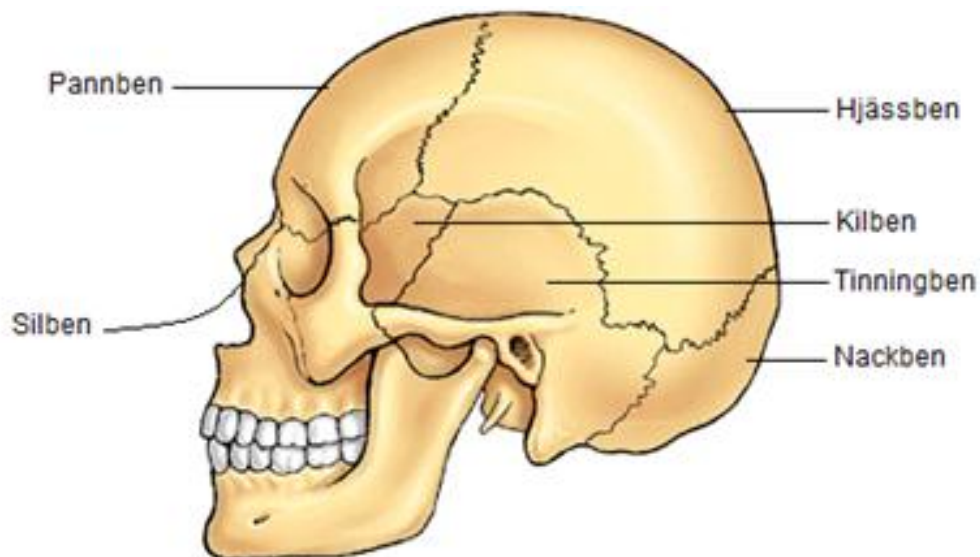
Figur 2. 3 - Fördelning av orsaker till THS relaterade akutmottagningsbesök, sjukhusinskrivningar och dödsfall i USA under åren 2002-2006. [6]

2.2 Skelettets egenskaper och konstruktion

Ben är en levande vävnad, vilken förnyas och ändrar form under hela livet. Upp till ca 30 års ålder ökar människans benmassa, för att därefter minska på grund av att skelettet släpper ifrån sig mer kalk än det tar upp. [7]

Ben består av benvävnad och kalciumkristaller. Benvävnaden är uppbyggd av celler som styr dess uppbyggnad samt av benmatrix som består av kollagenfibrer och hydroxiapatit. Kollagenfibrerna är en slags bindväv och hydroxiapatit består i huvudsak av kalcium och fosfat. Detta ger benvävnaden dess böj-och draghållfasthet. [8]

Människans kranium består av hjärnskålen, som är den del som omger och skyddar hjärnan, och ansiktsskelettet. Totalt består kraniet av 29 ben. Hjärnskålens ben är två hjässben, två tinningben, pannbenet, nackbenet, kilbenet och silbenet som består av två ben som tillhör både hjärnskålen och ansiktsskelettet, se figur 2.4. Skallens ben sitter ihop med varandra med hjälp av sågtandade kanter förutom underkäken som är ledad med tinningbenet. [9]



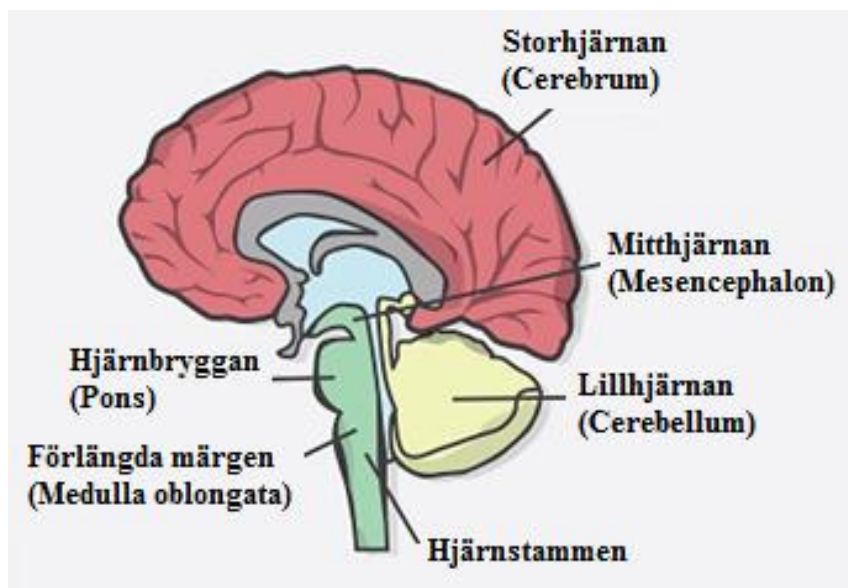
Figur 2. 4 - Hjärnskålens ben. [9]

Skallens elasticitetsmodul skiljer sig på olika ställen, men generellt ligger den mellan 15-25 GPa. Dess skjuvmodul har också en stor spridning, mellan 3-8 GPa, där den är störst på tinningbenet och nackbenet. Poissons tal, som är kvoten mellan ett materials ändring i längden och ändring i tjockleken när materialet dras ut, ligger mellan 0,05 och 0,6. [10] Benets brottseghet, vilket är motståndskraften för sprickbildning när materialet utsätts för spänning, ligger på 3-10 MPa*m^{1/2}. I jämförelse har medelkolhaltigt stål en brottseghet på ca 12-92 MPa*m^{1/2}. [11]

2.3 Hjärnans anatomi

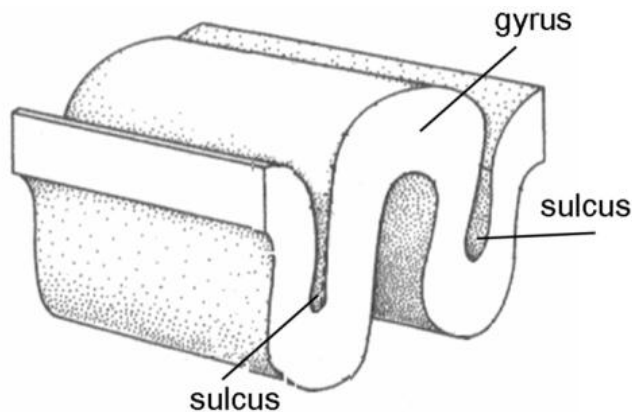
Den mänskliga hjärnan väger ca 1350 gram och har en volym på ungefär 1260 cm³ hos män, och har en vikt på ca 1200 gram och en volym på ca 1130 cm³ hos kvinnor. Vikten ökar under de första 20 åren och håller sig relativt konstant fram till personen är 50 år då vikten börjar minska. Vikten anses inte ha någon betydelse för personens intelligens.

Hjärnan kan förenklat delas upp i följande delar: Storhjärnan (latin: cerebrum), Lillhjärnan (cerebellum), och hjärnstammen (truncus encephali), [12] se figur 2.5.



Figur 2. 5 - Hjärnans delar. [13]

Storhjärnan är den största och mest komplexa delen i det centrala nervsystemet (vilket innefattar hjärnan och ryggmärgen). [14] Storhjärnan består av två halvor, hemisfärer, som är åtskilda av en djup fåra som kallas för den längsgående hjärnspringan (fissura longitudinalis cerebri). [12] Den yttersta delen av storhjärnan är en tunn mantel av grå materia som kallas för hjärnbark (cerebral cortex) vilken har en veckad yta. Vindlingarna i vecken kallas för gyri och fårorna kallas för sulci, eller fissurer om de är väldigt djupa, ett par veck syns i figur 2.6. Under hjärnbarken finns vit materia som består av axoner vilka är nervceller som skickar signaler mellan olika delar av storhjärnan, hjärnbarken och andra system såsom hjärnstammen och rygggraden. De innersta delarna av storhjärnan består av grå materia som kallas basala ganglierna. [14]



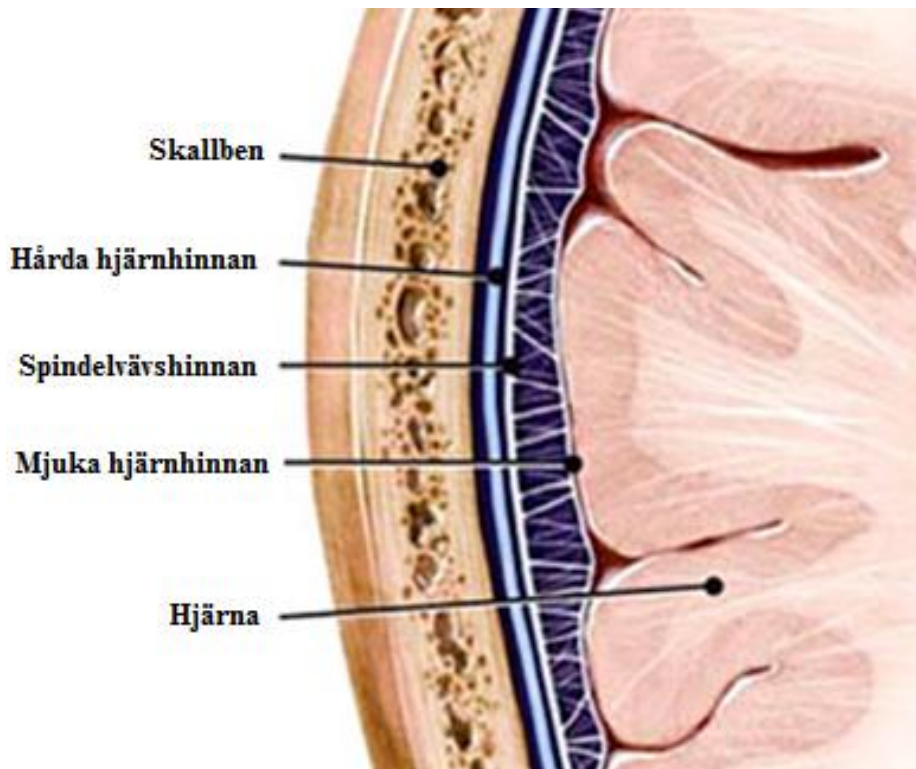
Figur 2. 6 - Gyri och sulci. [15]

Lillhjärnan är den näst största delen av hjärnan och ligger under de bakre delarna av storhjärnan. Även den består av två hemisfärer. Halvorna är täckta av en grå materia som kallas cerebellar cortex. Under cortex finns vit materia, och under det finns grå materia (cerebellar nuclei) med axoner som är kopplade till cerebral cortex. Lillhjärnan är kopplad till hjärnstammen via nerver som kallas cerebellar peduncles.

Hjärnstammen kopplar ihop ryggraden med mellanhjärnan (diencephalon), och mellanhjärnan kopplar i sin tur ihop storhjärnan med hjärnstammen. Mellanhjärnan består av mitthjärnan, hjärnbryggan (pons) och förlängda märgen (medulla oblongata) och har en struktur som liknar den hos ryggraden. Hjärnstammen innehåller ett nätverk av nervceller som spelar en viktig roll i att hålla personen vid liv. [14]

Det finns ett hålrum i hjärnan och ryggmärgen som på vissa ställen utvidgas till så kallade ventriklar. Det finns en ventrikel i vardera hemisfären i storhjärnan som är länkade till den tredje ventrikeln i mellanhjärnan. Den är i sin tur kopplad via en smal kanal, cerebralakvedukten (aqueductus cerebri), till den fjärde ventrikeln som ligger mellan lillhjärnan, hjärnbryggan och förlängda märgen. I den fjärde ventrikeln finns förbindelser till hjärnans yta och till en kanal i ryggmärgen. [12] Ventriklarna utsöndrar en vätska som kallas cerebrospinalvätska (CSV). En vuxen person har ca 125 ml CSV, varav 50 ml finns i ventriklarna och 75 ml finns i ryggraden och runt hjärnan. All CSV förnyas tre till fyra gånger per dygn. Hjärnan är omsluten av CSV vilken transporterar näringsämnen till hjärnan och dämpar mekaniska tryckvågor mot hjärnan.

Mellan hjärnan och kraniet finns tre hinnor (meninges), vilkas position visas i figur 2.7. Hinnornas huvudfunktion är att skydda hjärnan mot slag, tryckvågor och friktion mot skallen. Hinnan närmast hjärnan kallas för mjuka hjärnhinnan (pia mater) och är fäst vid hjärnan. Spindelvävshinnan (arachnoidea) ligger utanför mjuka hjärnhinnan och är fullt av blodkärl som bildar ett nät. Området under spindelvävshinnan, ovanför mjuka hjärnhinnan, kallas för subarachnoidalrummet och det är där som CSV runt hjärnan finns. Den yttersta hinnan, precis vid kraniets insida, kallas för hårda hjärnhinnan (dura mater). Det är ett tjockt och oelastiskt membran som bildar skiljeväggen mellan storhjärnans hemisfärer. [14]



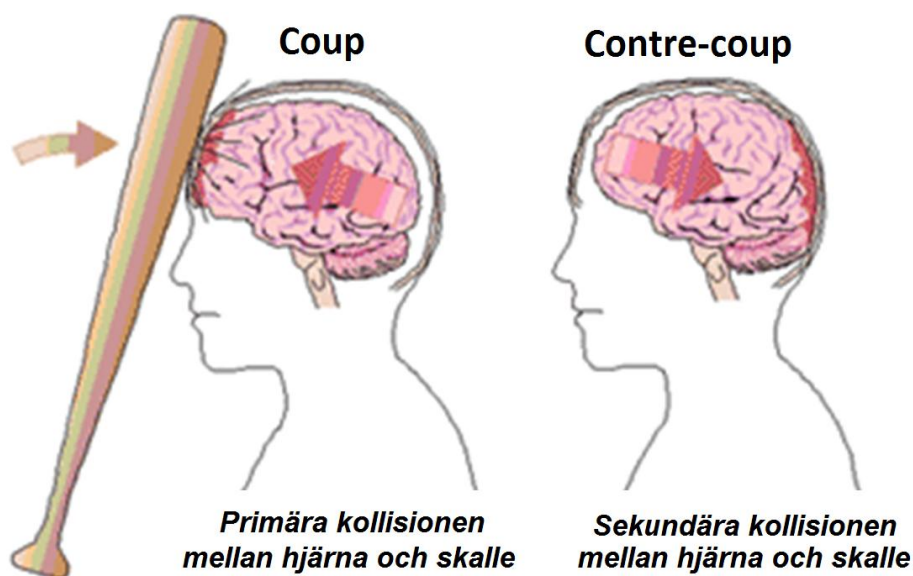
Figur 2. 7 - Hinnornas läge. [16]

2.4 Olika typer av traumatiska hjärnskador

THS delas ofta in i fokala (en begränsad del av hjärnan har blivit skadad) och diffusa hjärnskador (flera områden av hjärnan har blivit skadat). [17] I detta kapitel beskrivs de fokala hjärnskadorna kontusion, hjärnblödning, subduralblödning, subarachnoidalblödning och extraduralblödning samt de diffusa hjärnskadorna hjärnskakning och diffus axonskada.

2.4.1 Kontusion

Om ett huvud plötsligt accelereras, exempelvis till följd av ett slag mot huvudet riskerar hjärnan att komma i kontakt med skallen. Då kan ett blåmärke uppstå på hjärnan, även kallat kontusion. Beroende på var kontusionen uppstår får skadan olika namn, exempelvis coup- och contre-coupskador. [18] Om till exempel pannbenet utsätts för en kollision kommer hjärnan att röra sig framåt relativt skallen. När hjärnan slår i pannbenet uppstår en coupskada och när sedan hjärnan studsar tillbaka och slår i den motsatta sidan av kraniet uppstår en contre-coupskada. [17] Detta illustreras i figur 2.8. När hjärnan slår i skallen uppstår blåmärken, hjärnblödning och uppsvullnad av hjärnvävnaden. [19]



Figur 2. 8 - Illustrerande bild av den primära coupskadan och sekundära contre-coupskadan. [20]

2.4.2 Hjärnblödning

En hjärnblödning, även kallat hemorragiskt slaganfall inträffar då ett blodkärl antingen i hjärnan eller mellan någon av de tre hjärnhinnorna som omger hjärnan spricker. Detta ger skador på hjärnan både hos den del av hjärnan som blodkärlet skulle försörja samt i området kring kärlets spricka på grund av förhöjt tryck [21]. Det ökade trycket kan orsaka allvarliga hjärnskador samt dödsfall. [18]

2.4.3 Subduralblödning

När ett blodkärl mellan den mellersta och yttre hjärnhinnan brister har en subdural hjärnblödning inträffat. Detta kan inträffa till följd av ett slag mot huvudet och drabbar främst äldre personer. Ibland händer det att blodet stelnar (levrar) så att blödningen upphör vilket gör att de direkta skadorna kan utebli. Men det levrade blodet löses upp och drar till sig mer vätska vilket ger förhöjd volym och tryck. Det kan ta veckor till månader innan det ökade trycket gör att den skadade personen drabbas av exempelvis glömska, förlamningar, illamående och balansproblem. [21]

2.4.4 Subarachnoidalblödning

En subarachnoidal hjärnblödning inträffar mellan inre och mellersta hjärnhinnan, oftast på grund av att en utvidgning i ett blodkärl spricker. Subarachnoidalblödning drabbar främst personer i övre medelåldern och ger den drabbade plötslig huvudvärk, ibland kombinerat med exempelvis ljuskänslighet, förlamningssymtom och talsvårigheter. Efter en subarachnoidalblödning kommer ofta en ny inom några timmar eller dagar. Denna gång ofta livshotande. [21]

2.4.5 Extraduralblödning

Då huvudet utsätts för yttre våld kan en extradural hjärnblödning inträffa, vilket betyder att ett blodkärl mellan skallen och den yttre hjärnhinnan har brutit. Den drabbade, som vanligtvis är barn eller ungdom är oftast vid fullt medvetande till en början, men tillståndet försämras sedan snabbt och den skadade blir exempelvis medvetslös eller förvirrad. [21]

2.4.6 Hjärnskakning

Akutmottagningarna i Sverige tar årligen emot knappt 17000 personer som drabbats av hjärnskakning. [22] Den som drabbas blir direkt efter våldet mot huvudet medvetslös, men får vanligtvis snart tillbaka medvetandet. [23] Hjärnskakning orsakas av att hjärnan kommer i kontakt med skallen vilket får hjärn- och nervcellerna att skicka iväg en stor mängd signaler vilket ger en kemisk obalans i hjärnan. Detta kan orsaka hjärncelldöd och att hjärnans nätverk förändras. [24]

2.4.7 Diffus axonskada

Diffusa axonskador orsakas av skjuvkrafter på hjärnan till följd av plötslig acceleration av huvudet, exempelvis i bilkrascher samt skakande av barn ("shaken baby syndrome"). Skjuvkrafterna gör så att nervcellernas utskott (axoner), med vilka nervcellerna har förbindelse med andra celler skjuvas, tånjs och eventuellt bryts. [25] Diffusa axonskador kan leda till allt från lindriga och övergående symtom till allvarliga hjärnskador eller döden. [26]

2.5 Förklaring av kvantitativ metod för materialval

Vid framtagning av vilket material som är mest lämpat att tillverka en produkt i kan en kvantitativ metod för materialval användas. I metoden tas många olika egenskaper i åtanke såsom pris, densitet och mekaniska egenskaper. På grund av detta blir man ofta tvungen att kompromissa och väga materialens fördelar mot dess nackdelar.

Det första steget i metoden är ställa upp krav som materialet måste uppfylla. För att göra detta måste man fråga sig vad produkten är för något, vad den förväntas kunna utföra samt hur den gör det. Exempelvis kan kraven utgöras av att materialet ska vara genomskinligt eller att det ska ha en elasticitetsmodul på minst 10 GPa. När kraven har preciserats används dessa för att eliminera material som inte klarar av dem. Kraven kan sedan kompletteras med önskemål. Dessa behöver inte vara uppfyllda av materialen utan rangordnas utifrån deras relativa betydelse för att användas senare i metoden. Ett av önskemålen kan vara priset. Dock behöver inte det billigaste materialet innebära att produkten kommer att bli billigast. Om ett billigare material kräver en tillverkningsteknik som är dyrare än den hos ett dyrare material, kan det dyrare materialet ändå leda till att den färdiga produkten i slutändan blir billigare. Andra exempel på önskemål kan vara densitet och brottseghet.

Kvoterna styrka per kostnad och elasticitetsmodul per kostnad kan användas då styrka respektive elasticitetsmodul är en viktig egenskap. Om man tänker sig en balk med en given längd L och styrka S som ska bära upp en dragkraft F , kan tvärsnittsarean A fås genom följande ekvation:

$$A = \frac{F}{S} \quad (1)$$

Kostaden per styrka, K, för materialet kan skrivas:

$$K = C\rho AL = (C\rho FL)/S \quad (2)$$

Där C=materialets kostnad per massenhet

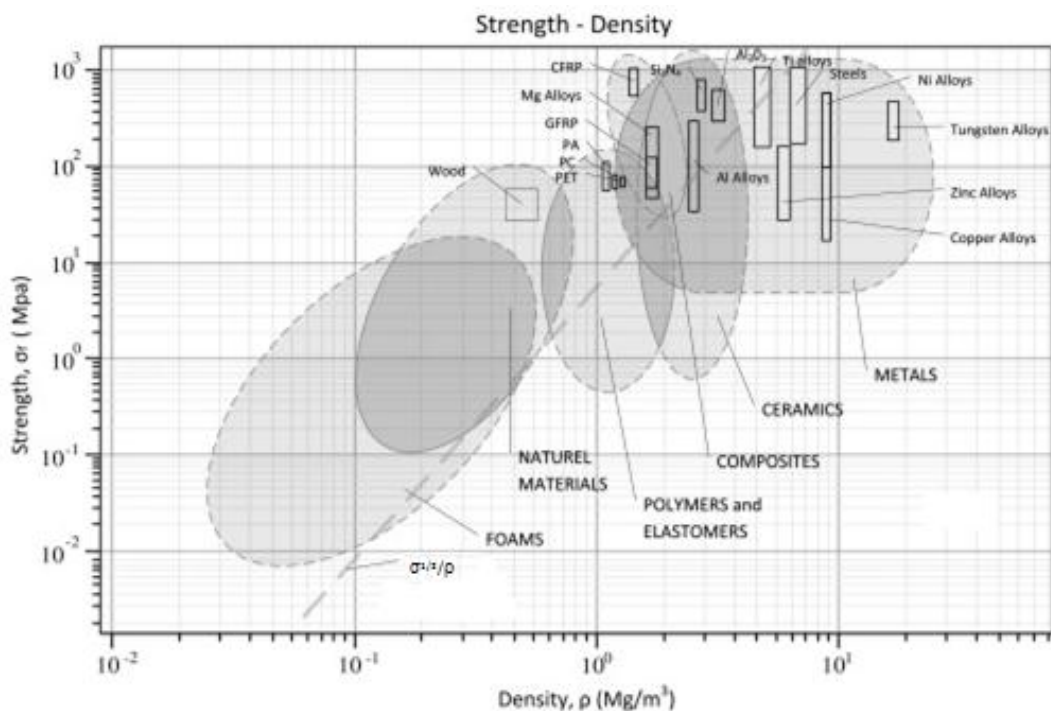
ρ =materialets densitet

Eftersom balkens längd L och dragkraften F är konstanta och inte beror på materialet kan dessa strykas från (2) och då erhålls följande ekvation:

$$K = C\rho/S \quad (3)$$

Ju lägre kvoten K är, desto bättre är materialet i den här aspekten. Kvoten ändras beroende på balkens utformning samt hur den belastas. Till exempel så kan K beräknas till $C\rho/S^{2/3}$ om en massiv cylinder utsätts för ett böjande moment.

Är man inte intresserad av priset utan endast av hållfastheten kan C strykas ur (3). Om kvoten ρ/S inverteras till S/ρ vill man istället maximera denna. Om den här nya kvoten sätts in i ett så kallat Ashbydiagram, som ritar upp ett stort antal material utefter två axlar med varsin valfri materialegenskap, fås en linje genom diagrammet med en viss lutning. Ett exempel på en sådan linje ses i figur 2.9. De material som ligger längs linjen är lika hållfasta, de som ligger ovan är starkare och de som ligger under är mindre hållfasta.



Figur 2. 9 - Exempel på Ashbydiagram. [27]

När man endast har ett fåtal material kvar från gallringen kan man lägga in dem i en matris där man multiplicerar viktfaktorn, som är ett tal som jämför betydelsen hos ett önskemål med de andra önskemålen, med det numeriska värdet för önskemålet. Viktfaktorn fås genom att jämföra två olika önskemål och ge poäng till önskemålen beroende på hur viktiga de är i förhållande till varandra, se tabell 1. I tabellen nedan är summan av poängen 10 och den egenskap som är viktigast får mest poäng. Detta upprepas tills att alla önskemål har jämförts med varandra. Därefter summeras alla poäng för varje önskemål och divideras med det totala antalet poäng, i det här fallet 100, för att slutligen få varje önskemåls viktfaktor α .

Tabell 1 – Exempel på tabell vid framtagande av viktfaktor.

Krav	1	2	3	4	5	Summa	Viktfaktor α
1		3	6	1	5	15	0,15
2	7		4	9	2	22	0,22
3	4	6		3	5	18	0,18
4	9	1	7		4	21	0,21
5	5	8	5	6		24	0,24
						100	1,00

Eftersom de numeriska värdena kan variera mycket för olika önskemål så kommer betydelsen för varje önskemål inte bli så viktig som viktfaktorn visar, till exempel kan densiteten ligga på tusentals kg/m^3 medan friktionskoefficienten sällan ligger över 1. Detta åtgärdas genom att skala de numeriska värdena så alla ligger mellan samma intervall för alla önskemål. Detta görs med hjälp av följande ekvationer:

- Då egenskapen ska maximeras, till exempel brottseghet:

$$\begin{aligned}
 \text{Normaliserat värde} &= \\
 &= \frac{\text{Numeriskt värde på egenskapen} \cdot 100}{\text{Maximalt numeriskt värde på den aktuella egenskapen}} \quad (4)
 \end{aligned}$$

- Då egenskapen ska minimeras, till exempel pris:

$$\begin{aligned}
 \text{Normaliserat värde} &= \\
 &= \frac{\text{Minimalt numeriskt värde på den aktuella egenskapen} \cdot 100}{\text{Numeriskt värde på egenskapen}} \quad (5)
 \end{aligned}$$

Ibland kan vissa önskemål sakna numeriska värden, till exempel genomskinlighet. Då måste man införa ett poängsystem där varje grad av genomskinlighet ger ett visst antal poäng.

Materialets numeriska värde för varje önskemål multipliceras sedan ihop med det aktuella önskemålets viktfaktor. Slutligen läggs dessa tal ihop för varje material och det material som får det högsta värdet har de bästa egenskaperna för produkten. [28]

2.6 Tillverkningsmetoder för plaster

Inte bara skallmodellens material ska väljas utan även en tillverkningsmetod. I detta delkapitel ges en kortare förklaring kring några tillverkningsmetoder av plastprodukter.

