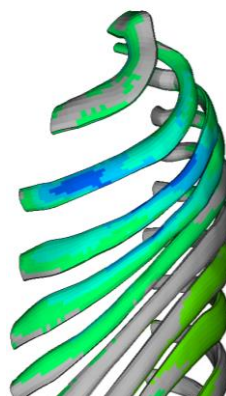
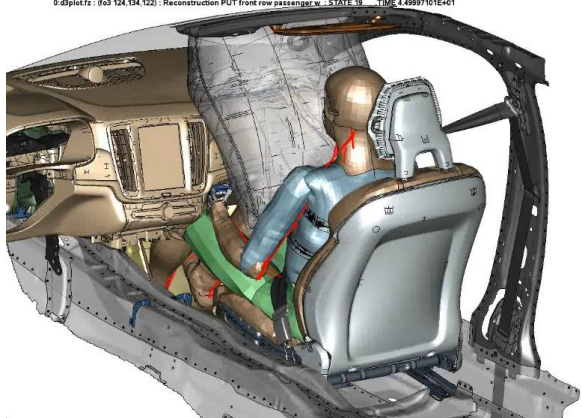


# Utveckling av implementerbara omni-direktionella bröst- och ryggradsskadekriterier för humanmodeller

Publik rapport



0:d3plotfz : (f03 124.134.122) : Reconstruction PUT front row passenger W - STATE 19 TIME 4.45997101E+01



Författare: **Bengt Pipkorn**  
Datum: **190411**  
Projekt inom **Trafiksäkerhet och automatiserade fordon**

**FFI** Fordonsstrategisk  
Forskning och  
Innovation

VINNOVA

Energimyndigheten

TRAFIKVERKET

FKG

VOLVO

SCANIA

VOLVO

# Innehållsförteckning

<b>1 Sammanfattning .....</b>	<b>3</b>
<b>2 Executive summary in English.....</b>	<b>3</b>
<b>3 Bakgrund.....</b>	<b>4</b>
<b>4 Syfte och metod .....</b>	<b>5</b>
4.1 WP 1- Utveckling av ett kriterium för prediktering av bröstskador .....	6
4.2 WP 2– Skadekriterier för bröst- och ländrygg .....	9
4.3 WP 3– Skadekriterier för huvudet .....	10
4.4 WP4 – Olycksrekonstruktioner .....	10
<b>5 Mål .....</b>	<b>11</b>
<b>6 Resultat och måluppfyllelse .....</b>	<b>12</b>
6.1 WP1 - Utveckling av ett kriterium för prediktering av bröstskador .....	12
6.2 WP 2– Skadekriterier för bröst- och ländrygg .....	14
6.3 WP 3– Skadekriterier för huvudet .....	19
6.4 WP4 – Olycksrekonstruktioner .....	21
<b>7 Spridning och publicering .....</b>	<b>26</b>
7.1 Kunskaps- och resultatspridning .....	26
7.2 Publikationer.....	26
<b>8 Slutsatser och fortsatt forskning .....</b>	<b>27</b>
<b>9 Deltagande parter och kontaktpersoner.....</b>	<b>28</b>
<b>10 Referenser.....</b>	<b>29</b>

Kort om FFI

FFI är ett samarbete mellan staten och fordonsindustrin om att gemensamt finansiera forsknings- och innovationsaktiviteter med fokus på områdena Klimat & Miljö samt Trafiksäkerhet. Satsningen innebär verksamhet för ca 1 miljard kr per år varav de offentliga medlen utgör drygt 400 Mkr.

För närvarande finns fem delprogram; Energi & Miljö, Trafiksäkerhet och automatiserade fordon, Elektronik, mjukvara och kommunikation, Hållbar produktion och Effektiva och uppkopplade transportsystem. Läs mer på [www.vinnova.se/ffi](http://www.vinnova.se/ffi).