2.6.1 Formsprutning

Formsprutning är den vanligaste tillverkningsmetoden av plast. Den används vid styckvis serietillverkning av detaljer från några mikrogram till ca 30 kg. Exempelvis formsprutas instrumentbrädor och köksredskap men även mer komplicerade geometrier som exempelvis bestickkorgar till diskmaskiner, se figur 2.10. [29]



Figur 2.10 - Formsprutad bestickkorg. [29]

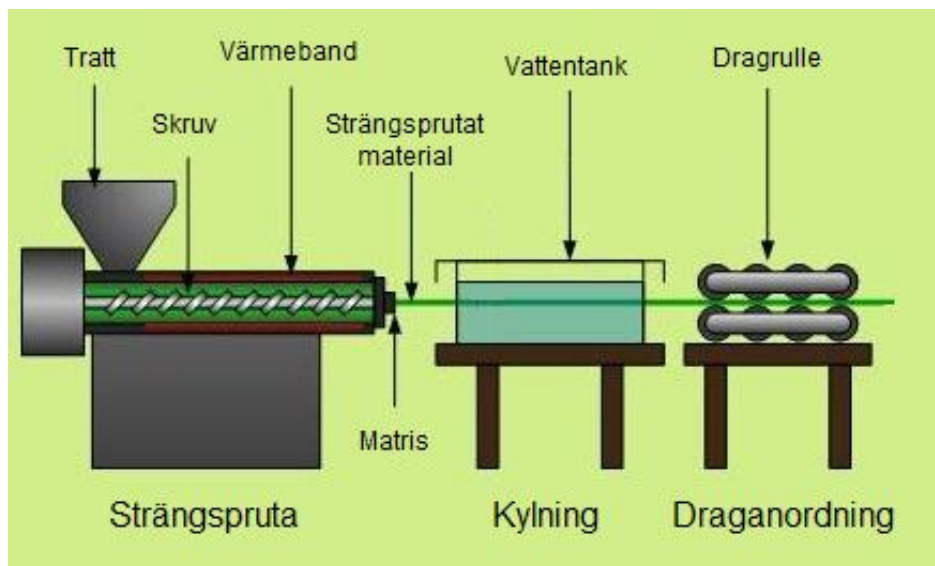
Vid formsprutning av termoplast (även hårdplaster och gummi-material kan formsprutas på ett liknande sätt) sprutas smält plast in i en gjutform. Trycket i formen är relativt högt, normalt 50-150 MPa, vilket gör att det krävs en stor låskraft för att hålla ihop formhalvorna (20kN-50MN). [30] När den smälta plasten träffar formens väggar stelnar den. Tillverkningen av en detalj kan ta från mindre än en sekund till några minuter, beroende på kvalitetskrav och tjocklek.

Negativt med formsprutning är att formen kan bli väldigt dyr att ta fram, men vid stora serier är det en lämplig tillverkningsmetod. En fördel med tillverkningsmetoden är att den formsprutade detaljen sällan behöver någon efterbehandling. [29]

2.6.2 Extrudering

Extrudering, även kallat strängsprutning är den näst vanligaste bearbetningsmetoden av plast. [30] Vid extrudering pressas smält plast med hjälp av skruvmatning genom en matris för att därefter kylas av för att behålla ett tvärsnitt likt matrisen, se figur 2.11. Metoden används för att tillverka ändlösa produkter, så som skenor, lister, rör, profiler, plastisolerad kabel med mera, vilka sedan kapas till önskad längd. [31]

Negativt med metoden är att matrisen kan vara dyr att ta fram och att endast produkter med konstant tvärsnitt kan tillverkas. Fördelen med extrudering är att när man har verktyget är själva tillverkningen billig, med andra ord lönsam vid större serier. En annan fördel är att man kan extrudera flera plaster samtidigt, så kallad samextrudering. På detta sätt kan exempelvis fönsterskrapor med en hårdplastlist och en kant av gummi tillverkas i ett stycke. [29]

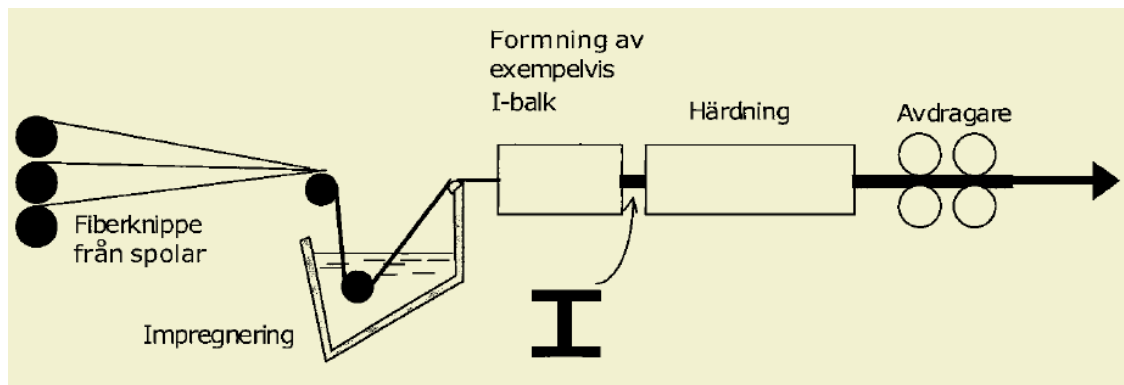


Figur 2.11 - Schematisk bild av extrudering. [32]

2.6.3 Profildragning

Profildragning är väldigt lik extrudering, men istället för att pressa ut plasten så dras den genom matrisen. Metoden används framför allt vid tillverkning av fiberarmerade plastprofiler. [29] Glasfiberhalten är vid tillverkning av plattor och vissa profiler (ex. I och T) 25-75 viktsprocent, medan glasfibern står för drygt 75 viktsprocent vid tillverkning av runda stavar. Vanligast att profildra är glasfiberarmerad omättad polyester.

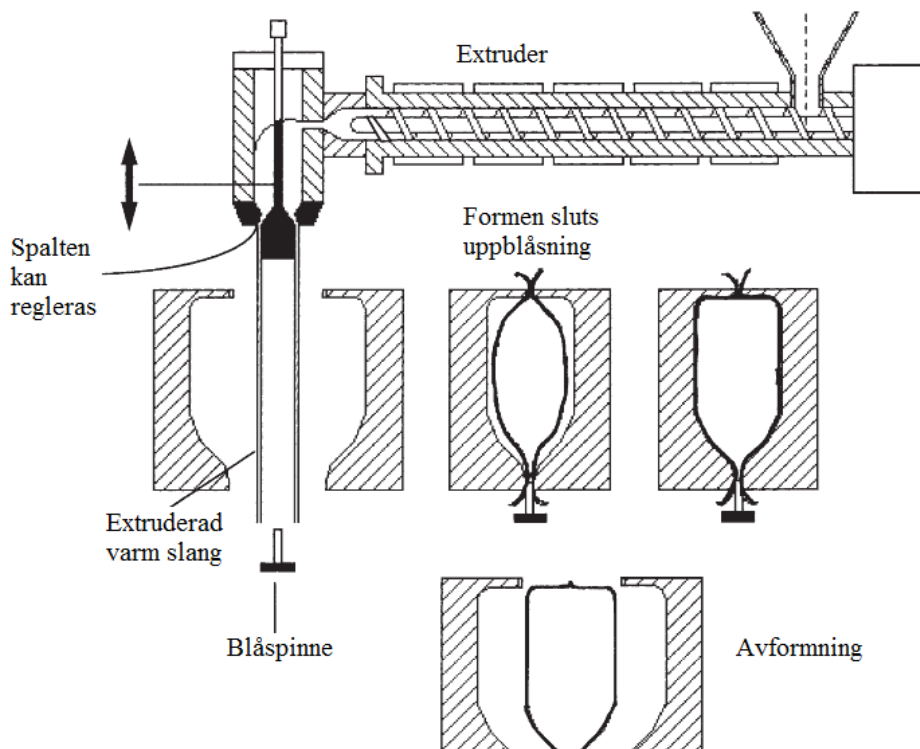
Vid tillverkningen impregneras först fibern för att sedan ta sig igenom en matris med önskat tvärsnitt. Därefter härdar plasten innan den kommer till avdragaren, vilken är den kraftanbringaren som drar hela processen, se figur 2.12. Hastigheten vid profildragning är 2-50 m/h beroende på profilens geometri och storlek. [33] Jämfört med extrudering får man fördelen att man kan säkerställa en specifik draghållfasthet redan vid tillverkningsprocessen. [29]



Figur 2.12 - Schematisk bild av profildragning. [33]

2.6.4 Formblåsning

Formblåsning används främst vid tillverkning av termoplastprodukter i mycket stora volymer (100000–1000000 st). [34] Exempelvis tillverkas hålkroppar, flaskor, ventilationskanaler, leksaker med mera. Plastsmälta pressas genom en extruder och ett munstycke i slutet på extrudern formar smältan till en mjuk slang, se figur 2.13. Två formhalvor sluts kring slangens och knips runt en blåspinne i den nedre änden av slangens. Slangen blåses upp inuti den slutna formen som bildar den önskade formen som sedan kyls. Man kan också knipa åt slangens i den nedre änden istället för att använda blåspinnen, och då skickas istället slangens iväg till en annan station för uppblåsning. [35]



Figur 2.13 - Schematisk bild av formblåsning. [35]

2.6.5 Rotationsgjutning

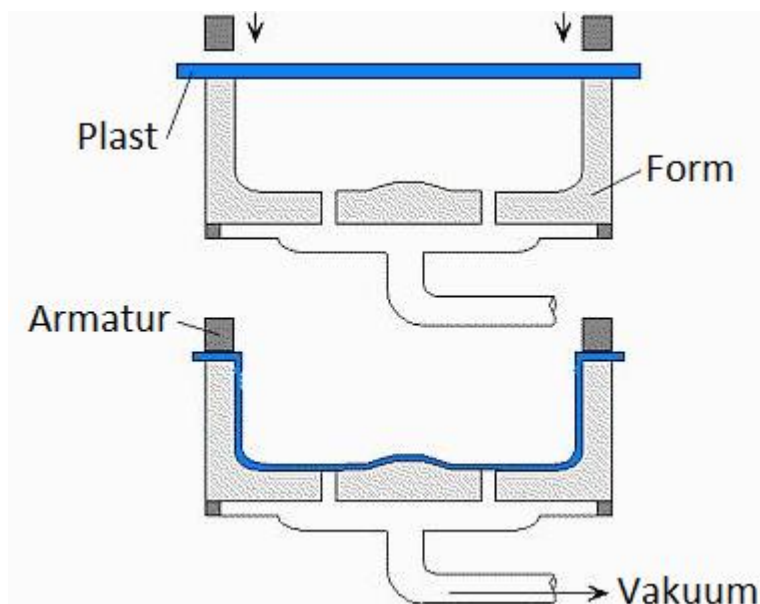
Rotationsgjutning utförs genom att man häller pulver eller granulat av termoplast i en form som roterar med cirka 15 varv per minut. Formen värms upp så att plasten börjar smälta som då fyller formen. Därefter kyls formen ner och den ihåliga plastdelen tas ut. Den här metoden används för att tillverka exempelvis leksaker och skyltdockor. fördelarna är bland annat att formarna är billiga och produkterna är nästan spänningsfria. En nackdel är att formen på produkten inte får vara för komplex. [36]

2.6.6 Gjutning

Gjutningsprocessen börjar med att man tillverkar en ihålig gjutform som man sedan fyller med smälta av det material som man vill att den gjutna produkten ska vara gjord av. När materialet har stelnat tar man helt enkelt ut produkten ur formen. En nackdel med processen är att det kan uppstå luftbubblor mellan formen och smältan när man häller i det. Detta kan orsaka försämrade hållfasthetsegenskaper hos produkten. En annan nackdel är att man inte kan gjuta vilka material som helst, har materialet en för hög smältpunkt kan det kräva en annan tillverkningsmetod. fördelarna är bland annat att man kan tillverka produkter med mycket komplicerade former och formerna är relativt billiga och går snabbt att framställa. [37]

2.6.7 Termoformning

Termoformning, även kallat varmformning eller vakuumformning, används genom att man värmer upp ett plastmaterial tills det mjuknar. Man vakuumsuger eller pressar med tryckluft ner plasten i en form som då kyls av och stelnar, se figur 2.14. Den här tillverkningsmetoden tillämpas ofta vid tillverkning av tunnväggiga produkter som rör och innerväggar i kylskåp. Det är en mycket enkel tillverkningsmetod men produkter kan få oönskade tjockleksojämheter. En annan nackdel är att inre spänningar ofta byggs in i plastdetaljen. [30]



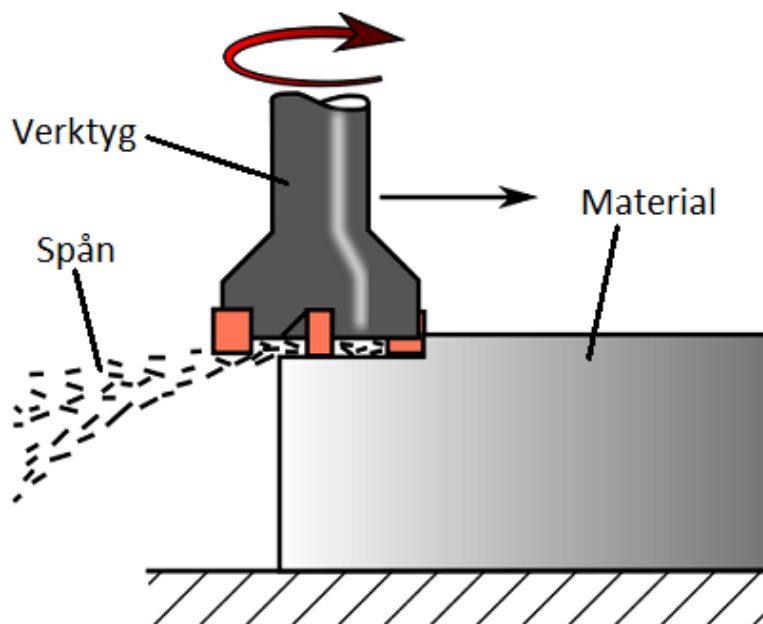
Figur 2.14 - Schematisk bild av termoformning. [38]

2.6.8 Rapid prototyping

Rapid prototyping (RP) är en process som tillverkar en modell utifrån en tredimensionell datormodell (CAD-modell). Maskinen delar upp ritningen i ungefär 0,1 mm tunna lager, och sedan bygger den upp modellen lager för lager. [39] Många olika material kan RP-formas och plastdetaljer kan tillverkas på olika sätt, med både hårdplaster och termoplaster, i smält form och i pulverform. [40] Plasten kan härdas på olika sätt, till exempel med en laser eller UV-ljus. Metoden används bland annat för att tillverka prototyper och verktyg och lämpar sig mycket bra för småskalig tillverkning och komplicerade produkter. Ordet ”rapid” (snabb) kommer från att tillverkningen går snabbare än de flesta andra tillverkningsmetoder, mellan tre och 72 timmar. En nackdel med metoden är att man generellt inte kan tillverka produkter som är större än 0,125 m³. Det blir också dyrt att tillverka i stor skala och i okomplicerade former jämfört med andra tillverkningsmetoder. [39]

2.6.9 Fräsning

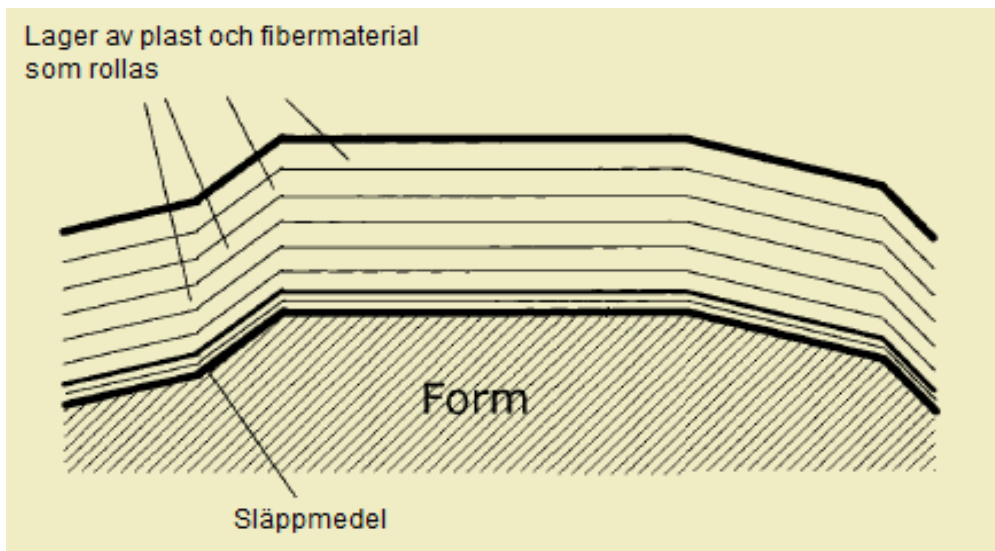
Vid fräsning skär ett snabbt roterande verktyg ut en önskad form av en produkt ur ett materialstycke. Verktyget och/eller materialet rör sig långsamt runt varandra, antingen manuellt eller datorstyrt med hjälp av en CNC-maskin, för att formen ska vara möjlig att skära ut. Verktyget skär ut tunna strängar, spån, ur materialet, se figur 2.15. En 5-axlig fräsmaskin krävs för att verktyget ska kunna ställas in på alla vinklar för maximal åtkomlighet, men även 3- och 4-axliga maskiner används. [41] Metoden används för att tillverka axiellt osymmetriska produkter med olika attributer såsom hål eller fack. [42] Väldigt många material kan fräsas, till exempel metalliska material, epoxi och frigolit. [41] Det kan klara av snäva toleranser och ger bra ytfinish, så fräsning används ofta som avslutande process på produkter som redan har formats. En nackdel är att det är en dyr metod; Maskinerna är dyra och det blir mycket materialspill. Den kan inte heller klara av alltför komplicerade former. [42]



Figur 2.15 - Schematisk bild av fräsning [43]

2.6.10 Handupplägning

Vid handupplägning utgår man från en form som sedan penslas på med skikt av plast för hand. För att plasten inte ska fastna i formen används ett släppmedel. När man sedan har penslat på med ett skikt plast lägger man på fiber i form av matta eller väv för att förstärka det. En ruller används från centrum och utåt för att pressa ut luften. Efter rollningen består kompositen vanligtvis av 30 % fiber och 70 % plast. Detta upprepas tills man erhåller den önskade tjockleken på produkten, se figur 2.16. Den här metoden används för att tillverka produkter i korta serier, till exempel karosdetaljer och båtskrov. Metoden är billig men det kan vara svårt att få till rätt tjocklek på produkten. skallen. [44]

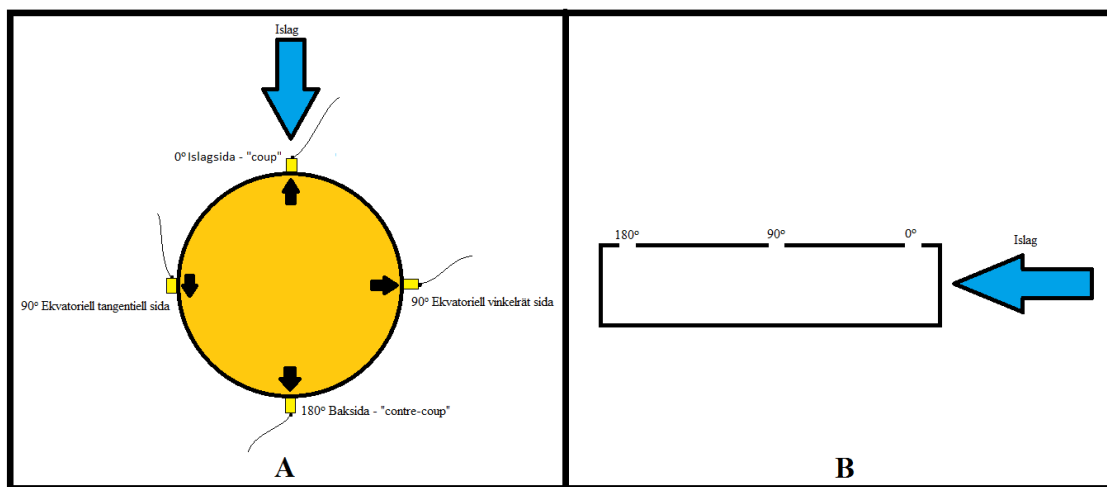


Figur 2.16 - Tvärsnitt av en handupplagd yta. [44]

2.7 Litteraturinventering över tidigare arbeten

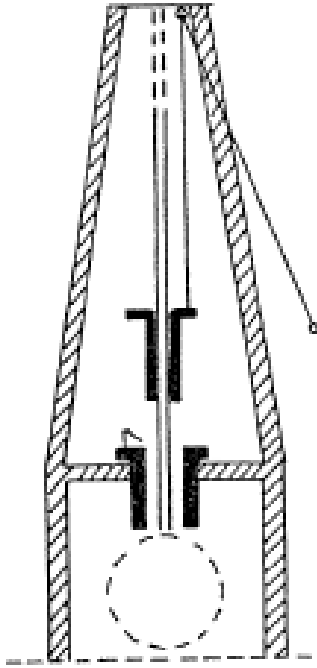
2.7.1 Experimental Studies of Mechanical Effects in Head Injury

Sten Lindgren undersökte år 1966 tryckändringar och accelerationer hos både skallmodeller och skallar från kadaver i samband med ett islag rakt framifrån. Skallmodellerna hade tillverkats på olika sätt. Av plast användes huvudmodeller i form av cylindrar, klot och halvklot. Han använde sig även av klotformade huvudmodeller i duraluminium. Skallarna från kadavren kom främst från vuxna personer. Accelerometrar placerades på olika platser på skallarna och vinklades på olika sätt beroende på var på skallen de befann sig. Figur 2.17.A visar indelningen för kloten och figur 2.17.B visar indelningen för cylindern.



Figur 2. 17 - Placering av accelerometrar

För att genomföra islagen användes ett antal olika testriggar som alla utförde islaget med hjälp av gravitationen som drivande kraft, antingen genom att en vikt faller på skallen, att skallen fästes i en pendel eller genom att skallen föll genom en typ av lodrät räls. En av riggarna visas i figur 2.18, där en ihålig cylindervikt av stål leds genom en stav och stoppas till slut av en metallring i samband med islaget mellan skallen och vikten.



Figur 2. 18 - Exempel på testrigg. [45]

I samband med islagen uppstod en tryckökning vid islagsidan, en liten förändring i tryck vid de ekvatoriella sidorna och en tryckminskning på baksidan för samtliga skallmodeller, både de konstgjorda och från kadavren. På islagsidan av skallarna föregicks ibland tryckökningen av en tryckminskning. Vid slutet av islagen uppstod ibland en tryckökning där det tidigare varit en trycksänkning och vice versa. [45]

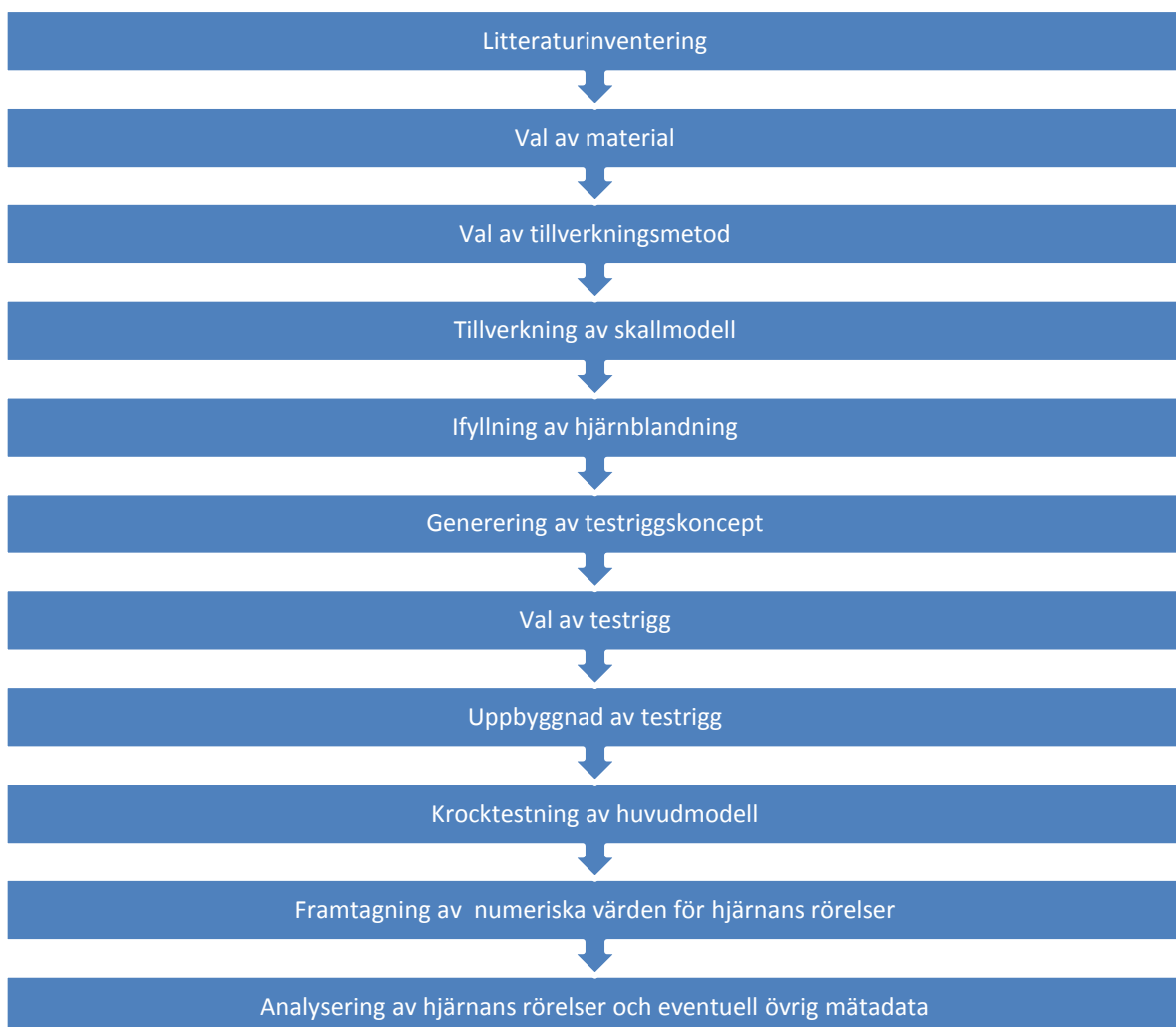
2.7.2 Physical modeling of brain and head kinematics

Johan Ivarsson studerade år 2002 hastighetssamband mellan en skalle som utsätts för en roterande rörelse med en skalle som utsätts för ett islag rakt framifrån. Detta för att se hur hjärnan påverkas av dessa två olika rörelser. Vid roterande rörelse kontrollerade han även risken för subduralblödning. Skivmodeller av skallen i genomskärning tillverkades av aluminium och hjärnorna bestod av gel. Skallen och hjärnan separerades av ett tunt lager paraffin så hjärnan inte skulle fästa i skallen. Då skallmodellerna utsattes för en rotationsaccelererande rörelse uppmättes skjuvspänningar, dragspänningar och deformationer i hjärnan. Det frontala islaget utfördes med en Hybrid III krockdocka som var fastsatt på en släde vilken krockades mot en aluminiumplatta och analyserades på samma sätt som de roterande modellerna. Resultatet han fick om varför CSV kan transportera skjuv- och dragspänningar blev att ventriklarna, som CSV flyter igenom, verkar skydda viktiga hjärnstrukturer från spänningar. Dessutom tycks rotationer av huvudet i coronalplanet (det plan som delar magen från ryggen) öka risken för subduralblödning på vänstra sidan av hjärnan om högra delen av huvudet är utsatt för ett islag och vice versa. [14]

3. METODÖVERSIKT

Till att börja med bestämdes hur detaljerad skalle som skulle krävas för att kunna utföra verklighetstroga krocktester i samband med analysering av coup/contre-coupskador. Detta gjordes genom att studera huvudets uppbyggnad och mekaniska egenskaper samt analysering av tidigare tester i vilka huvuden/huvudmodeller utsatts för plötsliga rörelser. Detta låg sedan till grund för de krav som ställdes på det materialet av vilket skallmodellen skulle tillverkas. Valet av material gjordes med hjälp av en kvantitativ metod, varefter en lämplig tillverkningsteknik valdes.

Tillverkningen av skallen utfördes på egen hand. Då skallen var tillverkad fylldes den med ett hjärnsubstut vilken hade mekaniska egenskaper likt en riktig hjärna. Därefter konstruerades en testrigg i vilken skallen krockades samtidigt som hjärnans rörelser filmades med en höghastighetskamera. Accelerometrar monterades på huvudmodellen så att huvudmodellens acceleration under islaget kunde analyseras. Hjärnans rörelser i förhållande till skallen togs sedan fram i ett rörelseanalysprogram varefter rörelserna studerades i en grafitande programvara. Arbetsstegen visas i figur 3.1.



Figur 3. 1 – Tillvägagångssätt för framtagning, test och analysering av huvudmodell.

4. VAL AV SKALLMATERIAL

Det material av vilket skallmodellen ska tillverkas i har bestämts genom att filtrera bort material som inte uppfyller de krav som ställs på materialet. Därefter väljs en tillverkningsmetod och med en kvantitativ metod för materialval bestäms sedan vilket material skallmodellen ska tillverkas i.

4.1 Kravprofil

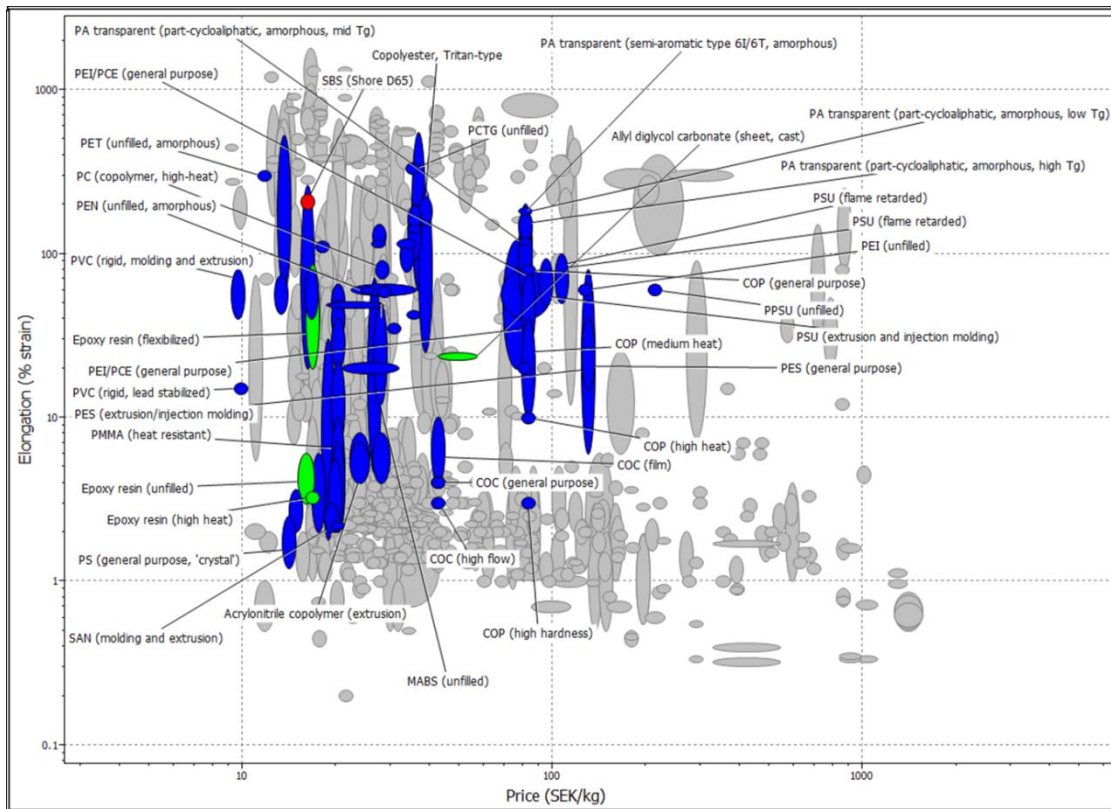
För materialet som skallmodellen ska tillverkas av gäller att det måste vara så pass genomskinlig att hjärnans rörelser kan observeras, ha tillräckligt hög brottseghet så att skallen inte spricker vid krocktestet samt vara möjligt att skapa en skallform av. Skallmodellen måste klara någon vätska eftersom hjärnan inuti en riktig skalle inte sitter fast mot skallbenen utan omges av en vätska som gör det möjligt för hjärnan att röra sig relativt skallen vilket är det vi vill kunna efterlikna. Den skall ha tillräckligt hög sträckgräns så att skallen inte deformeras vid krocken vilket gör att skallen kan användas till flera krocktest, den ska gå att få tag på och få tillverkad till rimliga kostnader och inom rimlig tid. I punktform blir detta:

- Genomskinlig
- Tillräckligt hög brottseghet
- Möjlig att få i formen av en hjärnskal vid rumstemperatur
- Klara av någon vätska
- Ej plastiskt deformeras vid krocktestet
- Material- och tillverkningskostnad inom rimliga gränser
- Gå att få tillverkad inom rimlig tid

4.2 Materialfiltrering i CES-databasen

När kraven var definierade sållades material ut ur CES-databasen, vilket är en databas över en stor mängd material och dess egenskaper. Ett maximalt pris på 500kr/kg sattes så att budgeten inte skulle knäckas. Därefter valdes en minimal elasticitetsmodul på 1 GPa eftersom materialet inte ska vara alltför lätt att deformera. Vidare sattes att materialet måste kunna töjas ut 0,6 % eller mer innan brott uppstår. Detta värde valdes eftersom ben har en töjning vid torrt tillstånd på 0,55–0,94 %. [46] Eftersom hjärnans rörelser ska observeras måste skallens material vara transparent. Ett annat krav var att materialet ska tåla vatten samt svaga syror och baser eftersom det mellan hjärnan och skallen bör finnas en vätskehinna, samt att det är osäkert om hjärnblandningen kommer vara basisk eller sur.

Utifrån dessa värden återstod 75 material i CES-databasen, varav 4 härdplaster, 1 termoplastiska elastomerer och 70 termoplaster, se figur 4.1. För att sälla bort ytterligare material studerades några olika tillverkningsmetoder för plaster.



Figur 4. 1 - Bubbeldiagram över material som uppfyller kraven. [46]

4.3 Summering av tillverkningsmetoder

Formsprutning, extrudering, profildragning och formblåsning är tillverkningsmetoder som lämpar sig vid tillverkning av produkter i stora serier, och är med andra ord ej lämpliga för tillverkning av en/ett fåtal skallar.

Termoformningen ger en godstjockleksvariation som är svår att kontrollera. Antagligen kommer det även att bli svårt att forma en termoplastskiva över en skallform utan att skivan veckar sig.

Att med hjälp av en RP-maskin tillverka skallen verkar vara en lämplig tillverkningsmetod eftersom den ofta används vid prototypframtagning. Chalmers har ett par stycken RP-maskiner, bland annat en i prototyplabbet. Dessvärre kan inte Chalmers RP-maskiner printa ut produkter i ett material som uppfyller de i kapitel 4.1 valda kraven, men vi blev tipsade om företaget 3D Medialab i Västerås från vilka Chalmers ibland beställer RP-framtagna produkter. Enligt företagets hemsida skulle dock en modell på 18*20*22 cm kosta drygt 100000 kr vilket är för dyrt. [47]

Handuppläggning är en tillverkningsmetod som är billig att utföra. Metoden används för fiberarmerade plaster, vilka vi inte har några kvar av i CES-databasen. Detta eftersom de inte uppfyller vårt genomskinlighetskrav. Möjligheten finns dock att pensla på plasten i flera skikt,

utan armering, tills önskad tjocklek uppnåtts. Det kan dock vara svårt att få till rätt tjocklek på skallen och tillverkningsmetoden kan bli mycket tidskrävande då endast ett tunt lager kan appliceras åt gången.

Gjutning verkar tillsammans med rotationsgjutning vara möjliga tillverkningsmetoder. Gjutning har nackdelen att det kan bildas luftblåsor i produkten och att en innerform (kärna) kommer behövas vilken kan komma att bli svår att få ur, medan rotationsgjutningen har nackdelen att tjockleken på skallmaterialet kommer bli svårt att få i den oregelbundenhet som önskas. Gjutningen har dock fördelen jämt mot rotationsgjutningen att det är en tillverkningsmetod som är lättare att utföra på egen hand, vilket gör det till en billigare tillverkningsmetod. Gjutning väljs därför som tillverkningsmetod.

4.4 Gjutning av termoplast?

I CES-databasen finns ett flertal termoplaster som skulle fungera som material till vår skalle. Eftersom vi anser att gjutning är den mest lämpliga tillverkningsmetoden gjordes ett litet test för att få en känsla huruvida det är möjligt att på egen hand gjuta i termoplast.

Lågdensitetspolyeten (PE-LD) är en plast med förhållandevis låg smältpunkt (98-115°C) och lågt pris, dessutom lätt att få tag på eftersom materialet bland annat används till plastpåsar.

[46] Vi tog därför en transparent plastpåse vilken lades i en kastrull som ställdes på spisen, se figur 4.2. Rökutvecklingen var hög, men plasten ville inte bli till en lättflytande vätska utan betedde sig mer som en seg klubbig massa, vilken inte skulle vara lämplig att gjuta med.

Försöket gjordes därför om. Denna gång med en matkasse märkt med PE-LD, men resultatet med denna påse blev identiskt med den föregående.



Figur 4. 2- Smältning av PE-LD.

I litteraturen bekräftas vårt labbresultat. Termoplaster är i smält form högviskösa. [30] Att gjuta en produkt som en skalle, med dess tunna godstjocklek kommer inte att gå att göra med termoplast. Dessa kan därför tas bort ur CES-databasens lista.

4.5 Material som uppfyller krav och tänkta tillverkningsmetod

När termoplasterna tagits bort finns fyra material kvar i listan, nämligen flexibel epoxi, oarmerad epoxi, värmehärdad epoxi och polyallyldiglycolkarbonat (CR-39).

Epoxi är en härdplast vars bas är nästan luktfri och härdare har en lätt doft. Epoxi har god vidhäftningsförmåga, den är transparent men kan färgas, och har bra mekaniska egenskaper. Epoxi används till beläggningar, lim och till kompositmaterial då det exempelvis armeras med kol- eller glasfiber. [48]

CR-39 är en härdplast som uppfanns år 1940. Under andra världskriget armerades den med glasfiber och användes för att tillverka bränsletankar till bombflygplanet B-17. Efter kriget användes CR-39 för att göra transparenta skivor, vilka bland annat användes till svetshjälmor och skyddsglasögon. Idag används materialet till plastlinser. [49]

4.6 Metod för materialval

För att få reda på vilket av de fyra materialen som är mest lämpligt att tillverka en skalle i gjordes en egenskapsmatrix. I egenskapsmatrixen multipliceras hur väl materialet uppfyller ett visst önskemål med hur viktigt önskemålet anses vara. Hur viktigt önskemålet är togs reda på genom att räkna ut vikt faktorn (α) med hjälp av digital-logikmetoden (DL), se tabell 2. Den går ut på att man uppskattar ett önskemåls betydelse jämfört med betydelsen hos ett annat önskemål och de får poäng beroende på hur viktiga de är i förhållande till varandra. Detta upprepas med alla kombinationer av två önskemål. När detta är klart summeras varje önskemåls poäng och antalet delas med det totala antalet poäng, i det här fallet 210, för att få varje önskemåls vikt faktor som ligger mellan 0 och 1. Summan av alla vikt faktorer blir 1.

Tabell 2 - Tabell i vilken vikt faktorn har tagits fram.

Krav	1	2	3	4	5	6	7	Summa	α
1		3	2	1	5	5	2	18	$\approx 0,085$
2	7		4	2	7	4	2	26	$\approx 0,124$
3	8	6		2	7	4	3	30	$\approx 0,143$
4	9	8	8		9	8	5	47	$\approx 0,224$
5	5	3	3	1		3	2	17	$\approx 0,081$
6	5	6	6	2	7		4	30	$\approx 0,143$
7	8	8	7	5	8	6		42	$\approx 0,204$

Därefter togs numeriska värden fram för de olika materialen vilka anger hur väl de uppfyller önskemålen. Eftersom de numeriska värdena inte är lika stora för varje önskemål så kommer betydelsen för varje önskemål inte bli så som var tänkt, till exempel för CR-39 så ligger

brottsegheten på $0,8825 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ medan sträckgränsen ligger på $30,35 \text{ MPa}$. För att få alla värdena att ligga på en skala mellan 0 och 10 så normaliserades dessa värden, se tabell 3. Detta gjordes med hjälp av de nedanstående två ekvationerna: [28]

- Då egenskapen ska maximeras, till exempel brottseghet:

$$\begin{aligned} \text{Normaliserat värde} &= \\ &= \frac{\text{Numeriskt värde på egenskapen} * 10}{\text{Maximalt numeriskt värde på den aktuella egenskapen}} \end{aligned} \quad [28] \quad (6)$$

- Då egenskapen ska minimeras, till exempel pris:

$$\begin{aligned} \text{Normaliserat värde} &= \\ &= \frac{\text{Minimalt numeriskt värde på den aktuella egenskapen} * 10}{\text{Numeriskt värde på egenskapen}} \end{aligned} \quad [28] \quad (7)$$

Tabell 3 - Poängsättning i hur väl de olika materialen uppfyller kraven.

Krav	Flexibel epoxi	Oarmerad epoxi	Värmehärdad epoxi	CR-39
1	6,67	6,67	6,67	10
2	10	2,3	2,1	3,3
3	10	10	10	10
4	10	10	10	10
5	7	9,4	10	5,3
6	10	9,7	9	2,9
7	10	10	8	9

Vissa egenskaper har inte några numeriska värden, till exempel genomskinlighet, så där har en skala från 0 till 3 införts, där 0 betyder att materialet är ogenomskinligt och 3 betyder att materialet har mycket god genomskinlighet. Värdet normaliseras sedan så att det hamnar inom 0-10 skalan.

Sedan multiplicerades varje materials numeriska värde med varje önskemåls viktfaktor, se tabell 4. Dessa tal lades sedan ihop för varje material och det som fick flest poäng är det bästa materialet för vårt ändamål.

Våra önskemål är:

1. Genomskinligt
2. Högt brottseghet
3. Möjligheten att få i formen av en hjärnskål vid rumstemperatur
4. Vätsketåligt
5. Högt sträckgräns
6. Låg material- och tillverkningskostnad
7. Kort tillverkningstid

Alla material får samma betyg angående formbarheten eftersom de är tillräckligt lättflytande för att fylla en gjutform. [50]

Tillverkning med de olika materialen antar vi kunna utföra själva, vilket gör att tillverkningskostnaden blir samma för de jämförda materialen. Priset per liter är ungefär 20 kr/liter för Epoxisorterna och 67 kr/liter för CR-39. [46] Den värmehärdade epoxin kräver dock en värmekälla under härdningsförloppet vilket gör att dess poäng sänktes med 0,5 poängenheter.

Tillverkningstiden för den värmehärdade epoxin sattes till en 8 eftersom den kräver någon form av värmeanläggning under härdningen vilket skulle ta viss tid att ordna. CR-39 fick ingen 10.a eftersom den verkar svår att få tag i vilket kräver att extra tid måste tillbringas för att hitta en återförsäljare.

Tabell 4 – Egenskapsmatrix.

Krav	Flexibel epoxi []	Oarmerad epoxi [-]	Värmehärdad epoxi [-]	CR-39 [-]
1	0,57	0,57	0,57	0,86
2	1,24	0,28	0,26	0,41
3	1,43	1,43	1,43	1,43
4	2,24	2,24	2,24	2,24
5	0,57	0,76	0,81	0,43
6	1,43	1,39	1,29	0,41
7	2,00	2,00	1,60	1,80
Summa	9,47	8,67	8,19	7,58

Som ses i tabell 4 är den flexibla epoxin det bästa valet om man väljer att gjuta en transparent krockdockskalle. Den flexibla epoxin vinner över den oarmerade epoxin tack vare dess högre brottseghet, trots dess något lägre sträckgräns. En annan fördel är att den kan töjas mer innan brott, nämligen 20-85 % medan den oarmerade epoxin har en töjning till brott på 3-6 %, vilket skulle göra att rörelserna vid ett islag skulle kunna bli större och därmed tydligare. [46] Den flexibla epoxin är inte lika genomskinlig som CR-39, men man kommer ändå att se hjärnans rörelser tillräckligt väl. CR-39 är det sämsta valet av dessa fyra främst för att den är betydligt dyrare än de tre övriga. Osäkerhet med de numeriska värdena vid valet av material finns dels vid tillverkstiden där vi inte vet hur lätt det är att få tag på materialet och dels vid genomskinlighetsgraden då den endast är graderad i en fyrgradig skala.

Till skillnad från hårdplasterna polyester och vinylester som krymper mycket då de härdar så är krympningen av epoxi vid härdningen liten. [51] Detta är en viktig egenskap vid gjutningen. Om materialet som gjuts krymper vid härdningen kommer det byggas in inre spänningar i materialet då det härdar. Det skulle i så fall finnas risk för sprickbildning under gjutningen.

Då marknaden på epoxi studerats insågs att de epoxityper som saluförs är av två typer, nämligen lamineringsepoxi och flexibel epoxi. Lamineringsepoxin används vid laminering (tillverka något i flera skikt), till exempel med kolfiberväv [52] medan den flexibla epoxin är en mer tänjbar epoxi vilken till exempel används vid arbeten mellan skrov och köl på

segelbåtar. [53] Då priserna för de olika epoxityperna hos några olika återförsäljare noterades insågs att den flexibla epoxin är betydligt dyrare än den styvare (ca 5 gånger så högt kilopris, se bilaga 1).

Det kan vara intressant att studera hjärnrörelserna för olika material på skallen. Huvudet kommer nämligen få olika frekvenser efter slaget beroende på skallens materialegenskaper samt att man inte vet ifall hjärnan kommer röra sig på samma sätt vid slaget, fast tydligare, då skallen är av ett mer elastiskt material. Eftersom vi aldrig tidigare gjutit med härdplast, och således var oroliga för gjutdefekter såsom till exempel luftbubblor valde vi att tillverka vår första skalle av lamineringsepoxi eftersom det var denna som var billigast.

5. TILLVERKNING AV SKALLMODELL

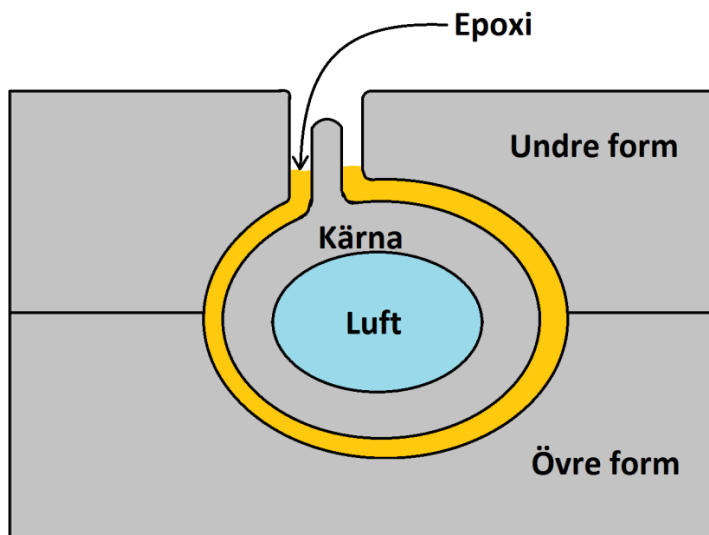
En beskrivning av hur tillverkningen av skallmodellen har utförts ges i det här kapitlet. Senare i kapitlet behandlas påfyllnaden av det hjärnsubstiat som är tänkt att symbolisera hjärnan.

5.1 Förenkling av skallmodellens utformning

För att underlätta tillverkningen av skallen gjordes förenklingar i skallens form. Eftersom den enda delen av skallen som skyddar hjärnan är hjärnskålen har under- och överkäken, ögonhålorna och näsbenet approximerats bort. Skallens komplicerade geometri på insidan förenklas så att bara stora attributer såsom nedsänkningar och ”bulor” i skallen finns kvar. De små hålen på skallens undersida tas bort eftersom det genom dessa kan passera luft då huvudmodellen krocktestas. Anledningen till att luft inte önskas få in mellan skallen och hjärnan är för att ett verklighetstroget test ska göras, och i verkligheten kommer det inte in luft mellan skallen och hjärnan på grund av ett islag.

5.2 Förklaring av gjutningsidé

I figur 5.1 ses en principiell bild av hur gjutningen kommer se ut. Formen består av en kärna som bildar skallens inre geometri och en form vilken bildar skallens yttre geometri. Formen är delbar; ena halvan bildar skallens undre geometri medan den andra halvan bildar skallens övre geometri. Anledningen till att formen är delbar är för att annars skulle inte kärnan kunna placeras i formen. Kärnan är ihålig för att minska den mängd material som måste fås ut ur skallen efter att epoxin härdats. Epoxin fylls på där halsen skulle varit på en levande människa och fyller upp det hålrum som är mellan form och kärna.

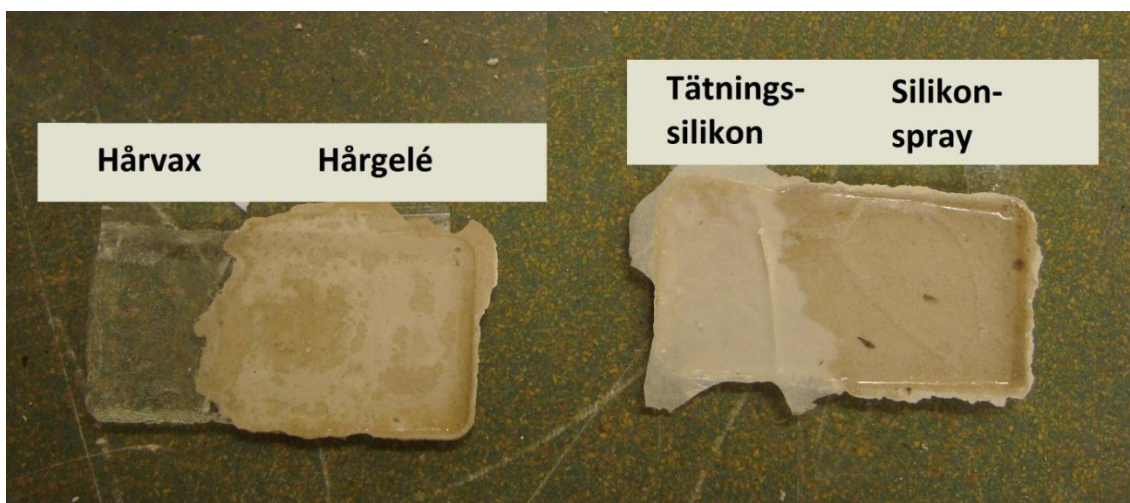


Figur 5. 1 - Schematisk bild av gjutningsmetoden

Gips var det materialet av vilket kärna och form valdes att tillverkas. Det valdes eftersom det har lågt pris, är lätt att bearbeta och är möjligt att på egen hand göra avgjutningar i. Eftersom gipset även är ganska sprött antas det vara möjligt att hacka ur kärnan ur den färdiga epoxiskallen.

5.3 Val av släppmedel

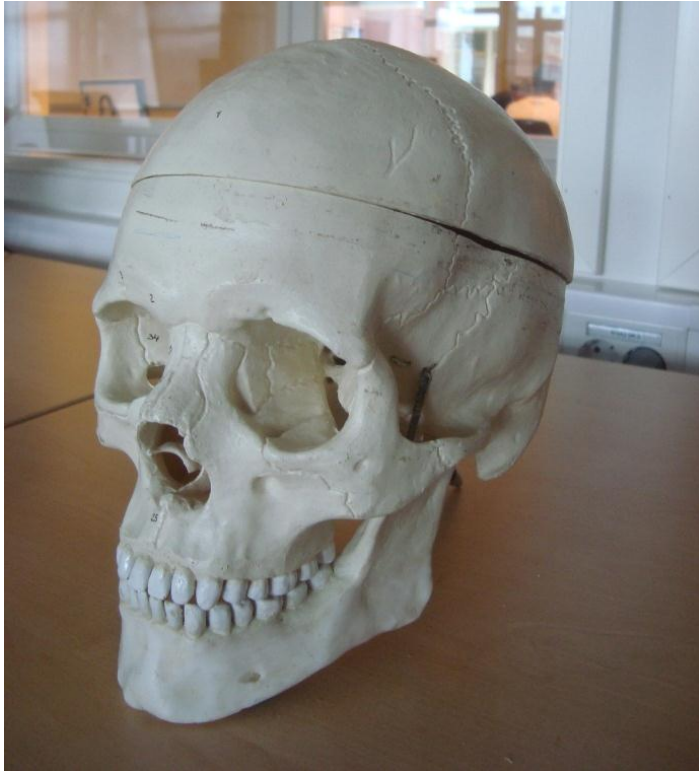
För att epoxin inte ska fästa i gipset måste någon form av släppmedel användas. Utan det skulle det bli omöjligt att skrapa ut all gips ur epoxiskallen. Om inte epoxin fäster på släppmedlet så skulle släppmedlet kunna avlägsnas tillsammans med gipset. Annars måste släppmedlet vara genomskinligt. Ifall släppmedlet inte går att få ur alternativt inte är transparent så skulle inte längre skallen vara genomskinlig. För att finna ett lämpligt släppmedel gjordes två gipsbitar på vilka en tunn hinna av några olika tänkbara släppmedel applicerades. De produkter som testades var hårgelé, hårvax, tätningssilikon samt silikonspray. På hinnaorna av släppmedlen hälldes ett lager epoxi. Då epoxin stelnat försöktes gipset avlägsnas från epoxiskivan. I figur 5.2 syns hur epoxiskivorna blev med de olika släppmedlen då gipset försöktes avlägsnats. Endast hårvaxet fungerade som släppmedel. Det blev därför det medel som valdes att använda som släppmedel.