# 1 Sammanfattning

För utveckling och utvärdering av skyddssystem i framtidens fordon krävs verktyg som kan prediktera risken för att skadas vid omni-direktionell (multidirektionell) belastning på människokroppen. Dagens krockdockor är validerade för prediktering i endast en kollisionsriktning, t.ex. frontal- eller sidokollision. Matematiska humanmodeller har däremot potential att prediktera mänsklig respons för alla typer av kollisioner. Dessutom kan humanmodeller prediktera risken för skada med en parameter eller en kombination av parametrar som är fysikaliskt relaterade till skadan. Projektet har vidareutvecklat det unika verktyget SAFER THUMS för att möjliggöra prediktering av två eller fler frakturerade revben, kotfrakturer i ländryggen, samt huvudskador.

För prediktering av revbensfrakturer har en ny generisk bröstcorg utvecklats. Den består av validerade modeller av revben nummer 1-12. Vidare är den kompletterad med en uppdaterad modell av ett generiskt bröstben samt nya modeller av musklerna som sammanbinder revbenen. Förmågan att prediktera två eller fler frakturerade revben har validerats genom att modellera publicerade komponent- och slädprov utförda med biologiska material. Dessutom har detaljerade rekonstruktioner och populations-baserade rekonstruktioner genomförts för validering av en probabilistisk revbensfrakturspredikteringsmetod.

För ryggraden genomfördes en biofidelitetsutvärdering som resulterade i att stora delar av ryggraden modellerades om. Kotornas geometri, diskar och ligament modifierades. För den nya ryggradsmodellen har ett förslag till nytt ländryggsskadekriterium med tillhörande gränsvärde för kotfraktur baserat på krafter och moment tagits fram. Dock är det önskvärt att, på samma sätt som för revbenen, prediktera risk för kotfrakturer genom ett kriterium baserat på töjning i kotan. Detta projekt har även tagit ett första steg mot detta.

För att stödja skadekriterieutvecklingen har både mekaniska och virtuella rekonstruktioner av olika komplexitet har genomförts. Två fysiska komplettbilsrekonstruktioner och 20 virtuella rekonstruktioner av specifika fältolyckor har genomförts. Dessutom har två populationsbaserade rekonstruktionsserier genomförts; en frontal- och en sidokollisionsstudie.

Baserat på uppmätningar av representativa bilstolar har en generisk, parameteriserad stol tagits fram. Den finns både som hårdvara och som matematisk modell. Vidare har den generiska stolen, såväl den fysiska som den matematiska modellen, använts i en parameterstudie där påverkan av olika stolparametrar på lasten i ryggraden utvärderats.

Projektet har pågått 160201-190228. Under projektet har 5 examensarbeten genomförts och 9 vetenskapliga artiklar har hittills publicerats (inklusive de artiklar som är under vetenskaplig granskning).

## 2 Executive summary in English

There is a need for tools and methods that enables evaluation of the protective effects of restraint systems in real accidents. Human models enable detailed evaluation and predictions of injury mechanisms and injury criteria. Such methods and tools are needed to develop occupant protection systems for the future autonomous vehicles. The most frequent injuries today are rib fractures and brain injuries. Lumbar spine injuries are not the most frequent injury type, but it is increasing and are expected to increase even more in the future autonomous vehicles when the vehicle occupants can choose more reclined sitting posture.

The aim of the project was to enhance the usefulness of finite element human body models. The specific aim is to develop, propose and evaluate accepted and implementable injury criteria including thresholds for the head, chest and lumbar spine.

The project was divided into four work packages; injury prediction evaluation and development focusing on chest injuries, thoraco-lumbar spine fractures and head injuries, respectively, in addition to a work package on accident reconstructions supporting the other three.

Focus for the development of a chest injury criterion was to enable prediction of rib fractures. For the prediction of rib fractures, a new generic chest was developed. It consists of validated models of ribs number 1-12. Furthermore, it is supplemented with an updated model of a generic sternum and new models of the muscles that connect the ribs. The ability to predict two or more fractured ribs was validated by modeling published component and sled tests with PMHS. In addition, detailed reconstructions and population-based reconstructions were performed to validate the probabilistic rib fracture prediction method.

For the spine, a biofidelity evaluation was carried out, which resulted in large parts of the spine being remodeled. The vertebral geometry, disks and ligaments were modified. For the new spine model, a proposal for a new lumbar injury criterion with associated thresholds for vertebral fracture based on forces and moments was developed. However, it is desirable, in the same way as for the ribs, to predict the risk of vertebral fractures by a criterion based on strain in the vertebrae. This project has also taken a first step towards this.

To support the development of the injury criterion, both mechanical and virtual reconstructions of various complexities were carried out. Two physical complete car reconstructions and 20 virtual reconstructions of specific field accidents have been carried out. In addition, two population-based reconstruction series were carried out; a frontal and a side impact study.

Based on measurements of representative car seats, a generic, parameterized seat was developed. It was built in as hardware and as a mathematical model. Furthermore, the generic chair, both the physical and the mathematical model, were used in a parametric study where the influence of different seat parameters on the load in the spine were evaluated.

### **3 Bakgrund**

Det finns ett ömsesidigt behov att förstå varför, hur och när skador uppstår vid trafikolyckor. För industrin behövs sådan kunskap för utveckling av skyddssystem. För vården möjliggör sådan kunskap insikt om vilka skador som kan förväntas vid olika kollisionförlopp.

För att tillgodose detta behov krävs verktyg och metoder som möjliggör studier av skyddssystemens effekt i den stora mångfald av trafikolyckor. I takt med att bilar blir säkrare och färre skadas, är det viktigt att verktygen blir mer kapabla att prediktera utfall för unika situationer för att kunna utveckla skyddssystemen därefter. För utveckling och utvärdering av framtida skyddssystem krävs därför verktyg som kan prediktera risken för att skadas vid omni-direktionell (multidirektionell) belastning på kroppen. Krockdockor är validerade för prediktering i endast en kollisionsriktning, t.ex. frontal- eller sidokollision. Matematiska humanmodeller har däremot potential att prediktera mänsklig respons för alla typer av kollisioner.

Humanmodeller möjliggör utvärdering av skademekanismer och skadekriterier på detaljerad nivå. Sådana kriterier behövs för att utveckla utvärderingsmetoder för nya skyddssystem. Dock saknas

väldefinierade accepterade kriterier för att prediktera olika skador med humanmodeller, vilket försvårar utvecklingen. Det är viktigt att samma skadekriterier predikterar risken för skada i frontal, lateral och sned kollision. Likaså att kriterierna kan diskriminera mellan olika kontaktytor t.ex. instrumentbräda, sidostruktur, tunnelkonsol och skyddssystem. Nutida bröstskadekriterier begränsas till specifika belastningsfall och kriterierna kan inte diskriminera mellan olika moderna skyddssystem (Kent et al., 2003).

Revbensfrakturer är den vanligaste bröstskadans i frontalkollisioner (Crandall et al. 2000), Carroll et al. 2010) och risken för revbensfrakturer ökar med ålder (Shimamura et al. 2003, Welsh et al. 2006). Med tanke på att befolkningen förväntas bli äldre i framtiden kommer fler att riskera revbensfrakturer vid bilolyckor, varför det finns goda motiv för att förhindra denna utveckling genom att utveckla bättre skyddssystem mot revbensfrakturer.

Traumatiska hjärnskador (TBI) orsakar ungefär hälften av de 1 300 000 årliga dödsfallen och 50 000 000 trafikskadorna i världen. HIC är det enda skadekriteriet som används idag för fordonslagstiftning och produktutvärdering. HIC skattar risken för skallfraktur från linjär acceleration över tid. Eftersom det inte finns någon konsekvent relation mellan skallfrakturer och hjärnskador är HIC otillräcklig. Ett kriterium för uppkomst av hjärnskador, som inte bara baseras på huvudets linjära rörelse, måste därför tas fram och utgå från resultaten av tidigare projekt.