Figur 5. 2 - Resultat för olika släppmedel.

5.4 Framtagning av gjutform

För att tillverka gjutformen användes en detaljrik, delbar skallmodell gjord i ett plastmaterial, vilken ses i figur 5.3.



Figur 5. 3 - Den skallmodell som användes för avgjutning.

Förest gjordes formen, vilken valdes att göras tvådelad, en för skallens ovansida och en för undersidan. Skallmodellen kläddes in i plastfolie så den skulle gå att få ur efter att gipset stelnat.

Efter att skallmodellen klätts in i plastfolie hälldes vatten i en uppsågad dunk. Därefter lades i dunken ett jämt lager gipsputs tills att det började bildas små vita öar. Sedan rördes gipsblandningen om tills en jämn konsistens uppnåts. Därefter trycktes ovansidan av skallmodellen ner i gipsbadet. På skallmodellen lades ett par vikter så att den inte skulle flyta upp. Avgjutningen av skallens ovansida syns i figur 5.4.



Figur 5. 4 - Framtagning av formens övre del.

Ett dygn senare, då gipset stelnat, ritades ett streck på skallen i nivå med gipset. Det gjordes för att veta hur djupt skallmodellen skulle placeras då den undre delen av formen skulle tas fram. Därefter togs skallmodellen ut ur den övre delen av formen, vilken syns i figur 5.5.



Figur 5. 5 - Formens övre del efter att skallmodellen har avlägsnats.

När den undre delen av formen gjordes så togs underkäken bort och annan onödig geometri på skallmodellen så som exempelvis hålen för näsa och ögon tejpades över. Detta gjordes dels för att denna detaljrikedom inte var nödvändig men även för att skallmodellen skulle bli omöjlig att få ur det stelnade gipset om den hade inåtgående geometrier. I figur 5.6 syns hur skallmodellens undersida har klätts in i maskeringstejp. Där syns även det streck som ritades i nivå med gipset vid framtagandet av den övre delen av formen.



Figur 5. 6 - Skallmodell med borttagna håligheter.

Skallmodellen kläddes sedan in plastfolie och trycktes ned i ett gipsbad så att den hamnade i nivå med strecket. När gipset stelnat togs skallmodellen ut ur den undre delen av formen, vilken nu syns i figur 5.7.



Figur 5. 7 - Formens undre del efter att skallmodellen har avlägsnats.

I figur 5.8 ses att skallmodellen och undre delen av formen inte stämmer helt överrens med varandra.



Figur 5. 8 - Felet mellan skallmodell och formens undre del.

Den övre delen av formen stämde däremot väl överrens med skallmodellen. Därför gjordes utifrån den övre formen en mall i kartong. Mallen använde sedan som referens då vi med gips spacklade upp och sedan slipade ned den undre formens kanter så att dessa stämde överrens med mallen och således även med den övre formen.

Eftersom inte mer än själva hjärnskålen skulle tillverkas så fylldes det hål i undre ytterformen som bildas av överkäken igen med gips. Hur mycket som skulle spacklas upp var dock svårt att veta. Eftersom vi ansåg det värre om det var för lite/ingen epoxi på vår skalle än för mycket så var vi ganska återhållsamma med spacklingen av gips.

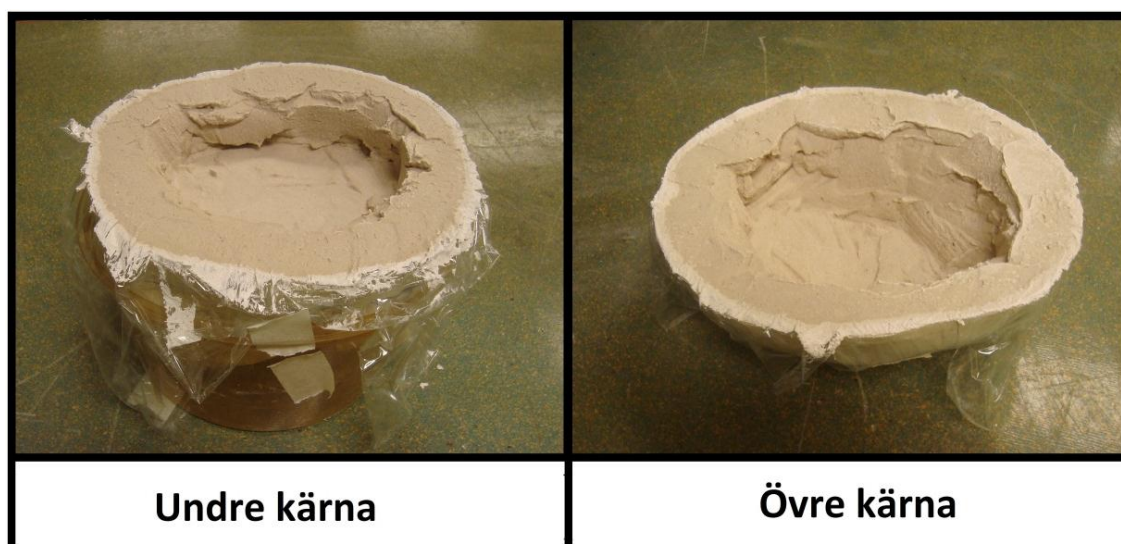
Därefter borrades i den undre formen ett hål för halsen, det så kallade nackhålet (latin: foramen magnum). [12] Sedan spacklades och slipades kontaktytan mellan de två formhalvorna så att dessa blev plana. Därefter spacklades och sandpapprades även ytorna inuti formarna så att de blev släta. De två färdiga ytterformarna ses i figur 5.9. De blyertsstreck som syns på kontaktytorna kommer senare att användas för att få de två formhalvorna mittför varandra.



Figur 5. 9 - De färdiga formhalvorna.

5.5 Framtagning av kärna

Parallellt med tillverkningen av ytterformarna gjordes kärnan. Vid tillverkningen av kärnan applicerades först polermedel på insidan av skallmodellens två halvor. Därefter täcktes insidan av plastfolien varefter gipset lades i, se figur 5.10. Polermedlet användes därför att plastfolien annars skulle häfta sig fast på skallmodellen. Det skulle i så fall bli svårt att få ur det stelnade gipset oskatt.



Figur 5. 10 - Tillverkning av kärna.

Efter ett halvt dygn togs gipset ur skallmodellen. De två bitarna som ska bilda kärnan syns i figur 5.11.



Figur 5. 11 - Kärnhalvorna efter att de tagits ur skallformen.

För att foga samman de två bitarna användes återigen gips. Tyvärr applicerades lite för mycket gips, vilket gjorde att kärnan blev för hög. Då försökte vi pressa ur gipset med resultatet att en av kärnhalvorna gick sönder. Efter att ha gjort en ny kärnhalva valdes denna gång snabbepoxi för att limma ihop halvorna eftersom snabbepoxin inte skulle bygga nämnvärt på höjden. Den hoplimmade kärnan kan ses i figur 5.12. När väl snabbepoxin hade härdat insågs att den ring av snabbepoxi som bildats mellan halvorna skulle komma att bli mycket svår att få ur när väl kärnan skulle skrapas ur epoxiskallen. Kärnan sågades därför upp och den härdade snabbepoxin avlägsnades och ersattes av gips. Vid delningen av kärnan försvann lite material från de båda halvorna, men detta komparerades i och med att gips återigen användes som sammanfogningsämne. Därefter spacklades och slipades kärnan så att den blev slät.



Figur 5. 12 - Den hoplimmade kärnan.

För att fixera kärnan i undre delen av formen användes några små passbitar av epoxi. Passbitarna gjordes genom att fylla epoxi i en ordinär vattenslang. När epoxin stelnat skars vattenslangen upp och epoxistaven togs ur och kapades i varierande korta längder.

5.6 Gjutning av skallmodell

Innan gjutningen ströks formhalvorna och kärnan in med släppmedel. Sedan placerades kärnan i den övre delen av formen och fixerades med några passbitar, se figur 5.13.



Figur 5. 13 - Kärnan placerad i formens övre del.

Efter att den undre delen av formen lagts på plats lades en sträng med gips runt skarven mellan formhalvorna så att inte epoxin skulle rinna ut. Kärnan fixerades i formen då den med snabbepoxi limmades samman med en vikt placerad på formens ovansida. Sedan placerades gjutformen i dragskåpet där den fylldes med strax över en liter epoxi. I figur 5.14. ses gjutformen då den blivit fylld med epoxi.



Figur 5. 14 - Gjutformen då den fyllts med epoxi.

När epoxin stelnat sågades formen isär. Detta gjordes i hopp om att formen skulle kunna lyftas av epoxiskallen och på så sätt gå att återanvända ifall fler skallar skulle tillverkas. Dessvärre kunde inte formen avlägsnas på annat sätt än att knacka sönder den. Kärnan skrapades och hackades ur med hjälp av en tillböckad bestickkniv. Tyvärr har lite av epoxin på baksidan av skallen runnit mellan formhalvorna, vilket syns i 5.15.



Figur 5. 15 - Gjutdefekt på skallmodellen.

Denna förlust av material reparerades genom att efter att ha ruggat upp ytan tejpa med eltejp över materialsvackan för att sedan fylla upp med epoxi i det gap som bildats.

För att öka skallens genomskinlighet våtslipades utsidan med våtslippapper med 400 korn per kvadratcentimeter följt av våtslippapper med 800 respektive 1200 korn per kvadratcentimeter, för att slutligen poleras. Därefter fylldes skallmodellen med ättiksprit för att lösa upp det sista gipset. [46] All gips lyckades tyvärr inte avlägsnas från skallens insidas nedre del. Skallen syns nu i figur 5.16.



Figur 5. 16 - Den polerade skallmodellen.

För att minska risken att luft tränger ned mellan hjärnblandningen och skallen så tillverkades ett rör av epoxi som, efter att hjärnblandningen fyllts i skallen, skulle fästas kring nackhålet. Röret kommer sedan att fyllas med hjärnblandning, vilket inte är onaturligt då hjärnstammen finns här i verkligheten. Röret tillverkades på liknande sätt som skallen, men istället för att foga samman formhalvorna med gips användes denna gång tätningssilikon. När epoxin stelnat slipades rörets ena ände så att den överrenstämde med geometrin kring nackhålet. I figur 5.17 har även röret våtslipats och polerats.



Figur 5. 17 - Det polerade röret.

5.7 Påfyllnad av hjärnsubstitut

Mellan en verklig skalle och hjärna finns det en vätska, cerebrospinalvätskan. I vår modell av huvudet har denna ersatts av olivolja så att hjärnan inte skulle häfta fast i skallen, vilket enligt tidigare arbeten på området (se kap. 2.6.2) är viktigt för att skapa verklighetstrogna tester.

Olivoljan hölldes i skallen, vilken rördes om så att hela insidan av skallen fick en film av olja. Skallen placerades sedan i ett kylskåp så olivoljan blev mer trögflytande.

Den hjärnblandning som använts bestod av följande ingredienser och proportioner:

- 2 teskedar gelatin
- 2 matskedar vatten
- 1 matsked glycerol
- 2 teskedar sirap

Receptet fick vi av vår handledare. Hjärnblandningen hade liknande mekaniska egenskaper som en riktig människohjärna.

Vid tillredning av hjärnblandningen värmdes först gelatinet och vattnet så att gelatinet smälte. Därefter blandades glycerolen och sirapen ner i blandningen. För att få en så transparent hjärna som möjligt användes vit sirap. Efter borttagning av eventuellt skum hölldes substansen i skallen så att det täckte botten.

När hjärnblandningen börjat stelna (bildat en tunn hinna på ytan) placerades märkpunkter ut. De placerades vid hjärnans ytterkant för att göra det möjligt att följa hjärnans rörelser vid krocktestet. Valet av märkpunkter blev små bitar av samma blandning som hjärnblandningen men istället för vatten användes grön hushållsfärg. Detta val av märkpunktsmaterial gjordes efter att samtliga godisbitar som testats som märkpunkter antingen direkt eller efter en tid började lösas upp i hjärnblandningen, vilket gjorde märkpunkterna otydliga. Dessa märkpunkter hade även fördelen att de hade samma egenskaper som övriga hjärnsubstansen och på så sätt kommer vilja röra sig på samma sätt som övriga hjärnan vid krocktestet.

När ett antal märkpunkter placerats ut fylldes ett nytt lager hjärnblandning i skallen på vilket nya märkpunkter placerades och så vidare. I figur 5.18 har det blivit dags att fylla på det fjärde lagret av hjärnblandningen.



Figur 5. 18 - Påfyllnad av hjärnsubstitutet.

Då hjärnblandningen började nå upp till nackhålet limmades röret fast med snabbepoxi. I hjärnblandningen inuti röret placerades en märkpunkt så att eventuell volymsändring under islaget skulle kunna observeras. Tyvärr gjorde värmen från hjärnblandningen att ytan på märkpunkterna smälte ihop med hjärnblandningen så att övergången mellan märkpunkt och hjärnblandning blev diffus. I figur 5.19 ses det färdiga huvudet.



Figur 5. 19 - Den färdiga huvudmodellen.

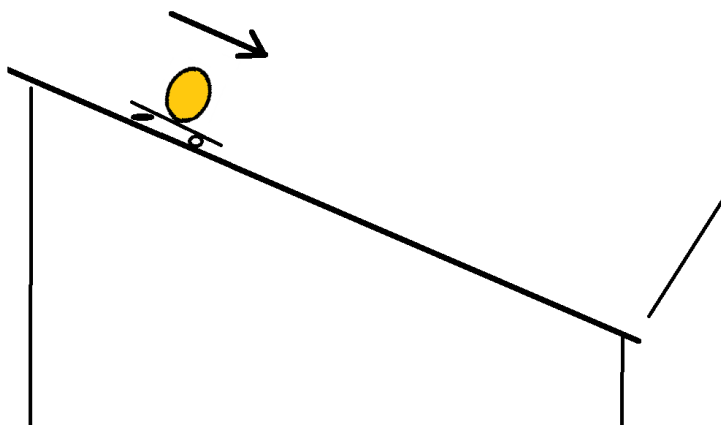
6. VAL AV TESTRIGG

Den färdiga huvudmodellen kommer att accelereras för att sedan åka in i en vägg. Eftersom huvudmodellen är tänkt att endast utsättas för en rätlinjig acceleration under islaget vill vi inte att testriggen skapar en roterande rörelse av huvudet. Vid islaget kommer hjärnans rörelse i förhållande till skallen att filmas. För att möjliggöra filmning från väggens baksida kommer den tänkta väggen vara utav en skiva i det slagsega materialet polykarbonat. Några möjliga testriggsuppställningar brainstormades fram och analyserades, se nedan.

6.1 Koncept 1 – Lutande skiva

I denna testrigg placeras huvudet på en vagn vilken med hjälp av tyngdkraften accelererar ned för en lutande skiva. Huvudet slår i nederkanten av skivan in i väggen, medan vagnen fortsätter under, se figur 6.1.

Positivt med denna testrigg är skallen endast har en rak rörelsebana. Negativt är den kan bli svårt att placera huvudet på vagnen så att den sitter kvar under färden ned för skivan, men samtidigt släpper så lätt från vagnen vid islaget så att rotationen av skallen minimeras.

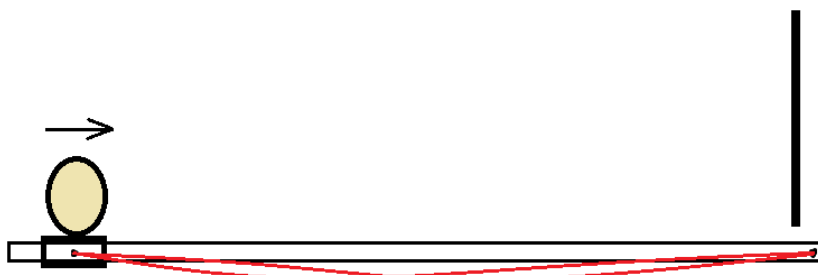


Figur 6. 1 - Illustrering av koncept 1.

6.2 Koncept 2 – Gummiband

Här har istället huvudet placerats på en kort fyrkantsprofil ("vagn"), vilken har satts över ett fyrkantsrör. Till vagnen har några elastiska linor fästs, vilkas ändar är placerade i änden av fyrkantsröret. Sedan dras huvudet tillsammans med vagnen till änden av röret så att de elastiska linorna spänns. Därefter släpps skalle + vagn, som tack vare kraften från de elastiska linorna accelereras, se figur 6.2. Skallen slår sedan i väggen samtidigt som vagnen slår i en stopplack.

Positivt med denna testrigg är huvudet endast har en rak rörelsebana. En nackdel är dock att kraften endast verkar på vagnen vilket gör att någon form av hållare måste göras så huvudet åker med vagnen. För att hållaren sedan inte ska trycka på huvudet vid islaget måste fyrkantsprofilen stoppas något innan huvudet slår i väggen. Efter islaget finns risken att huvudet studsar tillbaka på hållaren. Denna rigg kan även bli lite svårare och dyrare att tillverka än övriga alternativen.

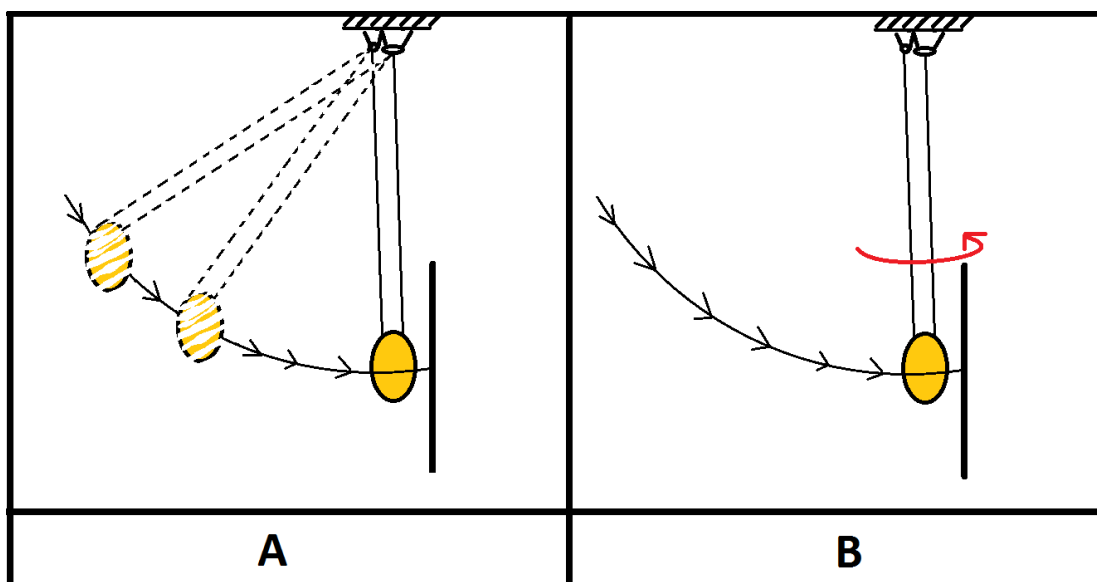


Figur 6. 2 - Illustrering av koncept 2.

6.3 Koncept 3 – Pendel

I den här riggen har huvudet hängts upp i fyra linor. De främre linorna har lika långt avstånd till de bakre linorna både på huvudet och i taket vilket gör att huvudet parallellförflyttas i pendelrörelsen. Vid krocktestet dras huvudet bakåt och när den släpps accelereras huvudet in i väggen, se figur 6.2.A.

Positivt med den här riggen är att den är enkel och billig att göra, samt att om luftmotståndets försummas är det lätt att räkna ut vilken hastighet huvudet har då den slår i väggen. Negativt med riggen är att det finns viss risk för rotation vilket kan göra att mitten av ansiktet inte slår i väggen, se bild 6.2.B.



Figur 6. 3 - Illustrering av koncept 3.

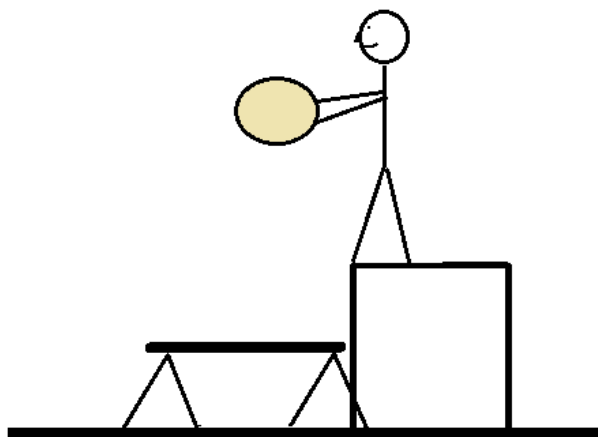
6.4 Koncept 4 – Fritt fall

I denna rigg har polykarbonatskivan placerats på två små pallar vilket möjliggör filmning ”bakom väggen”. Huvudet släpps sedan en bit ovan skivan och får falla fritt tills den träffar skivan, se figur 6.4.

Positivt med denna rigg är att den är mycket enkel och gratis att göra samt att huvudets hastighet vid islaget är lätt att räkna ut.

Det finns risk för att man inte lyckas släppa huvudet på ett sådant sätt att det träffar skivan så som man har tänkt sig. Ett sätt för att göra så att huvudet får en så bra start på sin luftfärd som möjligt är att på baksidan av huvudet fästa en lina i vilken huvudet hängs upp. När sedan huvudet hänger still, i önskat läge, bränns linan av och huvudet faller fritt ned i skivan.

Det finns även en förhöjd risk att det kommer in luft i huvudmodellen vid islaget jämfört med de tidigare nämnda krocktestriggarna eftersom huvudets rör i denna rigg är vinklad horisontellt.

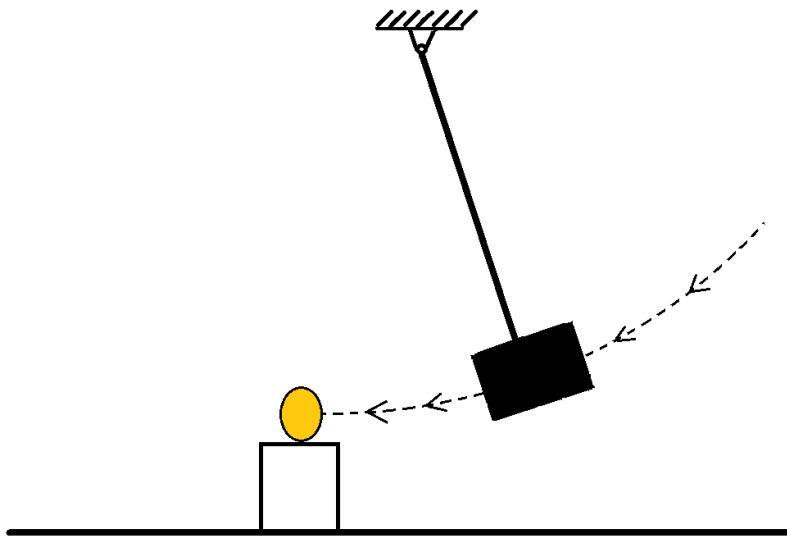


Figur 6. 4 - Illustrering av koncept 4.

6.5 Koncept 5 – Roterande islagsanordning

Här är istället huvudet stilla innan islaget och blir sedan träffad av en roterande islagsanordning, se figur 6.5. Ytan som huvudet vilar på måste vara glatt så huvudet inte roterar när den glider längs ytan. Positivt med den här riggen jämfört med koncept 3 och 4 är att inga fästeanordningar behöver göras på skallen.

Negativt med den här riggen är att det kan bli svårt att filma hjärnans rörelser framifrån eftersom islagsanordningen i så fall måste vara genomskinlig. Dessutom kommer förmodligen huvudet att börja rotera efter islaget. Det krävs även någon form av fånganordning så att huvudet inte flyger iväg och eventuellt in i kameran. Det är heller inte så lätt att beräkna vilken hastighet huvudet kommer att ha efter islaget.



Figur 6. 5 - Illustrering av koncept 5.

6.6 Val av testrigg

Konceptet som valts är nummer 3 - pendeln. Detta eftersom den har låg materialåtgång. Rotationen av skallen antas inte bli så stor med denna metod. Jämfört med "fritt fall" är huvudmodellens rörelser mer kontrollerad, samt att man efter islaget har bättre koll på vart den kommer studsa.

7. TILLVERKNING AV TESTRIGG

Vi började att med att på skallen göra fyra fästen i vilka upphängningslinorna skulle fästas. Fästpunkterna placerade i varsitt "hörn" av huvudets undersida, med ett avstånd av ca 110 mm mellan det främre och det bakre fästparet. Fästena gjordes genom att, efter att ha ruggat den yta vid vilken fästpunkten var tänkta att placeras, limma på tre korslagda ståltrådar runt vilka en fiskelina har knutits fast, se figur 7.1.

Fiskelina var linan som valdes att hänga upp skallen i eftersom den med sin låga diameter har lågt luftmotstånd men ändå har tillräckligt hög brottgräns. Den valda linan hade en diameter på 0,38 mm och en brottgräns på 8,6 kg. Linan lades dubbelt så att risken för brott minimerades.

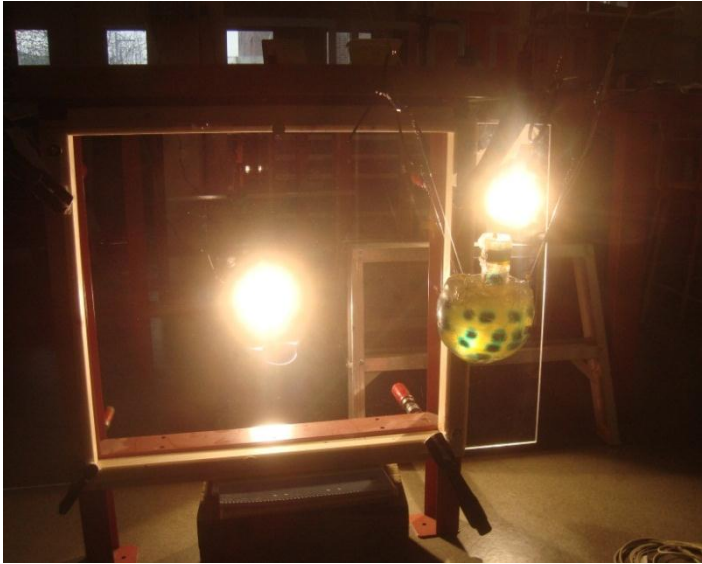


Figur 7. 1 - Utformning av fästansordning på huvudmodellen.

I V-laboratoriets (Chalmers Lindholmens laboratorielokal) tak går ett flertal rör. Två högt placerade, parallella rör valdes att fästa linorna runt. Rören var placerade ett par meter ifrån varandra så att linorna hängde V-format, vilket minskar risken för att skallen roterar under sin luftfärd. De främre respektive bakre linorna knöts fast på samma avstånd från varandra uppe på rören som infästningen på skallen så att skallen parallellförflyttas i pendelrörelsen. Därefter knöts linorna från rören samman med linorna som var fästa på skallen. Det visade sig dock vara svårt att få skallen i önskad höjd och orientering så efter ett antal försök inhandlades några återförslutningsbara buntband. De placerades mellan linorna från taket och linorna som var fästa i skallen vilket underlättade injusteringen avsevärt.

Som vägg, i vilken skallen ska slå i, användes en polykarbonatskiva, vilken fästes i stativet på ett bords kortsida med hjälp av fyra tvingar. Det visade sig dock att de främre linorna tog i bordsskivan innan huvudet slog i polykarbonatskivan, vilket gör att de drar upp huvudet något innan slaget inträffar. Detta avhjälpes genom att mellan bordsbenen och polykarbonatskivan placera en ram av 45x45mm regel så att huvudet slog i polykarbonatskivan innan linan tog i bordsskivan.

Bakom skallen på ungefär samma höjd som den tänkta islagspunkten placerades en höghastighetskamera som kan filma upp till 1000 bilder/sekund. Bakom polykarbonatskivan placerades två strålkastare som riktades mot huvudmodellen för att göra märkpunkterna tydligare på höghastighetsfilmen. I figur 7.2 syns huvudet hängandes i linorna belyst av strålkastarna som vid fototillfället lös på halv effekt, nämligen 1000W vardera.



Figur 7. 2 - Utformning av testrigg.

På skallen limmades sedan en accelerometer fast för att kunna få fram hur stor accelerationskraft huvudet utsätts för i färdriktningen och vinkelrätt mot färdriktningen under islaget. Därefter ritades även några streck på skallens baksida så att vi har något att referera till då hjärnans rörelser skall analyseras. Accelerometern och strecken på skallens baksida syns i figur 7.3.



Figur 7. 3 - Huvudmodell med referensstreck och accelerometrar.

8. KROCKTEST AV HUVUDMODELLEN

När skallen var upphängd och ”väggen” var placerad tätt framför huvudet när denna hängde i vila så ställdes skärpan på kameran in och accelerometern kopplades till datorn. På grund av begränsat minne kunde höghastighetskameran endast filma i 0,5 sekunder och accelerationsvärdena kunde endast samlas in under 1 sekund. Därför var någon tvungen att med en strömbrytare starta insamlandet av film- och mätdata precis innan huvudet slog i väggen.

Vid det första testet släpptes huvudet från en höjd av ca 1,9 meter, vid vila hade den en höjd på ca 0,5 meter vilket ger en höjdskillnad på 1,4 meter. Hastigheten blir således ca 19 km/h om luftmotståndet försummas, se uträkning med hjälp av energiprincipen nedan:

$$\frac{m \cdot v^2}{2} = m \cdot g \cdot h \rightarrow$$
$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 1,4} \approx 5,24 \text{ m/s} \approx 19 \text{ km/h} \quad (8)$$

Huvudmodellen såg ut att åka i en fin bana och slog i polykarbonatskivan något under det tänkta islagsstället. Detta då fiskelinorna töjdes lite mer än vad vi trott på grund av centrifugalkraften. Insamlandet av film och data från accelerometern gick bra. Dessvärre upptäcktes efter islaget en liten stjärna på skallens framsida, ”panna”, se figur 8.1.



Figur 8. 1 - Sprickbildning på skallmodell.

Stjärnan antas ha uppstått på grund av den höga spänningskoncentration som uppstår i islagspunkten eftersom denna yta är väldigt liten. På en riktig skalle är huvudet omslutet av hud, vilket gör att trycket fördelar sig på en större yta. Något mjukt, nämligen en tillklippt datormusmatta placerades på polykarbonatskivan för att fördela trycket över en större yta.

Innan nästa test gjordes tittade vi på den inspelade filmen. På den sågs att rörelserna i hjärnan i förhållande till skallen var väldigt små. Den enda märkpunkt vi kunde se rörelse på sig var den i röret. Därför värmdes huvudet med hjälp av de två strålkastarna. Detta gjordes därför att epoxin då blir mjukare, så att rörelserna på så sätt ska bli större och därmed tydligare. Dessutom minskar risken för fortsatt sprickbildning. Dessvärre klarade inte hjärnan av den höjda temperaturen, utan gick från fast till flytande tillstånd. I figur 8.2.A syns den tillklippta datormusmattan och att hjärnan börjar övergå till flytande tillstånd, det noterades dessvärre inte då utan skallen fortsattes att värmas tills att huvudet såg ut som i figur 8.2.B.



Figur 8. 2 - Uppvärmad huvudmodell.

Det fanns dock på baksidan av hjärnan fortfarande färgskiftningar så att eventuella rörelser under islaget skulle kunna analyseras. Vi tog därför och avbröt försöken och väntade med det andra testet tills hjärnan hade stelnat igen.

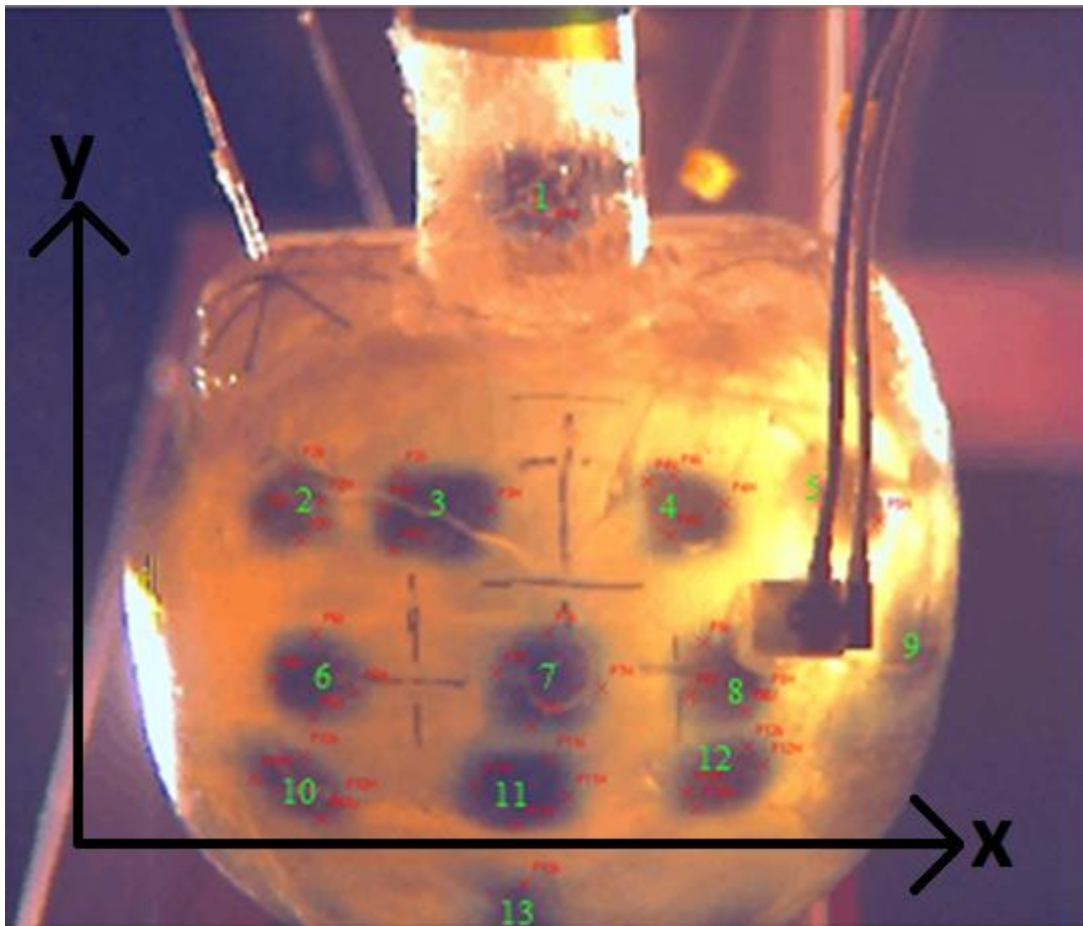
Vid det andra försöket släpptes huvudmodellen istället från ca 2,95 meter, vilket gav en hastighet innan islaget på ungefär 25km/h om luftmotståndet försummas, se uträkning nedan:

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot (2,95 - 0,5)} \approx 6,96 \text{ m/s} \approx 25 \text{ km/h} \quad (9)$$

Även denna gång gick film- och accelerometervärdesupptagningen väl, men skallens luftbana kändes inte lika kontrollerad som i föregående test. Då huvudet träffade ”väggen” sprack skallen i ett flertal bitar. Några analyseringar av skallens rörelser vid detta andra och avslutande test kunde därför inte utföras.

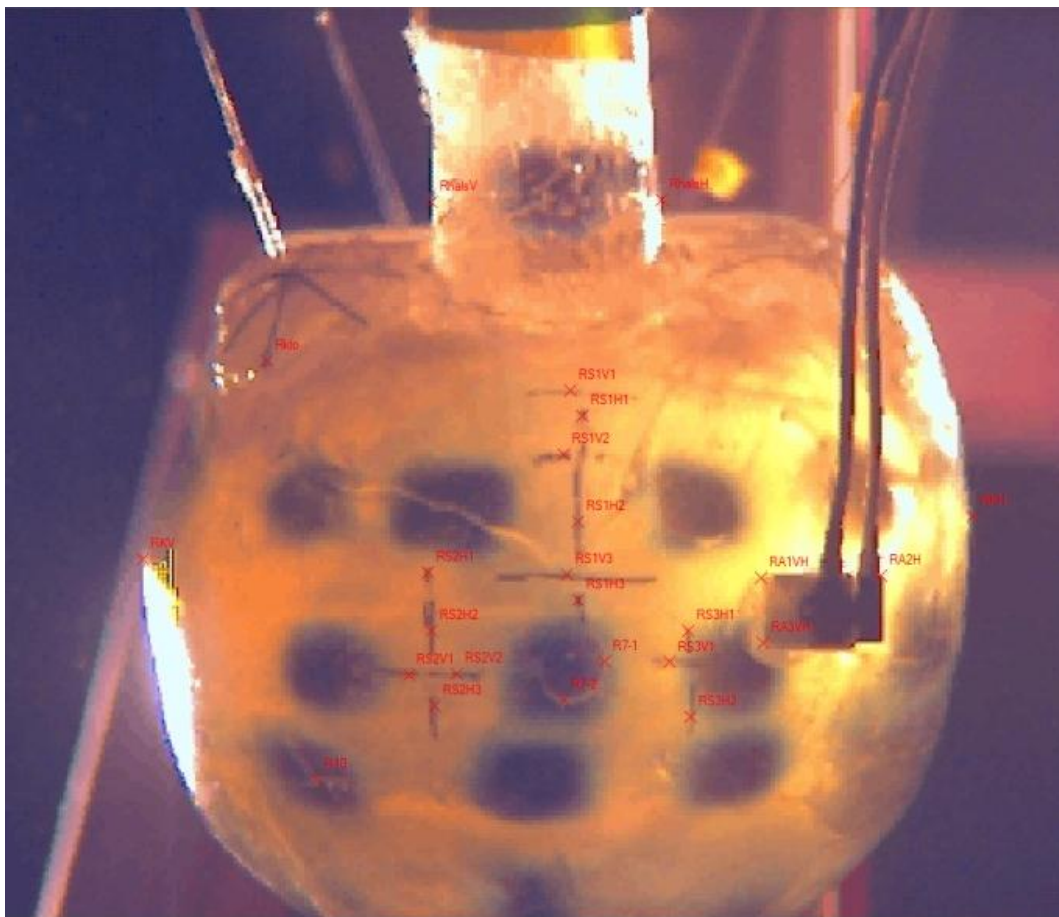
9. ANVÄNDNING AV RÖRELSEANALYSPROGRAM

När krocktestet var färdigt lades filmen in i rörelseanalysprogrammet TEMA Automotive för att undersöka hur märkpunkterna rörde sig i skallen. I programmet placerades ett antal artificiella punkter på märkpunkternas sidor, se figur 9.1. På varje märkpunkt placerades en punkt på undersidan, ovasidan, vänstersidan och högersidan (rödtextade i figur 9.1) och varje märkpunkt gavs ett nummer mellan 1 och 13 (grön numrering i figur 9.1). Tanken var då att de punkter som satt på en ovan- eller undersida av en märkpunkt skulle följa med märkpunktens rörelse i y-led. Detta tack vare att y-koordinaten inte skulle påverkas mycket om punkten råkade röra sig till vänster eller höger längs märkpunktens ovan- eller undersida. På samma sätt skulle de punkter som satt på en höger- eller vänstersida följa med sin märkpunkts rörelse väl i x-led. Detta gjordes vid den tidpunkt då islaget skedde eftersom bilden då hade bäst skärpa. Vid de andra tidpunkterna lät vi programmet självt beräkna var punkterna skulle placeras. Detta eftersom datorgjorda punkter för det mesta följde märkpunkternas rörelse mycket bättre än vad manuellt utsatta punkter gjorde.



Figur 9. 1 - Placering av punkter och märkpunkter, samt huvudmodellens positiva x- och y-riktningar.

Då skallen rör sig bort från kameran innan islaget och mot kameran efter islaget kommer avstånden mellan märkpunkterna att ändras på skärmen, även om man bortser från hjärnans rörelser på grund av islaget. Detta kallas parallaxfel. Man skulle därför inte kunna urskilja några rörelser i punkterna eller märkpunkterna i samband med islaget om man enbart studerar hur de rör sig eller hur avståndet mellan dem ändras. För att kunna studera rörelserna på ett tillfredsställande sätt lades ett antal så kallade referenspunkter in vilka följde skallens rörelse istället för hjärnans. Dessa placerades på attributer som satt fast på skallen, till exempel de svarta strecken eller på accelerometern, se figur 9.2. På så sätt kunde sträckan mellan två punkter jämföras med sträckan mellan två närliggande referenspunkter för att på så sätt minimera parallaxfelet.



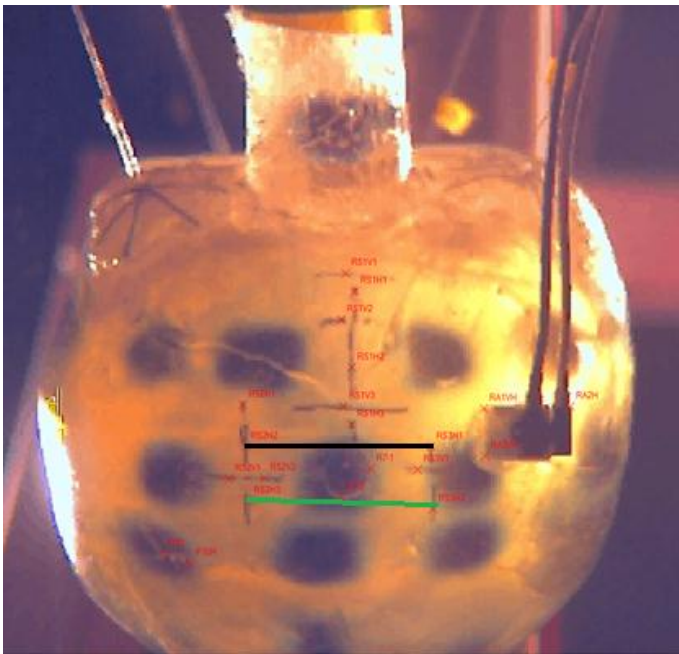
Figur 9. 2 - Placering av referenspunkter på skallmodellen.

10. FRAMSTÄLLNING AV GRAFER

När alla punkterna i programmet hade kontrollerats så att de satt på korrekt plats genom hela filmen, exporterades dess x-och y-koordinater vid varje tidpunkt till ett Excelprogram. För att jämföra sträckorna mellan punkterna med sträckorna mellan referenspunkterna, de så kallade referenslinjerna, ritades flera grafer upp i Excel. Alla grafer ritades upp på samma sätt, och nedan behandlas några av dessa grafer:

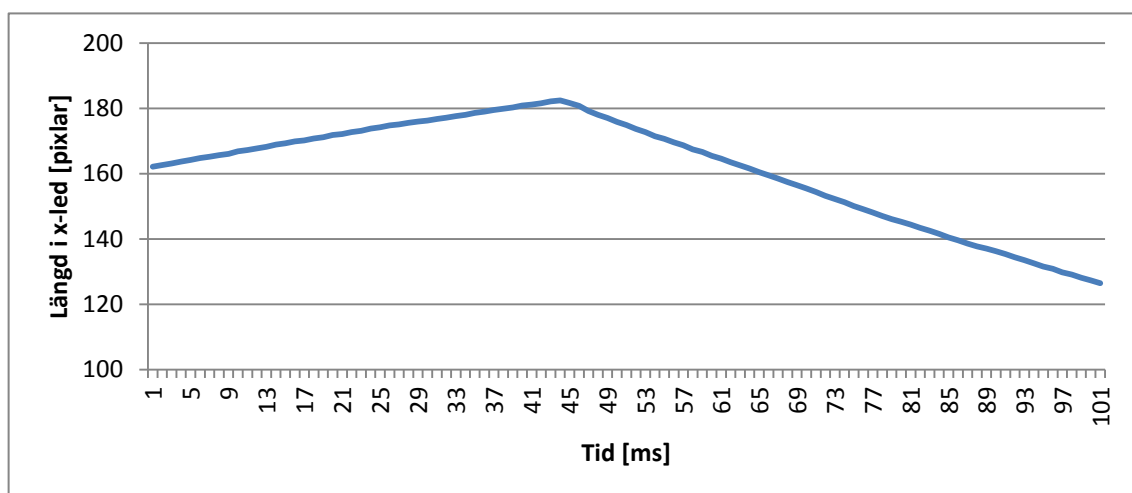
10.1 Exempel 1

I figur 10.1 har två horisontella referenslinjer markerats:



Figur 10. 1 - Placering av två referenslinjer.

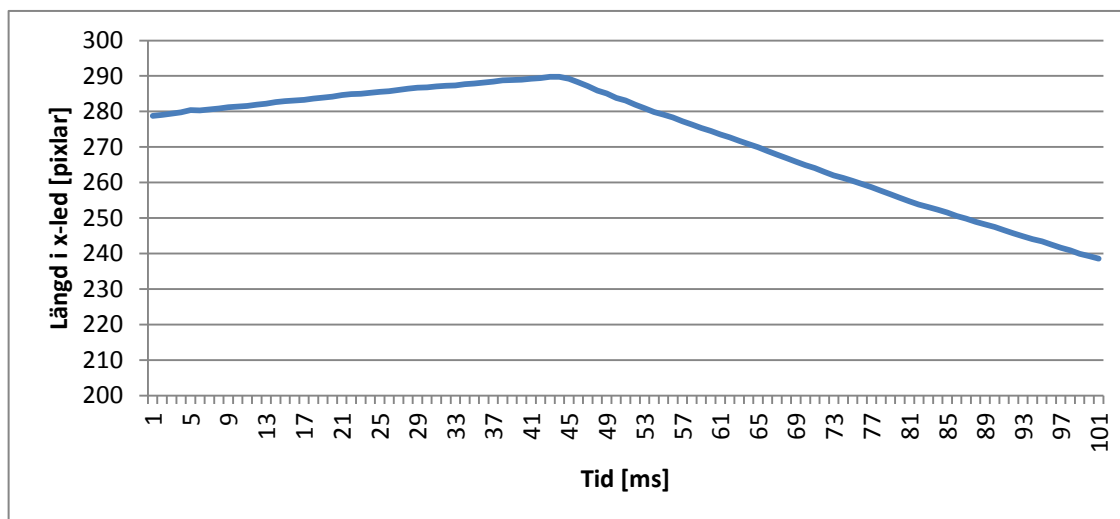
För den svarta referenslinjens vänstra punkt blir rörelserna i x-led enligt figur 10.2.



Figur 10. 2 - Rörelserna i x-led för den svarta referenslinjens vänstra punkt.

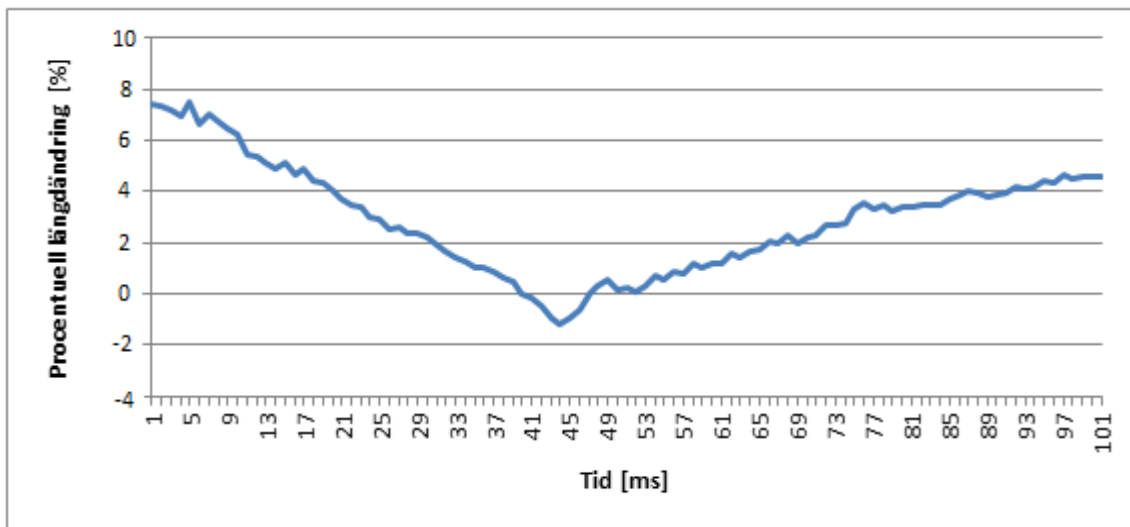
Innan islaget ökar punktens x-koordinat för att sedan sjunka efter islaget. Detta beror på att skallen inte rör sig precis rakt ifrån kameran innan islaget sker och således inte gör det efter islaget heller.

X-koordinaten för den svarta referenslinjens högra punkt visas i figur 10.3.



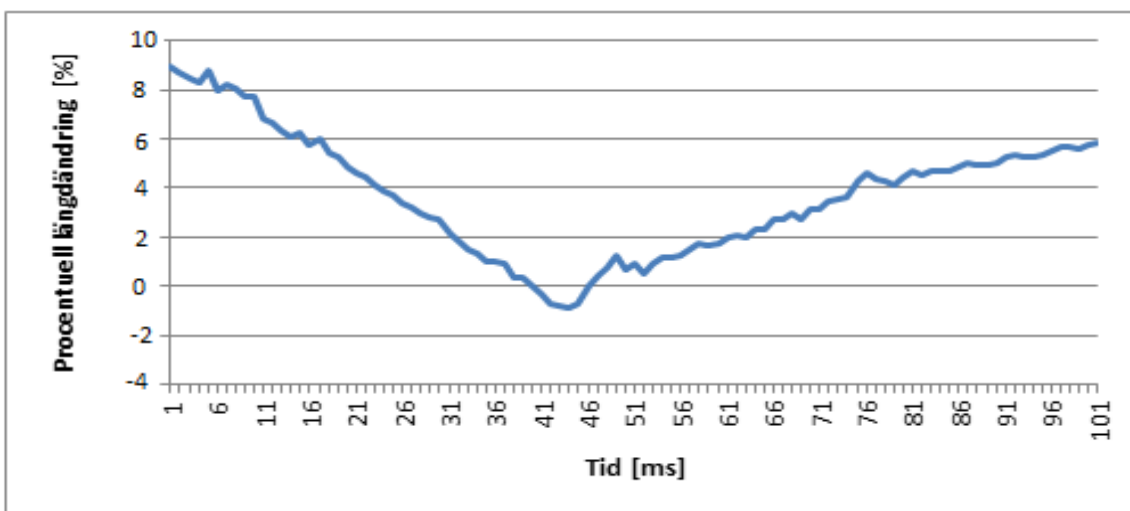
Figur 10. 3 - Rörelserna i x-led för den svarta referenslinjens högra punkt.

Längden i x-led för den svarta referenslinjen beräknades genom att subtrahera den högra punktens x-koordinat med den vänstra punktens x-koordinat. För att erhålla den procentuella längdändringen i x-led för linjen dividerades sedan alla värden med det värde som längden har precis innan islaget inträffade (tid 40 ms). Detta resulterade i den procentuella längdändringen jämfört med linjens längd vid tiden 40 ms. Figur 10.4 visar detta i form av en graf.



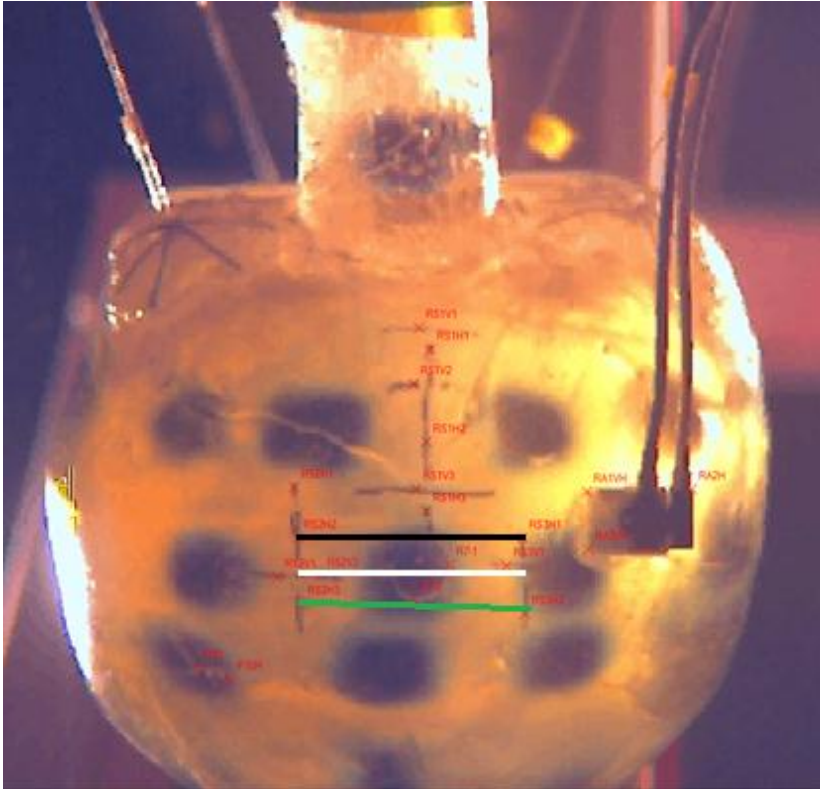
Figur 10. 4 - Den svarta referenslinjens procentuella längdändring.