Bröst- och ländryggsskador är i regel inte livshotande, men de ökar i relativ betydelse både ur vanlighet och risk för långtidskonsekvenser. En minskande skaderisk kan skönjas för de flesta kroppsdelar, utom för bröst- och ländrygg (Wang et al. 2009, Pintar et al. 2012). Begränsade studier av förekomsten av bröst- och ländryggsskador i trafikolyckor har utförts (Huelke et al. 1995, Richards et al. 2006, Jakobson et al. 2006, Ball et al. 2000, Pintar et al. 2012). I Volvo Personvagnars studie (Jakobson et al. 2006), kombinerades statistiska studier och djupstudier för att härleda determinerande faktorer och skademekanismer för bröst- och ländryggsskador, oberoende av kollisionstyp. Nyligen har det amerikanska trafiksäkerhetsverket (NHTSA) identifierat behovet av att fokusera på bröst- och ländryggsskador och man har även initierat biomekanisk forskning och provmetodsutveckling inom området tillsammans med "Medical College of Wisconsin". (Yoganandan et al. 2013). En anledning till att det är svårt att utveckla skyddssystem för bröst- och ländrygg är att det saknas tillförlitliga modeller och skadekriterier för ryggradens komponenter.

Med ambitionen att öka användbarheten av matematiska humanmodeller och för svenska fordonsindustrin utveckla ett unikt och konkurrenskraftigt verktyg för konstruktion och utveckling av avancerade (inklusive kollisionssundvikande) skyddssystem kommer följande forskningsfrågor att adresseras i projektet: hur kan bröst-, ryggrads- och huvudskador predikteras med matematiska humanmodeller för kollisioner i olika riktningar (omnidirektionellt)? Projektet syftar till att adressera både biofideliteten hos human modellen men även utveckla verktyget till att prediktera risken för en åkande att bli skadad i en fordonskollision.

## 4 Syfte och metod

Det övergripande målet är att förbättra användbarheten av matematiska humanmodeller för utveckling och utvärdering av skyddssystem för bilburna personer. Det specifika syftet med projektet är att föreslå, utvärdera och etablera skadekriterier och gränsvärden att användas tillsammans med humanmodeller. Fokus är skador på bröstkorgen, bröst- och ländryggen, samt huvudet. För att kriterierna skall vara industriellt användbara är det viktigt att de är "accepterade", vilket betyder att kriterierna kan accepteras av berörda intressenter, dvs. forskare och produktutvecklare som använder sig av skadekriterier och matematiska humanmodeller i sitt arbete. Ytterligare en viktig aspekt är att dessa kriterier är omni-direktionella, dvs. att de kan prediktera risken för att en skada ska uppstå oavsett riktning på våldet mot kroppen. Genom att

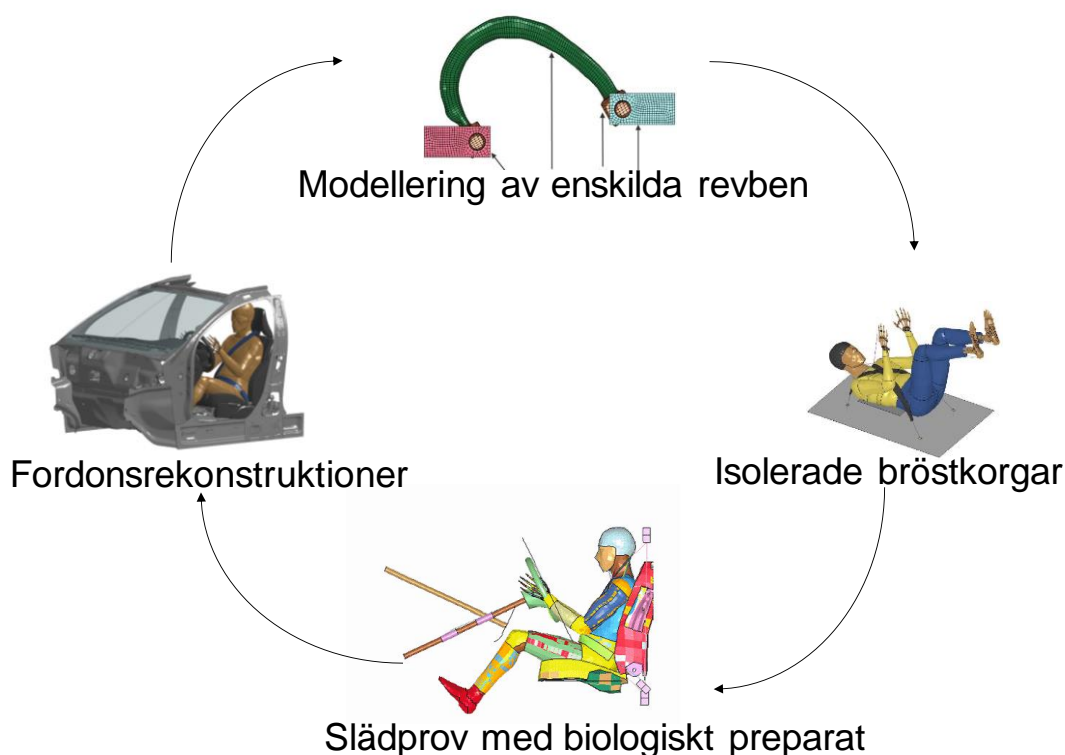
uppfylla ovanstående kan projektresultaten bidra till ett unikt och effektivt verktyg som möjliggör utveckling och utvärdering av skyddssystem oavsett krockriktning.