Grafen ovan visar en längdminskning före islaget och en längdökning efter islaget. Detta beror på det tidigare nämnda parallaxfelet. Precis samma uträkningar som tidigare utförs för den gröna referenslinjen, vilkens procentuella längdändring ses i figur 10.5.



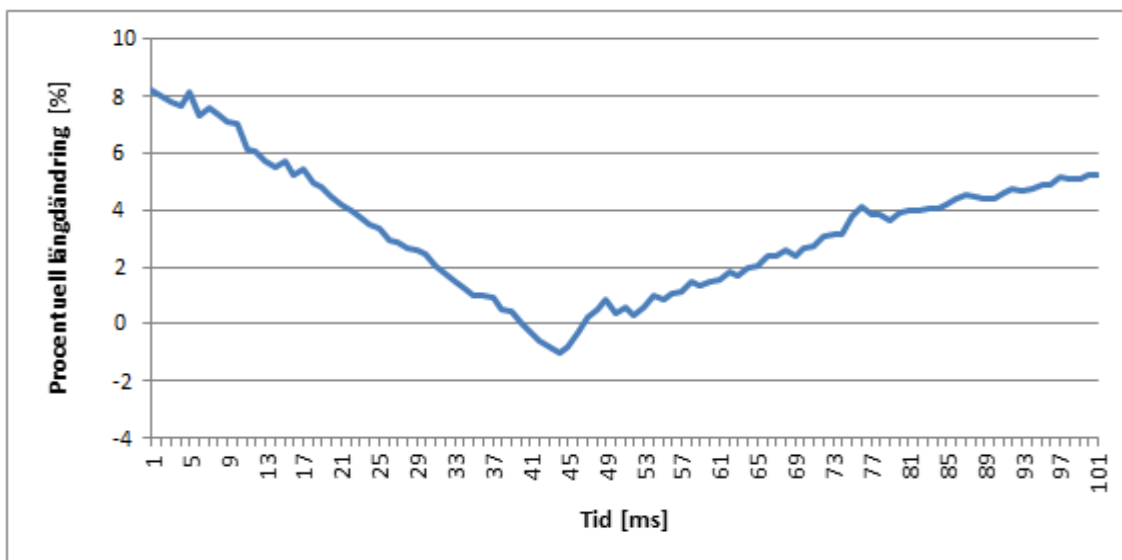
Figur 10. 5 - Den gröna referenslinjens procentuella längdändring.

Anledningen till att dessa grafer ritades upp är för att få fram en medelreferenslinje som ligger mellan de gröna och svarta referenslinjerna. Figur 10.6 visar approximerat var medelreferenslinjen ligger (vit linje). Medelreferenslinjen har använts mycket som referenslinje på grund av att den ligger i linje med de mittersta märkpunkterna och gav således en bra bild om hur skallen i det här området rörde sig under försöket.



Figur 10. 6 – Medelreferenslinjens position (vit linje).

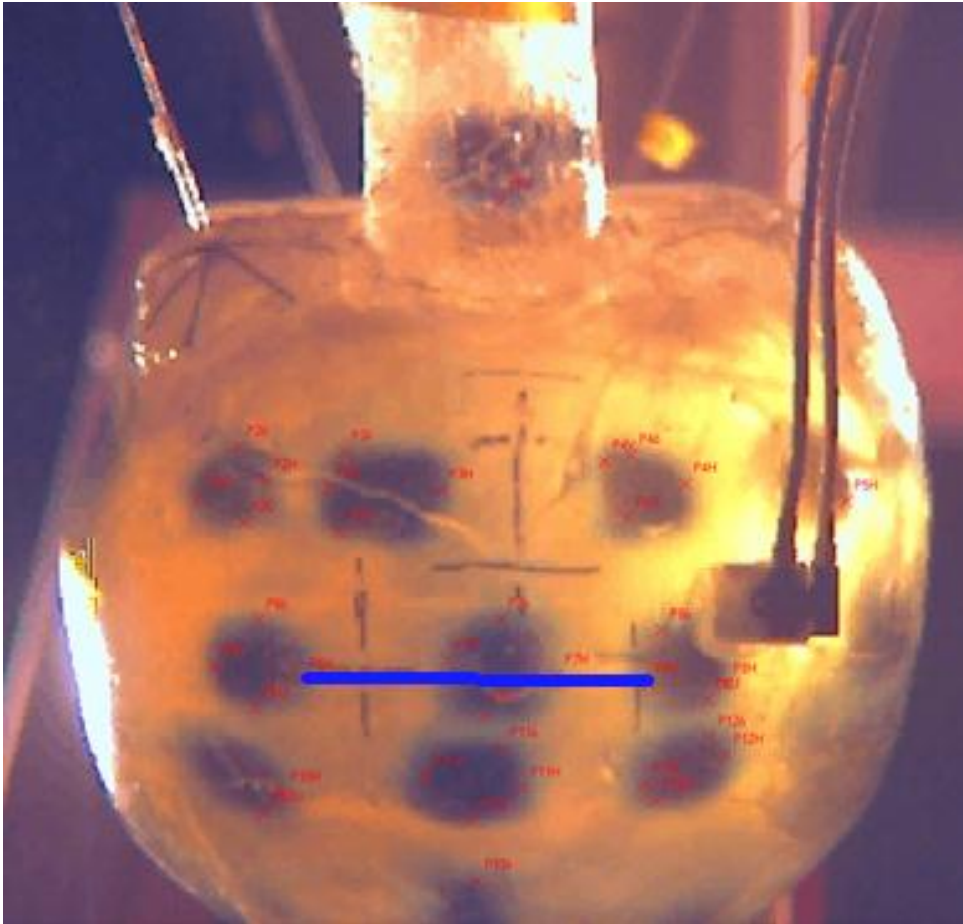
För att räkna ut medelreferenslinjens x-koordinat beräknades medelvärdet mellan den gröna referenslinjens procentuella längdändring och den svarta referenslinjens procentuella längdändring. Detta resulterar i grafen som syns i figur 10.7.



Figur 10. 7 - Medelreferenslinjens procentuella längdändring.

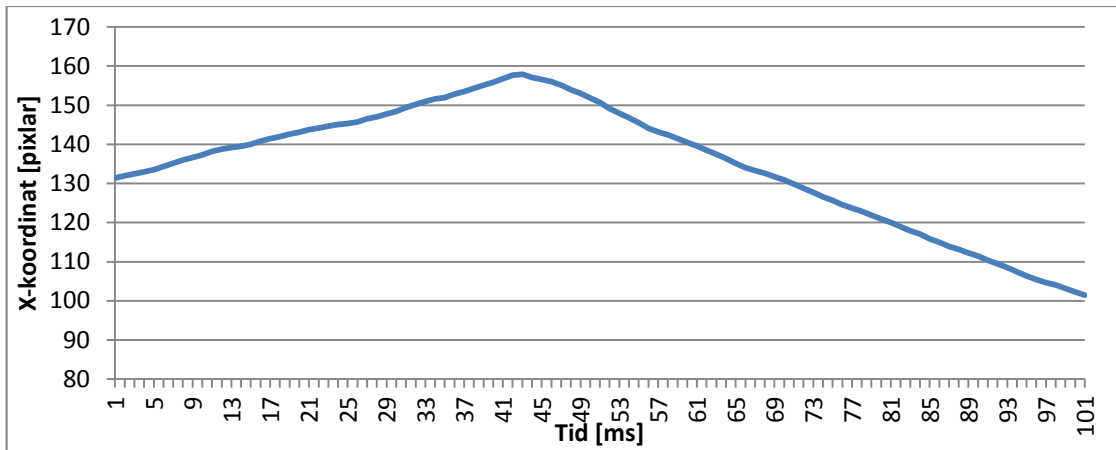
10.2 Exempel 2

I figur 10.8 är en blå linje dragen mellan två punkter. Linjen ligger på ungefär samma nivå i y-led som medelreferenslinjen vilket gör att den blå linjen kunde jämföras med medelreferenslinjen för att på så sätt eliminera parallaxfelet.

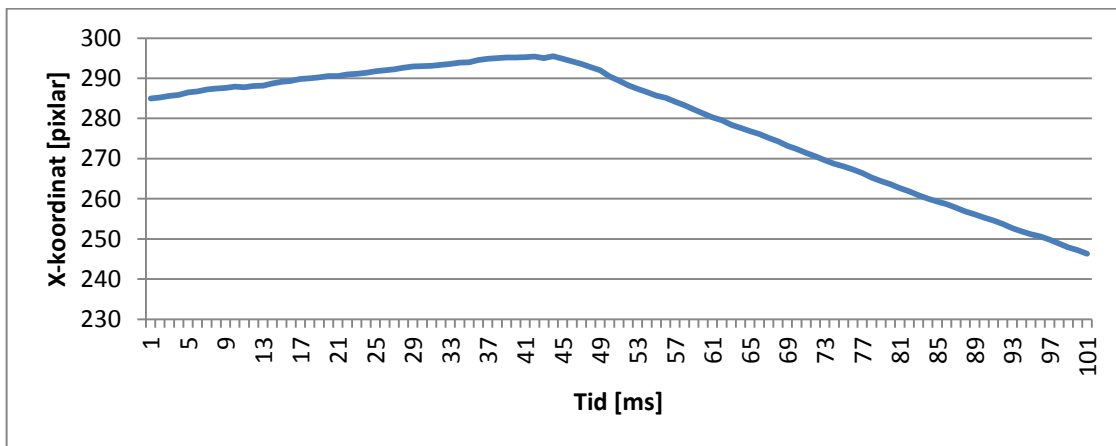


Figur 10. 8 - Placering av referenslinje.

Precis som i exempel 1 har x-koordinaterna för den blå linjens ändpunkter plottats upp. Den vänstra och högra punktens x-koordinater syns i figur 10.9 respektive 10.10.

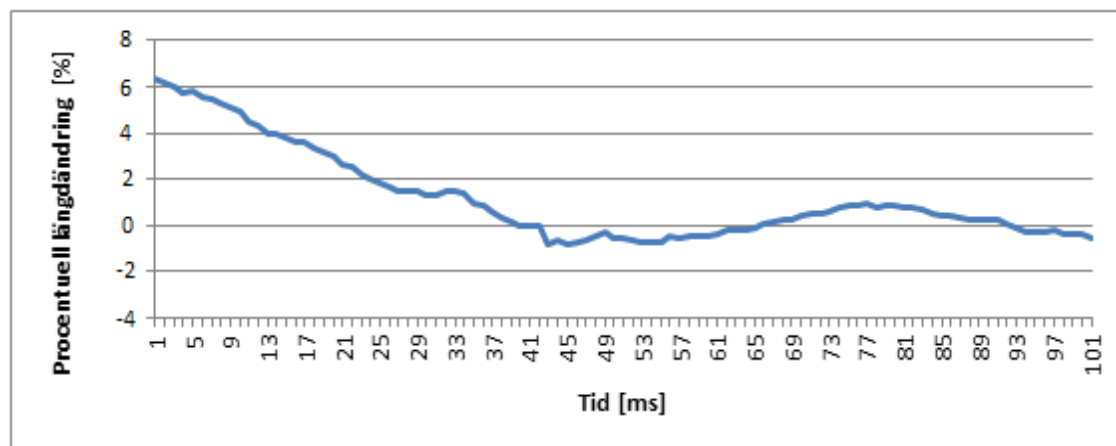


Figur 10. 9 - Rörelserna i x-led för den blåa linjens vänstra punkt.



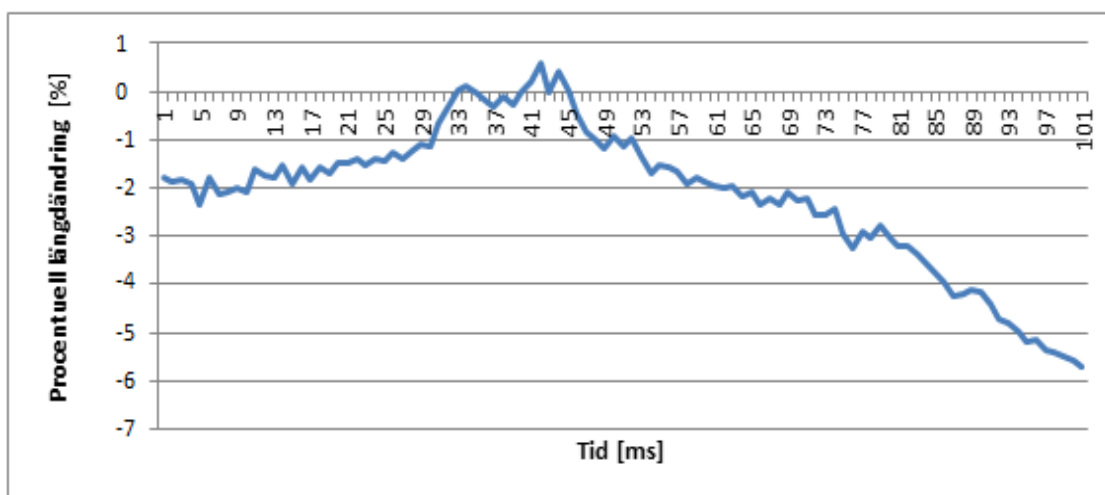
Figur 10. 10 - Rörelserna i x-led för den blåa linjens högra punkt.

Den procentuella sträckan i x-led mellan de två punkterna ändras enligt figur 10.11.



Figur 10. 11 - Den blåa linjens procentuella längdändring.

För att enklare se avvikelser mellan medelreferenslinjen och den blåa linjen har den procentuella längdändringen i x-led mellan punkterna subtraherats med den procentuella längdändringen i x-led för medelreferenslinjen, se figur 10.12. Detta resulterar i den procentuella längdändringen för den blåa linjen relativt skallens rörelser och deformationer. Tanken är då att kurvan ska ligga runt noll vid alla tidpunkter utom vid islagstillfället, vilket är vid tiden 40 millisekunder då den förhoppningsvis viker av antingen negativt eller positivt för att sedan svänga in mot noll igen.

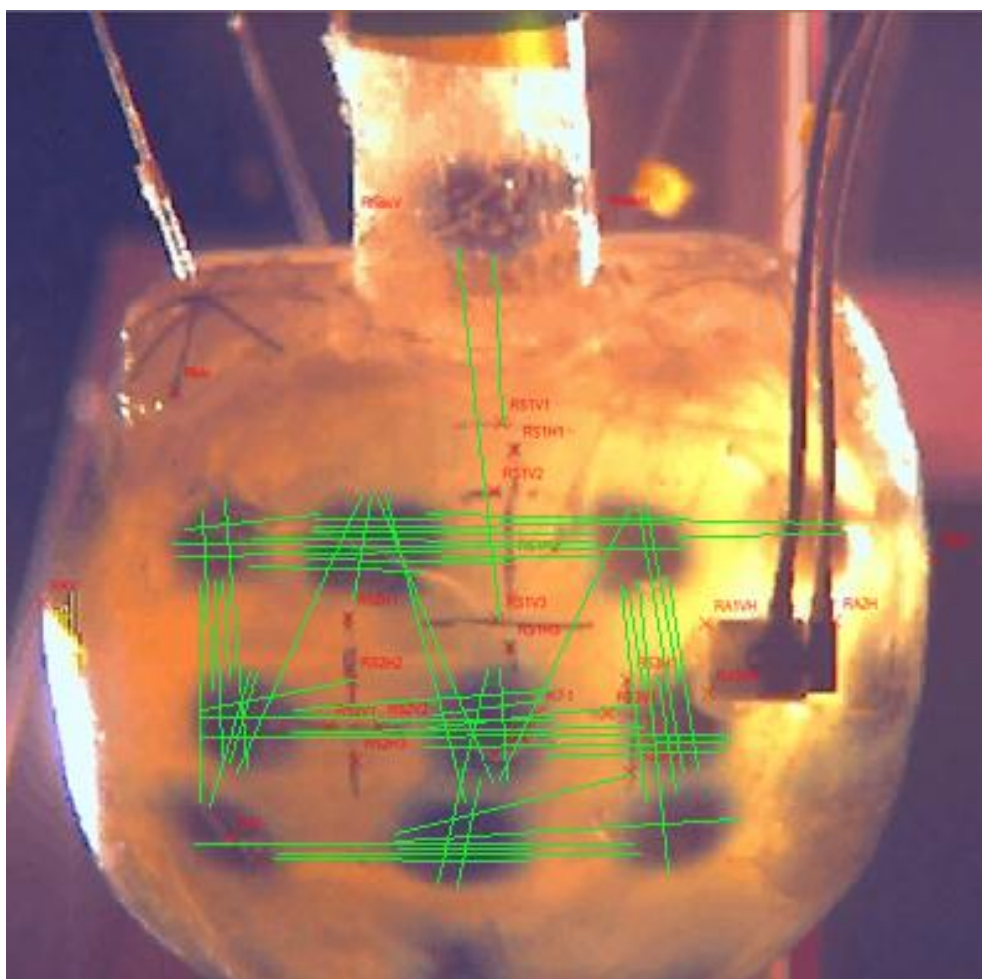


Figur 10. 12 - Den blåa linjens procentuella längdändring relativt skallens rörelser.

Eftersom referenspunkterna ligger på skallens yta och punkterna på märkpunkterna ligger en bit in i hjärnan kommer den blåa linjen och referenslinjen inte att förflytta sig lika mycket när huvudmodellen roterar. Dessutom är märkpunkterna inte sfäriska och således ändrar form då skallmodellen roterar efter islaget. Detta leder till att de artificiella punkterna inte ligger stilla i förhållande till hjärnans rörelser. Dessa problem är troligtvis orsakerna till att grafen inte är horisontell före och efter islaget. Dessutom ser det ut som att sträckan mellan punkterna ökar strax innan islaget (tiden 29-36 ms). För att undersöka vad detta beror på har sträckorna mellan den blåa linjens ändpunkter jämförts med de referenspunkter som bildade medelreferenslinjen. Dessa grafer syns i bilaga 2. Dessvärre kunde några rörelser inte utskiljas hos varken den högra eller vänstra punkten på den blåa linjen under den aktuella tiden före islaget. Vi har därför inget svar på vad den här längdökningen kan bero på.

11. ANALYS AV GRAFER

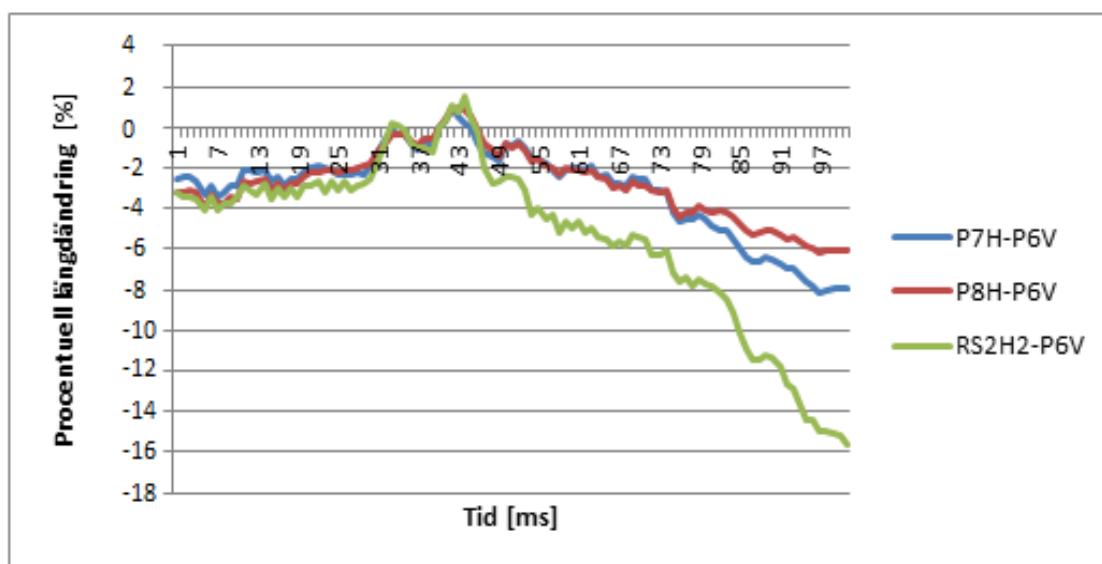
För att undersöka hur de olika punkterna rör sig inuti skallen har grafer plottats upp på samma sätt som i exempel 1 och 2 i föregående kapitel. Vilka sträckor som har mätts upp under arbetets gång ses som gröna streck i figur 11.1. De röda punkter som syns i figuren är de referenspunkter som i rörelseanalysprogrammet har satts på utsidan av skallen.



Figur 11. 1 - Uppmätta sträckor på huvudmodellen.

11.1 Exempel 3

För att lättare kunna se hur punkterna i hjärnan rör sig i förhållande till skallen lades flera sträckor som hade samma startpunkt in i samma graf. De olika sträckorna subtraherades med en lämplig referenslinje precis som tidigare. Grafen som visar den procentuella längdändringen för sträckor som har punkten P6V som startpunkt visas i figur 11.2.

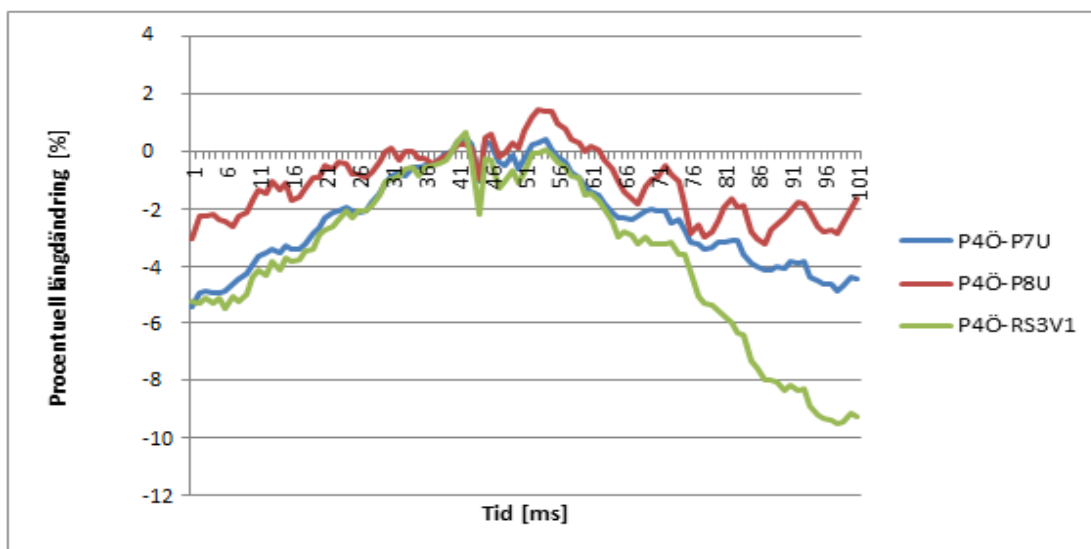


Figur 11. 2 - Den procentuella längdändringen hos sträckor innehållande punkten P6V.

Den röda kurvan som visar sträckan P8H-P6V är samma kurva som räknades ut i exempel 2 i föregående kapitel. Två av kurvorna i grafen representerar en sträcka mellan två punkter eftersom dessa sträckor blir längre jämfört med om man hade mätt mellan punkten P6V och en referenspunkt. Den gröna kurvan representerar däremot en sträcka mellan P6V och en referenspunkt för att se hur detta påverkar resultatet på grafen. Grafen gjordes eftersom om alla sträckor som utgår från samma punkt (i det här fallet P6V) har samma längdändring borde det tyda på att den punkten verkligen rör sig såsom graferna visar. Den blåa och den röda kurvan har båda subtraherats med samma referenslinje, nämligen medelreferenslinjen, medan den gröna kurvan har subtraherats med referenslinjen RS3H1-RS2H2. Detta gör likheterna mellan den blåa och den röda kurvan mindre betydelsefulla eftersom det kan vara medelreferenslinjen som utgör rörelserna i dessa kurvor istället för punkten P6V. Den gröna kurvan avviker från de andra två, kanske på grund av att den har subtraherats med en annan referenslinje, dock visar den samma rörelser som de två andra kurvorna i tidsintervallet 31-41 millisekunder, och det tyder på att det är punkten P6V som rör sig såsom graferna visar istället för referenslinjerna.

11.2 Exempel 4

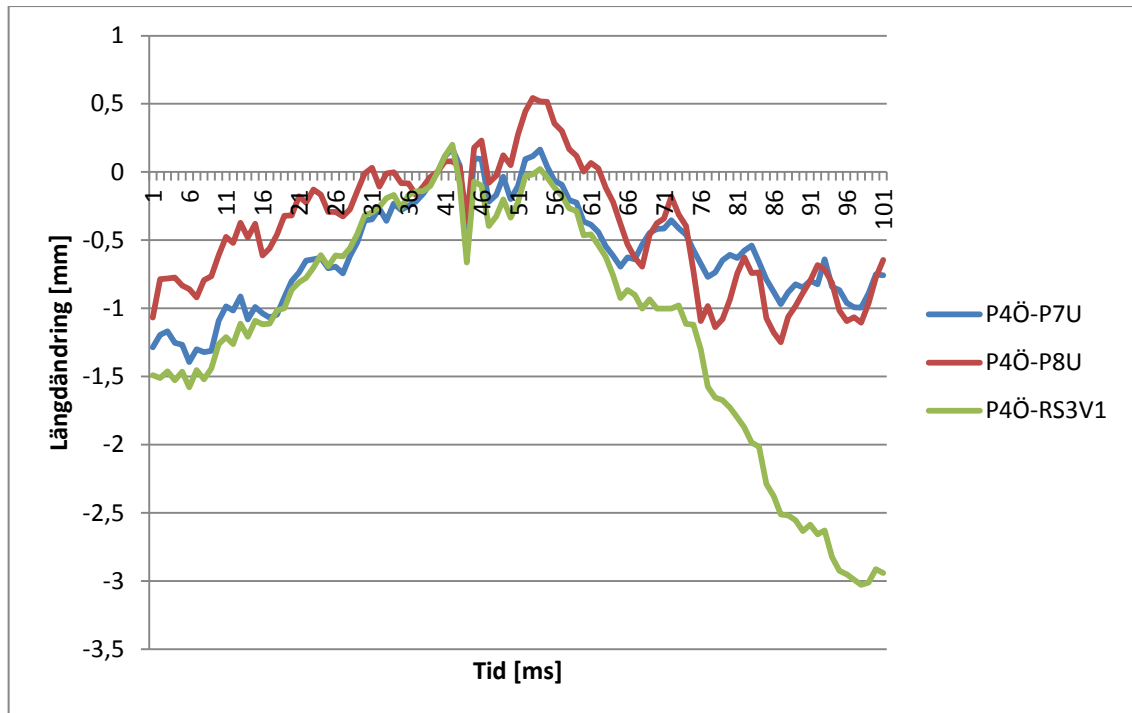
Figur 11.3 nedan visar de procentuella längdändringarna i y-led för tre sträckor som startar på punkten P4Ö. Man ser att alla kurvorna spikar nedåt vid islagstillfället vid tiden 40 ms, nämligen med drygt en procent. Om teorin ovan stämmer betyder detta i sin tur att det är punkten P4Ö som rör sig och inte punkterna P7U, P8U eller RS3V1.



Figur 11. 3 - Den procentuella längdändringen hos sträckor innehållande P4Ö.

I bilaga 3 beräknas bland annat tiden för islaget med hjälp av värdena från accelerometrarna. Resultatet blev att stöttiden är ca 3 millisekunder lång, vilket verkar stämma överrens med grafen ovan.

Det är möjligt att omvandla pixlar till millimeter så att man kan se hur långt punkterna i graferna faktiskt rör sig. Detta görs genom att först multiplicera värdena i grafen ovan med varje sträckas längd i pixlar för att ta reda på hur många pixlar som sträckornas längd varierar inuti skallen. Detta värde divideras med antalet pixlar som bildar längden 1 millimeter i verkligheten. Kvoten pixlar per millimeter beräknades genom att dividera antalet pixlar som en referenslinje består av med dess riktiga längd i millimeter. Resultatet är en graf som visar längdändringen i millimeter relativt längden strax innan islaget för sträckorna som visas i figur 11.3. Figur 11.4 visar längdändringen i millimeter för grafen ovan.



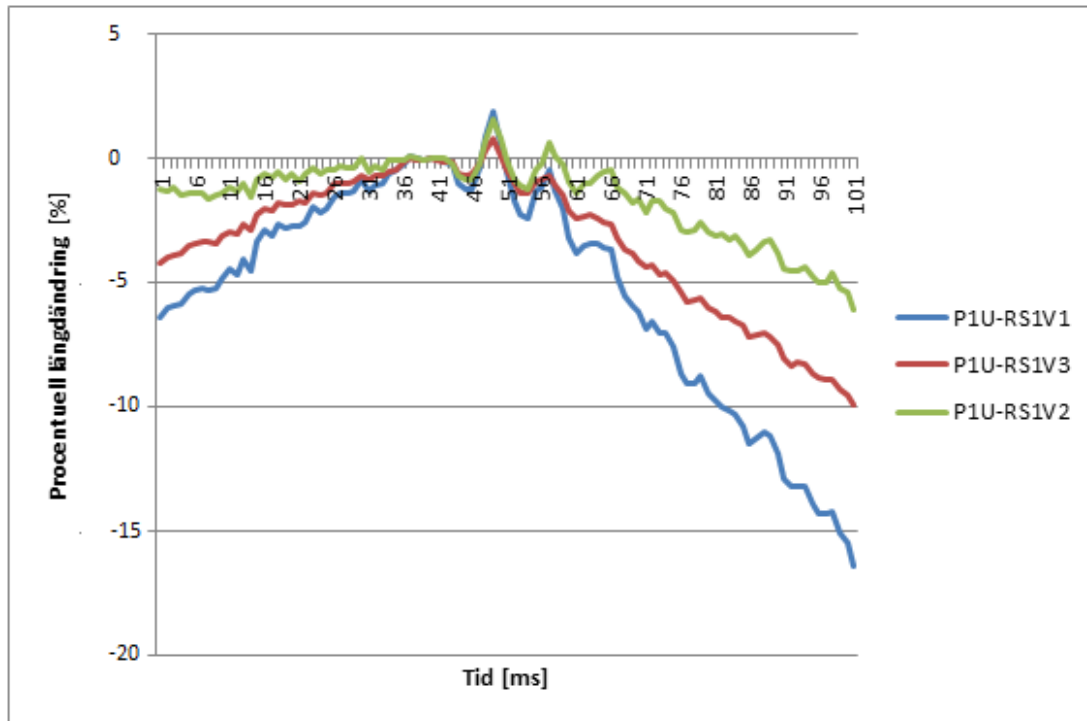
Figur 11. 4 - Den verkliga längdändringen hos sträckor innehållande P4Ö.

Enligt figur 11.4 är rörelserna så stora att man borde kunna se dem direkt i filmen, men tyvärr beror dessa rörelser, om inte enbart så till största delen, på grund av ljuset som reflekteras mot punkten P4Ö vid islaget.

Flera liknande analyser utfördes utifrån olika punkter där några av dem syns i bilaga 4, men tyvärr är många av graferna för ojämna och osannolika för att kunna bevisa att vissa delar av hjärnan faktiskt rör sig. Den enda märkpunkten som uppvisar rörelser tydligt synbara för blotta ögat i filmen är märkpunkten inuti halsröret, vilken studeras i exempel 5.

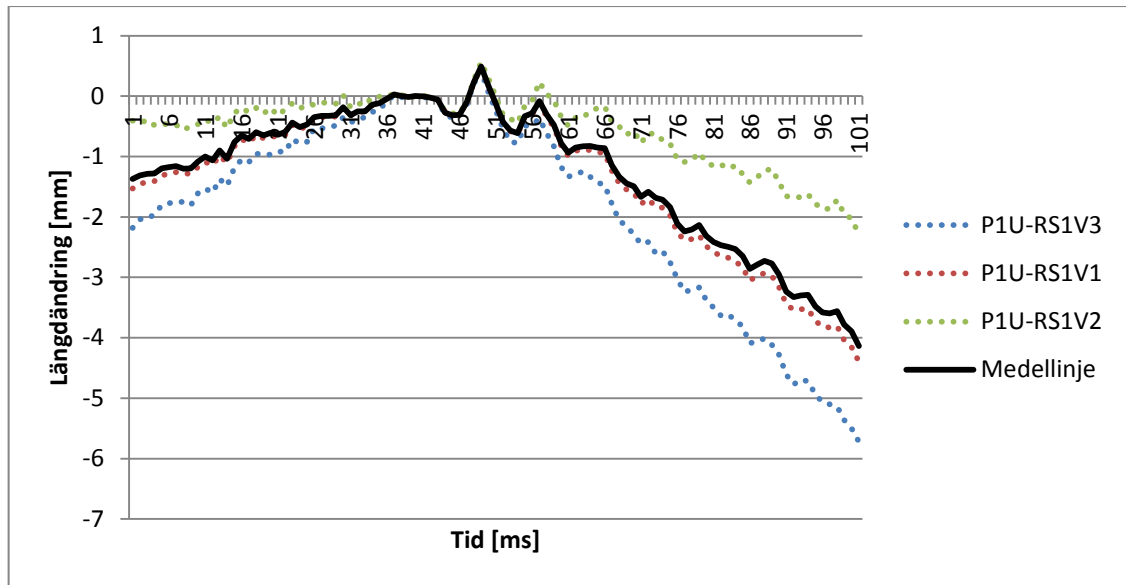
11.3 Exempel 5

För att analysera hur märkpunkten i röret, som kallas för P1U, rör sig har ett antal kurvor tagits fram på samma sätt som tidigare och kan ses i figur 11.5.



Figur 11. 5 - Den procentuella längdändringen hos sträckor innehållande P1U.

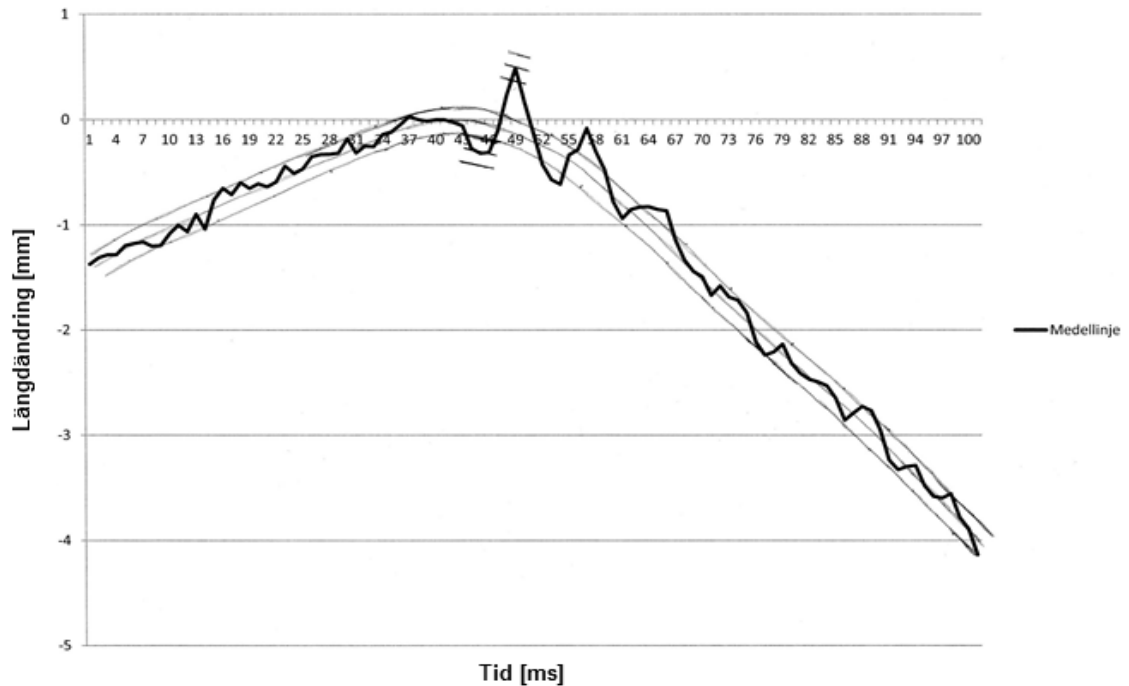
Alla kurvor i figuren ovan har subtraherats med olika referenslinjer. Alla kurvor beter sig på ungefär samma sätt under tiden för islaget vilket tyder på att det är punkten P1U som rör sig och inte någon av referenspunkterna. För att lättare se om kurvorna verkar trovärdiga har sträckorna plottats upp som längdändringar i millimeter på samma sätt som tidigare. Resultatet ses i figur 11.6, där även medelkurvan för de tre kurvorna visas.



Figur 11. 6 - Den verkliga längdändringen hos sträckor innehållande P1U.

I grafen ovan ses att punkten P1U först rör sig ca 0,27 mm in mot skallens mitt följt av att 4 millisekunder efter att huvudmodellen kommit i kontakt med polykarbonatskivan börjar P1U röra sig ca 0,83 mm i motsatt riktning. Punktens periodtid är ca 8 millisekunder.

I figur 11.7 ses samma medelkurva som ovan, där vi för hand har ritat ut streck som följer kurvan vid tiderna då den inte är påverkad av islaget. Då kan man se hur stor osäkerheten är i grafen (det vill säga hur mycket ”rippel” det finns).



Figur 11. 7 - Visualisering av mätosäkerhet hos medelvärdet av sträckorna innehållande PIU.

I figuren ovan är ett streck utritat som följer medelkurvan om den skulle förenklas avsevärt. Dessutom är ytterligare två streck utritade som bildar en "korridor", korridorens tjocklek symboliserar grafens osäkerhet. De delar av kurvan som ligger utanför korridoren kan således antas att inte bero på osäkerhet i grafen, utan på att det faktiskt uppkommer rörelse i punkten PIU. De tre korta streck som har gjorts på linjens lokala max-och minimipunkt efter islaget visar hur mycket dessa punkter kan variera på grund av osäkerheten i grafen. Avstånden mellan dessa streck representerar en verklig standardavvikelse på 0,126 millimeter.

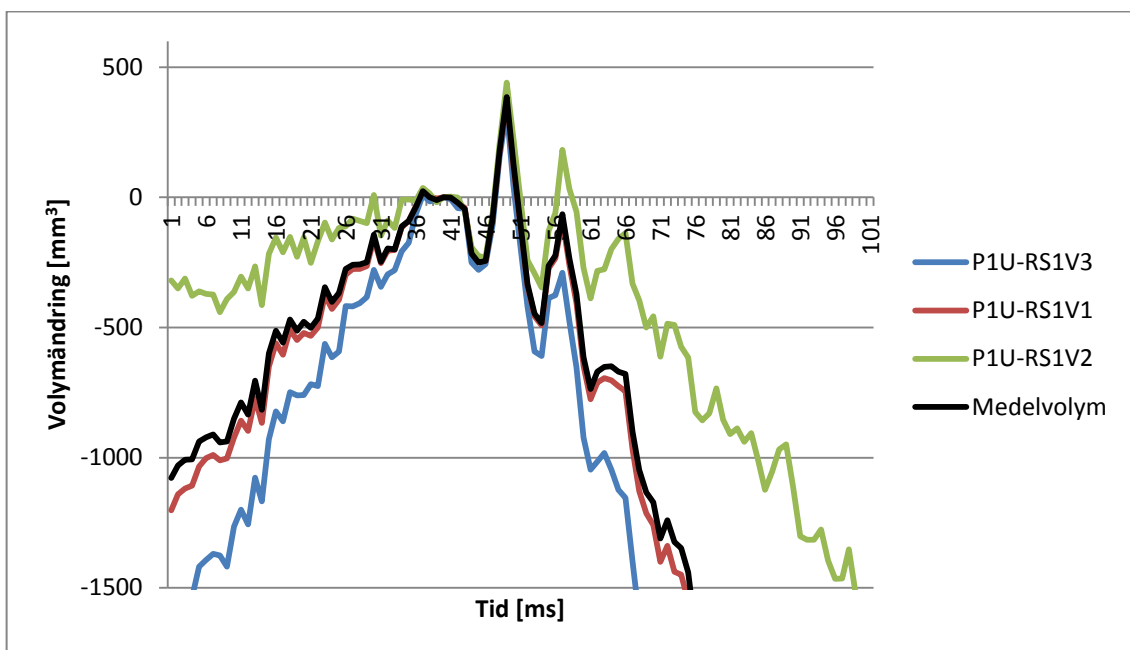
11.4 Beräkning av skallmodellens volymändring under islaget

I figur 11.7 sågs hur märkpunkten i röret rörde sig till följd av islaget. Intressant kan nu vara att ta reda på vilken volymförändring som sker på hjärnan i skallen. Det som behövs för att ta reda på hjärnans volymändring är rörets innerarea. Innerarean approximerades till en ellips och den beräknades med hjälp av nedanstående formel:

$$A = a \cdot b \cdot \pi \quad [54] (10)$$

Där a och b är ellipsens två radier.

Arean blev ($A=18,5 \cdot 13,5 \cdot \pi$) ca 785 mm^2 . Då denna multipliceras ihop med rörelserna för märkpunkten i röret fås figur 11.8 som visas nedan.



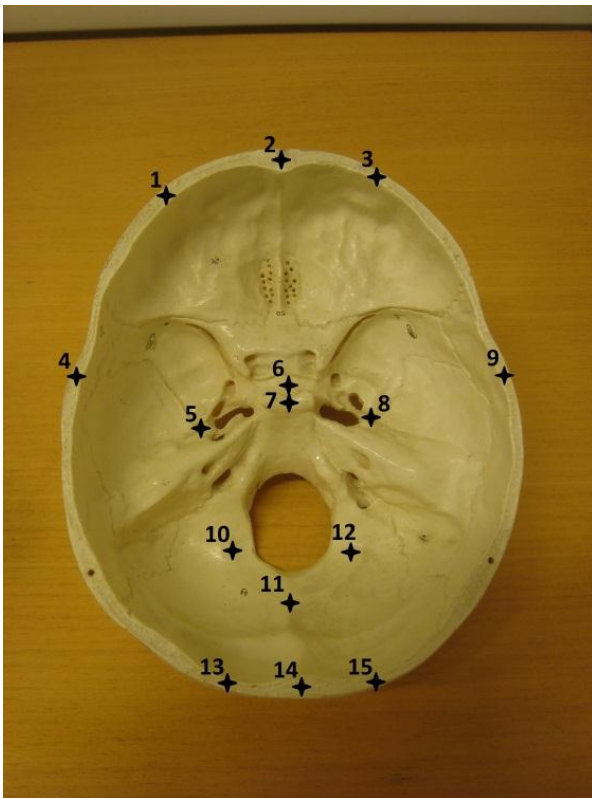
Figur 11. 8 - Volympassage genom röret.

11.5 Analys av skallmodellens volymändring under islaget

I figur 11.8 ses att ca $215 \pm 198 \text{ mm}^3$ hjärnblandning trycks ner i röret i samband med islaget och kort därefter trycks ca $600 \pm 198 \text{ mm}^3$ upp i röret. Avvikelserna beräknades genom att multiplicera standardavvikelserna med rörets innerarea. Detta betyder att hjärnans volym först ökar för att sedan minska. Kort därefter ökar hjärnans volym igen vid tidpunkten 49 millisekunder för att sedan börja återgå till sitt ursprungliga tillstånd. Detta kan tyda på att contre-coupskador uppstår då hjärnblandningen trycks uppåt i röret, eftersom det kan bero på att hjärnan trycks bakåt och således deformeras och pressas upp i röret. Då hjärnblandningen trycks nedåt i röret, vilket är placerat på den bakre delen av skallmodellen, skulle detta kunna tyda på att det uppstår en trycksänkning vid skallens bakre del. Således borde det vid denna tid vara ett förhöjt tryck på främre delen av hjärnan, vilket skulle kunna ge en coupskada.

12. SKALLMODELLENS TJOCKLEK

Eftersom skallen gick sönder under krocktestet så fick vi möjligheten att kontrollera hur väl vår skalles tjocklek stämmer överrens med verkligheten. Pannbenets tjocklek mättes på den skallmodell som använts vid avgjutningen och detta värde jämfördes med pannbenets medeltjocklek för en verklig skalle. Då konstaterades att skallmodellen verkar stämma väl med en riktig skalle. [55] Därför valdes att vår skalles godstjocklek skulle jämföras med skallmodellens godstjocklek. Skallarna är väldigt svåra att mäta på, ty deras godstjocklek varierar oupphörligen. Några mätningar gjordes först på vår skalle och sedan så identiska mätningar som möjligt utfördes på skallmodellen. De punkter där tjockleken mättes syns i figur 12.1. Sedan togs tjocklekarna från de olika skallarnas mätpunkter och fördes in i tabell 5. Den procentuella godstjockleksökningen mellan vår skalle och skallmodellen kan också ses i tabellen.



Figur 12. 1 - Punkter där skallmodellens tjocklek har kontrollerats.

Tabell 5 – Skallmodellernas olika tjocklekar och den procentuella skillnaden mellan dem.

	Original [mm]	Epoxiskalle [mm]	Procentuell skillnad
Topp	6,3	8,1	29 %
Fram mitt	9,6	10	4 %
Fram, ej mitt	7,6	5,8	-24 %
Vänster sida	5,3	7,25	37 %
Höger sida	5,35	4,25	-21 %
Bakom "röret"	7,75	9,7	25 %
Höger sida om "röret"	9	18	100 %
Vänster sida om "röret"	6	13,7	128 %
Undersida rör - "inre knölen"	36,75	43,65	19 %
Tjocklek till bredvid knöl	18	36,5	103 %
Inre nedsänkning höger	12,75	19,5	53 %

Vår skalle har haft ett tunnare skal på höger sida än på den vänstra vilket måste bero på att kärnan inte har hamnat helt i mitten vid gjutningen. Det syns även att överdelen av skallen är lite tjockare än den ska, men framförallt är det den undre som är för tjock. Detta blev den eftersom vi vid tillverkningen var tvungna att uppskatta hur ytterformen vilken skallen gjöts i skulle se ut undertill, eftersom vi inte kunde gjuta lika komplicerad geometri som skallmodellens undersida. Vi var vid gjutningen mer rädda för att undersidan skulle bli för tunn än för tjock, varför ytterformen valdes att göras så pass djup som den gjordes.

13. SLUTSATS

13.1 Resultat

Under arbetets gång har en mekanisk modell av huvudet tagits fram och krocktestats. Den modell som gjorts har tillverkats i form av en hjärnskål, vilket antas vara en god approximation av ett människohuvud då hjärnans rörelser relativt skallen avses att studeras. De kan uppstå då huvudet accelereras vid exempelvis en bilkrock. Rörelser på hjärnan i förhållande till skallen har försökts observeras i rörelseanalysprogrammet TEMA Automotive. Dessvärre kan vi inte fastställa hur hjärnan rör sig i förhållande till skallen. Den hjärnblandning vars rörelser kan ses befinner sig i röret vid nackhålet. I början av islaget trycks $215 \pm 198 \text{ mm}^3$ hjärnblandning ner i röret och kort därefter trycks ca $600 \pm 198 \text{ mm}^3$ upp i röret. Detta antas bero på en volymändring av skallen och/eller en tryckförändring hos hjärnblandningen. Det kan även tyda på att contre-coup uppstår då hjärnblandningen trycks upp i röret.

13.2 Diskussion

Gjutning är tillverkningsmetod med vilken man på ett kostnadseffektivt sätt kan ta fram en skallmodell med en form och tjockleksvariation likt en verklig skalle. Tyvärr har skallmodellen i detta arbete blivit något oprecis, främst för att något bra sätt att fixera kärnan på rätt plats i formen inte har kommit på, men också för att utformningen då skallens överkäke togs bort var svår att bestämma. Vid den aktuella gjutningen så rann lite av epoxin mellan formhalvorna. Det merjobb som krävdes för att reparera gjuteffekten hade kunnat undvikas genom att låta det fogningsämnet mellan formhalvorna stelna innan epoxin fylldes i formen. Tillverkningstiden av formarna hade kunnat minskas genom att bygga upp formarna av flera lager gips som får stelna mellan gångerna de appliceras. Här gjordes istället avgjutningen i ett gipsbad, vilket gav väldigt tjocka formar som tar väldigt lång tid att torka.

Skallmodellen hade en tjockleksvariation som inte stämmer överens med den hos en riktig skalle. Det gör att skallmodellen inte deformeras på samma sätt som en riktig skalle. Överlag var tjockleken större än hos en riktig skalle vilket gör att skallmodellens rörelser bli mindre vid islaget än det skulle bli i verkligheten.

Skallmodellen sprack under det andra krocktestet på grund av att den epoxityp som hade använts var för spröd och kunde inte töjas ut tillräckligt mycket innan brott. Dessutom kan rörelserna i hjärnan blivit tydligare under krocktestet om ett mer elastiskt material använts, men på grund av tidsbrist kunde dessvärre inte en ny skalle av ett mer elastiskt material tillverkas. Det material som hade valts om en ny skallmodell skulle tillverkas är en flexibel epoxi vilket även den kvantitativa metoden för materialval visade som det mest lämpliga materialet.

Anledningen till att några rörelser för hjärnan inte kunnat bestämmas är att rörelserna är mycket små. Detta beror på att skallen hade för låg hastighet (ca 19 km/h) vid det första islagstillfället och i det andra, då hastigheten var högre (ca 25 km/h), gick huvudmodellen sönder. Rörelserna av hjärnan hade även underlättats om skallen varit av ett mer elastiskt

material och ifall märkpunkterna hade haft skarpare kanter. På filmen från höghastighetskarmeran från det första islaget syns hur skallen börjar rotera efter islaget, det har med andra ord inte uppstått en rak stöt. Detta försvårar analyseringen av hjärnans rörelser, ty märk- och referenspunkterna ändrar djup i bilden olika mycket beroende på var på skallen de befinner sig, vilket orsakar olika mycket parallaxfel för olika punkter på/i huvudmodellen. Eftersom märkpunkterna i hjärnan inte var sfäriska ändrar de på grund av rotationen utseende på filmen, vilket gör att märkpunkternas kanter ser ut att ändra läge även ifall märkpunkten är stilla i förhållande till skallen. Hade huvudmodellen inte spruckit under det andra krocktestet hade hjärnan troligtvis uppvisat större rörelser inuti skallen jämfört med det första krocktestet. Dock visade filmen från det andra krocktestet upp större rotationer av huvudmodellen redan innan islaget vilket leder till att huvudmodellen antagligen hade roterat mer även efter islaget, vilket hade det gjort svårt att analysera märkpunkternas rörelser. Således hade förmodligen inte heller det andra krocktestet kunnat bevisa några tydliga rörelser av hjärnblandningen. För att lösa problemet angående rotationen kunde en annan testtrigg ha valts. En testtrigg där huvudmodellen åker i en rak bana och är mer fixerad innan islaget hade varit mer lämpligt, exempelvis koncept ett – lutande skivan eller koncept två - gummibandet.

Risken finns att delar av hjärnan häftat fast vid skallen. Risken för detta är högst vid undersidan av huvudet eftersom vi där inte kunnat få bort allt gips. Den resulterande volymändringen kan antas vara något mindre än vad som har observerats. Detta eftersom hjärnblandningen kan ha häftat fast vid rörets kanter och således gett en större rörelse i mitten av röret där märkpunkten befinner sig.

Accelerometrarna uppmätte G-krafterna som huvudmodellen utsattes för i islagsriktningen respektive dess normal längs marken till 387 G respektive 269 G. Om skallen endast rört sig rätlinjigt, vilket var avsikten, hade det senare mätvärdet varit noll. Med andra ord har en rotationsacceleration av huvudmodellen uppstått på grund av islaget. Mätvärdena från accelerometrarna felar ifall det är så att givarna inte placerats exakt i de riktningar som har avsetts att mätas. På filmen från islaget syns även att den frigolitbit på vilken accelerometrarna har placerats flexar under islaget vilket gör de uppmätta G-krafterna mindre än de är i verkligheten.

Skallmodellen hade en tjockleksvariation som inte stämmer överens med den hos en riktig skalle. Det gör att skallmodellen inte deformeras på samma sätt som en riktig skalle. Överlag var tjockleken större än hos en riktig skalle vilket gör att skallmodellens rörelser bli mindre vid islaget än det skulle bli i verkligheten.

13.3 Att tänka på vid framtida projekt

Av det utförda arbetet kan följande punkter vara tänkvärda att iaktta då en liknande huvudmodell avses att tillverkas och testas:

- Tillverka skallen i ett material som inte är så sprött. Om ett material med lägre elasticitetsmodul väljs kommer hjärnans rörelser att bli tydligare.
- Använd märkpunkter med skarpa gränser. Märkpunkterna bör även vara sfäriska så att de inte ser ut att ändra form ifall huvudet roteras.
- Gjutning som tillverkningsmetod är billig eftersom den kan utföras på egen hand, dock kan det vara svårt att tillverka en skallemodell med samma tjockleksvariation som hos en verklig.
- Sätt ut fler och tydligare referensstreck på skallen.
- Använd en annan testrigg. Pendeln är snabb och billig att framställa, men är främst användbar vid låga hastigheter.
- Använd någon form av stötutjämnande material för att efterlikna huden. Här har ytan mellan skallen och polykarbonatskivan varit mycket liten vilket gjort att det uppkommit mycket stora och onaturliga spänningskoncentrationer på huvudmodellen.
- Fäst frigolitbiten på vilken accelerometergivarna är placerade med mer snabbepoxi för att minska frigolitbitens rörelse och/eller fäst givarna på ett styvare materialstycke.
- För att minska parallaxfelet kan kameran placeras längre från islaget.
- Försök ta fram den yta, genom vilken hastighetsvektorn går då den startar i huvudmodellens tyngdpunkt. Om denna yta väljs som islagpunkt minskar risken för att skallen börjar rotera efter islaget.

REFERENSER

- [1]: National Institute of Neurological Disorders and Stroke, NINDS Traumatic Brain Injury Information Page, 2012 <http://www.ninds.nih.gov> (hämtad 2012-02-06)
- [2]: Traumatic Brain Injury, Symptoms of Traumatic Brain Injury, <http://www.traumaticbraininjury.com> (hämtad 2012-02-06)
- [3]: Socialstyrelsen, Sjukskrivning vid Traumatisk hjärnskada, Hjärnskada, Hjärnskakning, 2010 <http://www.socialstyrelsen.se> (hämtad 2012-02-06)
- [4] Faul, M. et al. Traumatic Brain Injury in the United States: Emergency Department Visits, Hospitalizations and Deaths 2002–2006, U.S. Department of Health and Human Services och Centers for Disease Control and Prevention, Atlanta, 2010 (Modifierad)
- [5] U.S. Department of Health & Human Service, Centre for Disease Control and Prevention, 2010, läst i Centre for Neuro Skills, Traumatic Brain Injury Statistics, <http://www.neuroskills.com> (hämtad 2012-02-06)
- [6] Centers for Disease Control and Prevention - January 2006 Update: Traumatic Brain Injury in the United States: Emergency Department Visits, Hospitalizations, and Deaths, <http://www.cdc.gov> (hämtad 2012-02-09) (Modifierad)
- [7] Signäs, G. Benskörhet, Vårdguiden, 2011, <http://www.varldguiden.se> (hämtad 2012-04-18)
- [8] Jerrhag, D. Benvävnad, Nationalencyklopedin, <http://www.ne.se> (hämtad 2012-04-18)
- [9] Bjerneroth Lindström, G. Skelett och leder. 1177, 2006, <http://www.1177.se> (hämtad 2012-04-18) (Modifierad)
- [10] Peterson, J., C. Dechow, P. Material properties of the human cranial vault and zygoma, The Anatomical Record, vol. 274A, nr 1, sid 785-797, 2003
- [11] O. Ritchie, R., J. Buehler, M., Hansma, P. Plasticity and toughness in bone. Physics today, vol. 62, nr 6, sid. 41, 2009
- [12] Elfström, G. Grundkurs i medicin för tekniker, femte upplagan, Göteborg: Vasastadens bokbinderi AB, 1987
- [13] Moleac, Deficits after a Stroke according to its location, 2011, <http://www.neuroaid.com/en/blog> (hämtad 2012-02-10) (Modifierad)

- [14] Ivarsson, J. Physical modeling of brain and head kinematics, Göteborg: Chalmers Tekniska Högskola, 2002
- [15] Kok, A. Gyri, Wikipedia, 2007, <http://nl.wikipedia.org> (hämtad 2012-02-10)
- [16] Choudhri, Haroon F. Pia mater, Complex spine surgery, 2010, <http://www.complexspinesurgery.net/p2.html> (hämtad 2012-02-16) (Modifierad)
- [17] El Sayed, Tamer. Et al, Biomechanics of traumatic brain injury. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 197, sid 4692-4693, 2008
- [18] Ivarsson, J. Physical Modeling of Brain and Head Kinematics. Göteborg: Chalmers Reposervice, sid 6, 2002
- [19] Taber, K. H., Warden, D. L., Hurley, R. A: Blast-Related Traumatic Brain Injury: What Is Known?, American Psychiatric Publishing, Inc., vol.18, nr. 2, sid 144, 2006
- [20] Brain Injury, How Can the Brain Be Injured?, <http://www.braininjury.com> (hämtad 2012-02-08) (Modifierad)
- [21] Lindberg, O. Slaganfall. Yle – Webbdoktorn, <http://svenska.yle.fi/webbdoktorn>, 2010 (hämtad 2012-02-15)
- [22] Heldmark, T. Datortomografi vid hjärnskakning frigör tusentals sängplatser, Läkartidningen, vol. 102, nr 50, sid 3863, 2005
- [23] Statens offentliga utredningar, Kampidrott i fokus – Betänkande av proffsboxnings- och kampsportsutredningen. sid 120. Stockholm: Elanders Gotab AB, 2003
- [24] A Hovda, D. Scientific American, 2000. Citerad i Statens offentliga utredningar, Kampidrott i fokus – Betänkande av proffsboxnings- och kampsportsutredningen, sid 120, Stockholm: Elanders Gotab AB, 2003
- [25] Thomas, M., Dufour, L. Challenges of Diffuse Axonal Injury Diagnosis, Rehabilitation Nursing, vol. 34, nr. 5, sid 179, 2009
- [26] Gargollo, P., Lipson, A. Brain Trauma, Concussion and Coma – The Dana Guide. The Dana Foundation, 2007 <http://www.dana.org>. (hämtad 2012-02-15)
- [27] Findik, F., Turan, K. Materials selection for lighter wagon design with a weighted property index method, Materials & Design, vol. 37, sid 473, 2012

- [28] Kutz, M. Handbook of materials selection, New York: John Wiley & Sons, 2002
- [29] Lillemets, R. Materialval & tillverkningsmetoder – vid arbete med plaster,. Västerås: Mälardalens högskola, 2009
- [30] Klason, C., Kubát, J., Boldizar, A. (red.) och Rigdahl, M. (red.) Plaster – Materialval och materialdata. Utgåva 5, Stockholm: O8TRYCK, 2005
- [31] Hågeryd, L., Björklund, S., Lenner, M. Modern Produktionsteknik. Utgåva 2.5. Stockholm, Liber, 2010
- [32] What is plastic?, What is Profile Extrusion?, 2009, www.whatisplastic.com (hämtad 2012-04-23) (Modifierad)
- [33] Edshammar, L-E. Kompositstillverkning, del 2, från Bearbetning A till Ö, Plastforum, nr 7. sid 64, 2007 (Modifierad)
- [34] CustomPartNet, Blow Molding, 2008, <http://www.custompartnet.com> (hämtad 2012-04-23)
- [35] Plastforum, Bearbetning A till Ö - Formblåsning Sträckblåsning, nr 10, sid 82-84, 2005 (Modifierad)
- [36] Plastforum, Korta serier av rotationsgjutning ger god ekonomi, från Bearbetning A till Ö, nr 7, sid 53-58, 2006
- [37] Nordin, D. Fördjupningsarbete om gjutning, Västerås: Mälardalens högskola, 2011
- [38] Edemann, Thermoforming, <http://www.edemann.com> (hämtad 2012-04-23) (Modifierad)
- [39] Palm, W. Rapid Prototyping Primer, 1998
<http://www.me.psu.edu/lamancusa/rapidpro/primer/chapter2.htm> (hämtad 2012-04-25)
- [40] Modellteknik, Rapid prototyping, <http://www.rapidprototyping.se> (hämtad 2012-04-25)
- [41] Gnosjöregion, Fräsning, <http://www.gnosjoregion.se> (hämtad 2012-04-25)
- [42] CustomPartNet, Milling, <http://www.custompartnet.com> (hämtad 2012-04-25)
- [43] Ing-Mecanique, Le fraisage, <http://ing-mecanique.com> (hämtad 2012-04-25) (Modifierad)

- [44] Edshammar, L-E. Tillverkning av plastkompositer, del 1, från Bearbetning A till Ö, Plastforum, nr 6, sid.53-54, 2007 (Modifierad)
- [45] Lindgren, S. O. Experimental Studies of Mechanical Effects in Head Injury, Acta chirurgica Scandinavica. Supplementum 360, sid 95-96, 1966
- [46] CES EduPack 2011.2 Version 7.0.0. Granta Design Limited
- [47] Gustafson, R. 3D Printer, 3D Medialab, <http://www.3dmedialab.se> (hämtad 2012-04-25)
- [48] Construction Systems Supply, Epoxy 101: What is Epoxy?, <http://www.csscorp.net> (hämtad 2012-05-07)
- [49]L. Bruneni, J. More Than Meets The Eye-The Stories Behind the Development of Plastic Lenses, PPG Optical Products, <http://www.ppg.com> (hämtad 2012-05-08)
- [50] Lutteman, S. Tekniska landvinningar inom glasögon. Sancta Lucia Gille, 2008 <http://www.sanctaluciagille.se> (hämtad 2012-04-30).
- [51] Viebke, L. Bindemedel/Matris, Fiberkompositlaminering, 2009 <http://www.fiber.get.to> (hämtat 2012-06-04)
- [52] Viebke, L. Lamineringsmetoder, Fiberkompositlaminering, 2009 <http://www.fiber.get.to> (hämtat 2012-06-04)
- [53] Hjertmans Båttillbehör, Hjertmans Båttillbehör 2012, sid 95, 2012
- [54] Weisstein, Eric W. Ellipse, MathWorld - A Wolfram Web Resource, <http://mathworld.wolfram.com/Ellipse.html> (hämtad 2012-06-03)
- [55] A. Motherway, J. et al. The mechanical properties of cranial bone: The effect of loading rate and cranial sampling position, Journal of Biomechanics, vol. 42, nr 13, sid 2133, 2009

BILAGA 1 – BERÄKNAD EPOXIÅTGÅNG OCH EPOXIPRIS

För att beräkna åtgången av epoxi användes nedanstående formel:

$$V = \frac{4}{3} \cdot a \cdot b \cdot c \quad [\text{B1.1}] \quad (\text{B1.1})$$

Där a, b och c är ellipsoidens tre radier. Med dessa radier och en grovt uppskattad medeltjocklek på 1 cm fås materialåtgången till ca 0,7 liter enligt uträkning nedan.

$$\begin{aligned} V &= \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot a_{\text{yttre}} \cdot b_{\text{yttre}} \cdot c_{\text{yttre}} - \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot a_{\text{inre}} \cdot b_{\text{inre}} \cdot c_{\text{inre}} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot a_{\text{yttre}} \cdot \\ &b_{\text{yttre}} \cdot c_{\text{yttre}} - \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (a_{\text{yttre}} - t_{\text{medel}}) \cdot (b_{\text{yttre}} - t_{\text{medel}}) \cdot (c_{\text{yttre}} - \\ &t_{\text{medel}}) = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \frac{0,15}{2} \cdot \frac{0,18}{2} \cdot \frac{0,15}{2} - \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{0,15}{2} - 0,01\right) \cdot \left(\frac{0,18}{2} - 0,01\right) \cdot \\ &\left(\frac{0,15}{2} - 0,01\right) = 0,000704764 \text{m}^3 \approx 0,7 \text{ liter} \quad (\text{B1.2}) \end{aligned}$$

Eftersom vi även kommer göra ett rör av epoxi så ansågs en mängd av en liter (≈ 1 kg) som minimum att köpa in. Priset för minst en liter epoxi hos ett antal butiker syns i tabell B1.1.

Tabell B1.1 - Epoxipriser för olika återförsäljare.

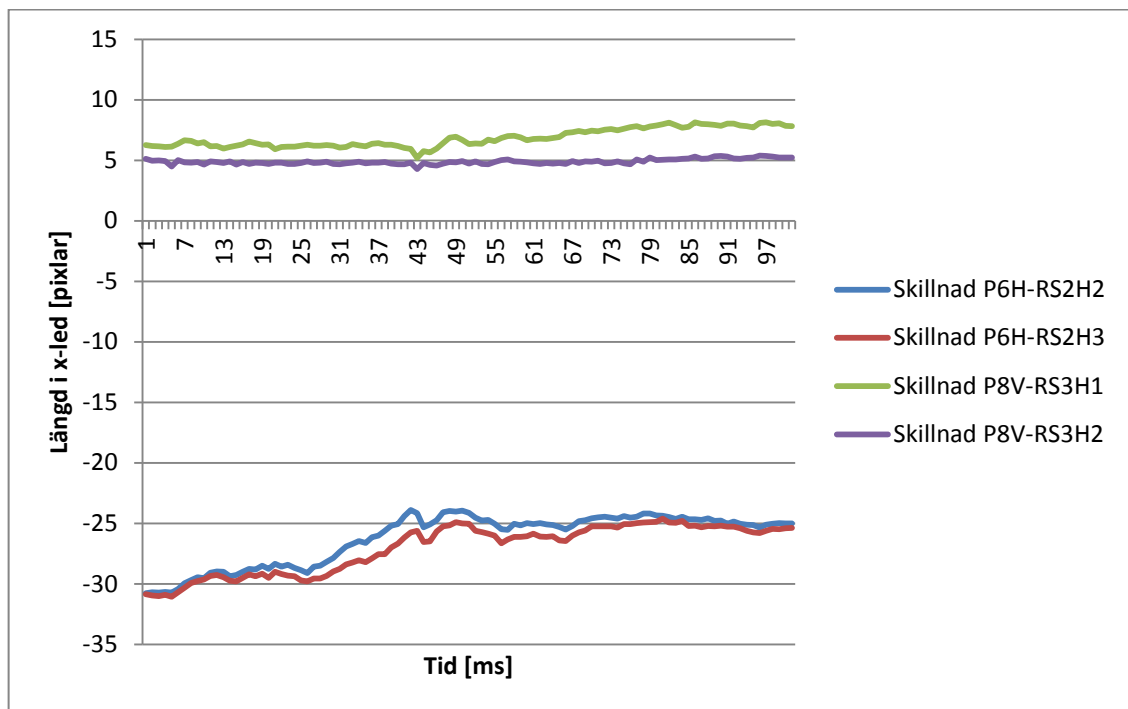
Flexibel epoxi		
Butik (ort)	kilopris	Pris för ≥ 1 kg (mängd)
Erlandsons Brygga (Sthlm)	1 381,36 kr/kg	1630 kr (1,18 kg)
Hjertmans (Gbg)	1 385,59 kr/kg	1635 kr (1,18 kg)
Benn's Mast & Båttillbehör (Sthlm)	2 076,27 kr/kg	2450 kr (1,18 kg)
Lamineringsepoxi		
Butik (ort)	kilopris	Pris för ≥ 1 kg (mängd)
Biltema (Gbg)	286,00 kr/kg	429 kr (1,50 kg)
Watski (Gbg)	332,00 kr/kg	498 kr (1,50 kg)
SeaSea båttillbehör (Gbg)	498,00 kr/kg	498 kr (1,00 kg)
ONE DESIGN CENTER (Sthlm)	356,43 kr/kg	499 kr (1,40 kg)
Erlandsons Brygga (Sthlm)	498,33 kr/kg	598 kr (1,20 kg)
Hjertmans (Gbg)	499,17 kr/kg	599 kr (1,20 kg)
Benn's Mast & Båttillbehör (Sthlm)	507,50 kr/kg	609 kr (1,20 kg)

I tabell B1.1 ses att den flexibla epoxin har ett högre kilopris än lamineringsepoxin. Den olika mängden epoxi som kan köpas in beror på att olika butiker har olika storlekar på förpackningarna.

[B1.1] Werkzeugbau Erz, Formelsammlung Geometrie, sid 12

BILAGA 2 – FÖRDJUPANDE ANALYS AV FIGUR 10.12

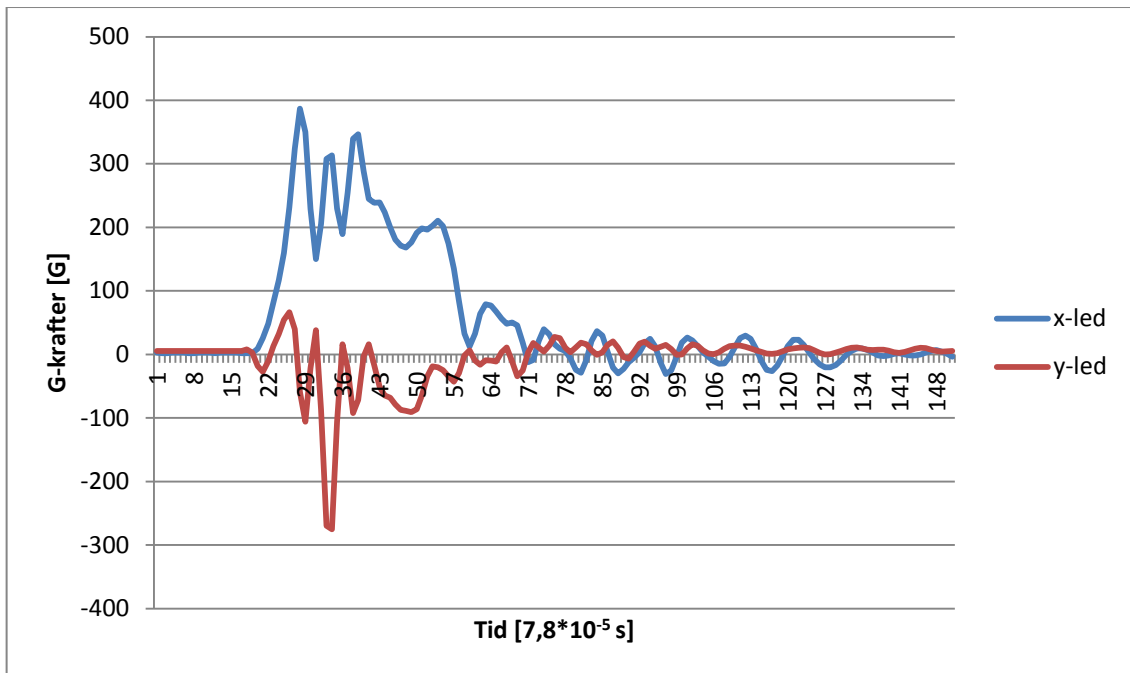
Figur 10.12, vilken användes i kapitel 10.2, kontrollerades med figur B2.1 för att avgöra om punkterna P6H och/eller P8V rör sig precis innan islaget, mellan tiderna 29 och 36 millisekunder. Dessa punkter subtraherades med medelreferenslinjens referenspunkter för att lättare se rörelser. De två översta kurvorna visar rörelser mellan P8V och två av referenspunkterna medan de två understa kurvorna symboliserar rörelser mellan P6H och de två andra referenspunkterna. Dock syns inga rörelser för dessa punkter under den aktuella tiden, de enda rörelser som kan observeras i figuren sker i samband med islaget vid tidpunkten 40 ms.



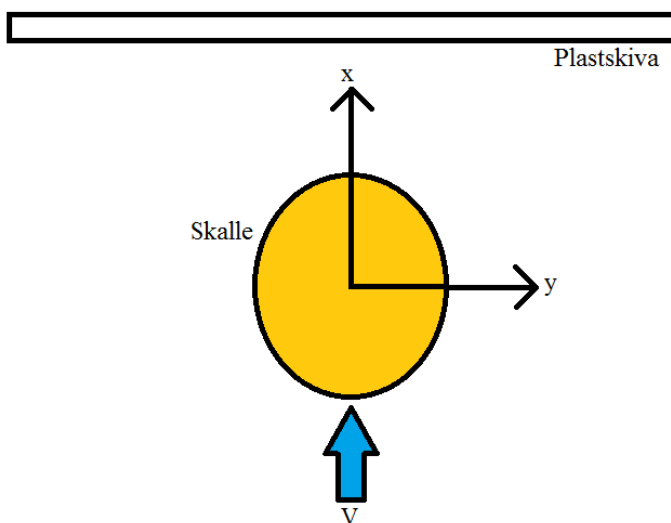
Figur B2. 1 – Längdskillnaden från några olika referenspunkter till P6H resp. P8V.

BILAGA 3 – RESULTAT FRÅN ACCELEROMETRARNA

I figur B3.1 ses hur stora G-krafter som huvudmodellen påverkades av under islaget. G-krafterna mättes i både x- och y-led, där dessa riktningar illustreras i figur B3.2. Kurvornas värden beräknades genom att dividera huvudmodellens acceleration i varje tidpunkt med tyngdaccelerationen $g=9,81 \text{ m/s}^2$.



Figur B3. 1 - Accelerometrarnas mätdata.



Figur B3. 2 - Illustrering av koordinatsystemets x- och y-riktningar.

Varje värde på x-axeln i figur B3.1 motsvarar ca $7,8 \cdot 10^{-5}$ sekunder, vilket betyder att slaget varade i ca 3 millisekunder. I idealfallet skulle det inte uppkomma några krafter i y-led vid ett frontalt slag, men så är inte fallet eftersom skallen börjar rotera vid slaget.

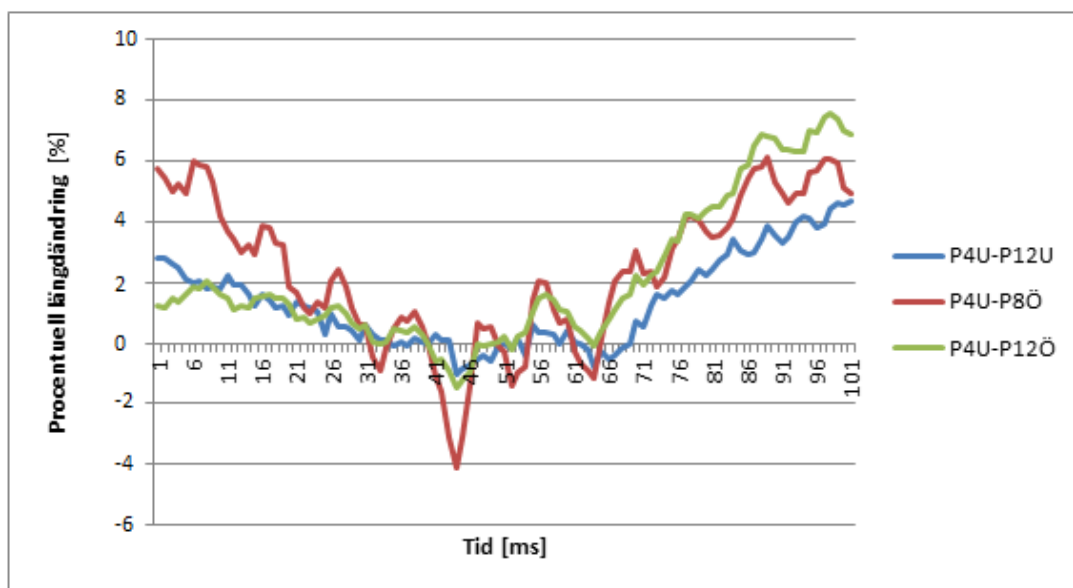
Man ser i grafen ovan att den maximala kraften som huvudet påverkades av skedde i mitten av slaget (vid $x=33$) och var 308 G i x-led och 269 G i negativ y-led, vilket med hjälp av Pythagoras sats ger en total G-kraft på 409 G om man bortser från gravitationen. Detta betyder att skallen vid den här tidpunkten upplevdes väga 409 gånger så mycket som den gör i verkligheten.

BILAGA 4 – GRAFER FÖR PUNKTERNAS RÖRELSE

B4.1 Graf för punkten P4U:s rörelse

I den här bilagan ses några av de grafer som plottades i samband med kapitel 11.2.

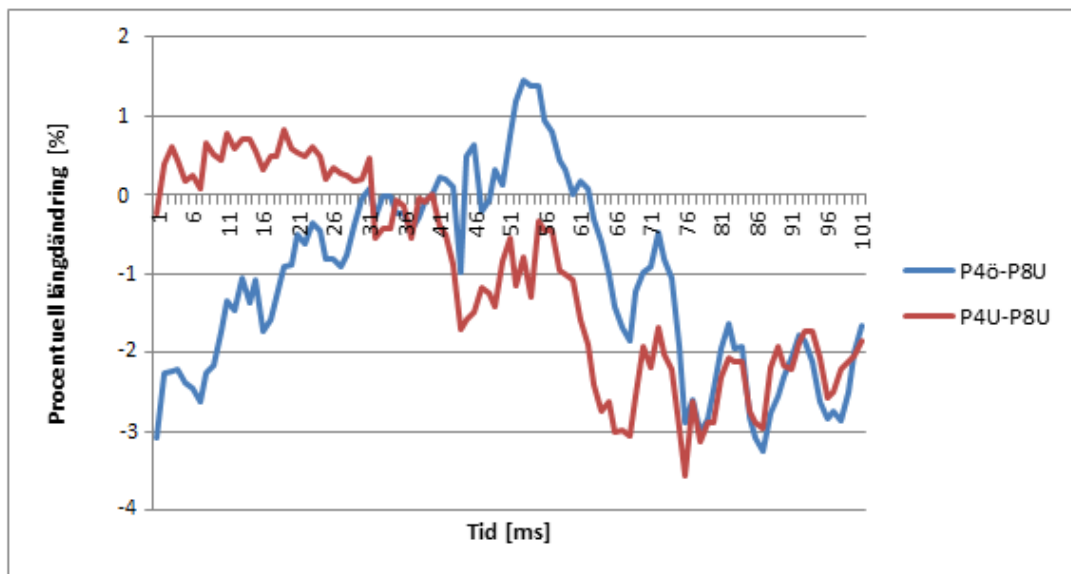
I figur B4.1 nedan ses flera kurvor för olika procentuella längdändringar för sträckor som alla har utgångspunkten P4U. Kurvan som visar sträckan mellan punkterna P4U och P8Ö spikar neråt i närheten av islagstillfället vid tiden 40 ms, men detta startas redan två millisekunder innan huvudmodellen kommer i kontakt med polykarbonatskivan. Dessutom visar de två andra kurvorna ingen stor förändring vid islagstillfället. En förklaring till det kan vara att dessa två sträckors ändpunkter rör sig lika mycket åt samma håll och bildar därför ingen längdändring, men grafen är ändå för otydlig för att kunna dra några slutsatser ifrån.



Figur B4. 1 - Den procentuella längdändringen hos sträckor innehållande P4U.

B4.2 Graf för punkten P8U:s rörelse

Hur punkten P8U rör sig visas i två kurvor vars graf ses i figur B4.2. Kurvornas ändpunkt (P4Ö respektive P4U) ligger förhållandevis nära varandra så man kan tycka att kurvorna borde se ganska lika ut. Dock visar sträckan P4Ö-P8U upp en spik i dess längdändring kort efter islaget medan sträckan P4U-P8U visar en plötslig längdminskning och en långsammare längdökning. Detta gör att även grafen nedan inte med säkerhet kan användas för att verifiera några rörelser av hjärnan.



Figur B4. 2 - Den procentuella längdändringen hos sträckor innehållande P8U.

BILAGA 5 - MATERIALKOSTNADER

I tabell B5.1 syns de materialkostnader som framtagning av huvudmodell och testrigg har inneburit. Priserna för fiskelinan, tätningssilikonet, godiset och ståltråden är uppskattade kostnader, ty det gick endast åt mindre kvantiteter än förpackningarna innehöll av dessa produkter.

Tabell B5. 1 – Materialkostnader.

Produkter	Kostnad [kr]
Lamineringsepoxi	429,00
Glycerol	175,00
Gipsputs	109,00
Gelatin	89,75
Hushållsfärg	40,90
Snabbepoxi	29,90
Släppmedel	25,00
Regel	20,00
Ättiksprit	16,90
Hink	14,90
Maskeringstejp	14,90
Sirap	13,95
Fiskelina	~10,00
Tätningssilikon	~5,00
Godis	~4,00
Ståltråd	~0,06
Summa:	998,26