Projektet var ett samarbete mellan Chalmers, Volvo Cars, Sahlgrenska Universitetssjukhuset, Umeå Universitet och Autoliv och genomfördes i fyra arbetspaket (WP). Ett av arbetspaketen (WP4 - olycksrekonstruktioner) utgjorde stöd för de övriga arbetspaketen som fokuserade på de tre kroppsdelarna för kriterieutveckling (bröst, rygg och huvud).

#### **4.1 WP 1- Utveckling av ett kriterium för prediktering av bröstskador**

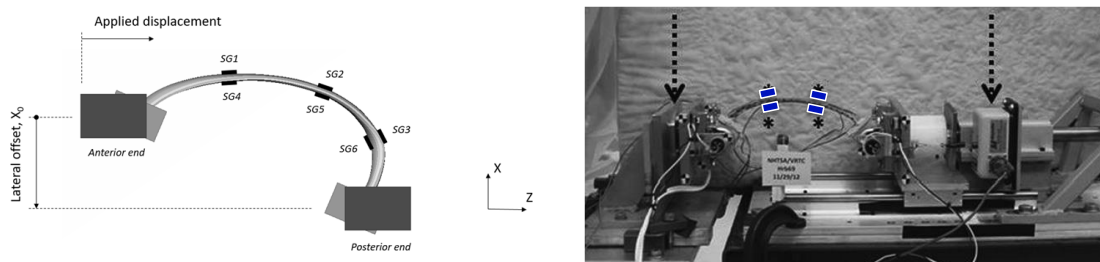
Detta arbetspaket syftade till vidareutveckla och förfina ett töjningsbaserat skadekriterium för prediktering av revbensfrakturer. Arbetet är utförligt beskrivet i Iraeus et al. (2019a), Iraeus et al. (2019b) och Pipkorn et al. (2019).

En preliminär analys av befintliga revbensmodeller visade att dessa inte motsvarade en medelman, varken geometriskt eller styvhetsmässigt. Det togs då ett beslut att utveckla nya generiska revben baserat på publicerad data. Vid sidan av detta uppdaterades också modellen för bröstbenet och musklerna som sammanbinder revbenen, de intercostala musklerna. Dessa generiska revben validerades med avseende på styvhet och töjning i tre steg ("Single rib" till "Sled test" i Figur 1). I det första steget validerades varje revben i ett böjprov. Därefter ökades komplexiteten av valideringen genom att inkludera hela bröstkorgen i isolerade thoraxprov. Tredje steget i styvhets- och töjningsvalideringen av den generiska bröstkorgen utfördes genom att modellera helkroppsslädprov. Sedan det visats att bröstkorgsmodellen kunde prediktera styvhet och revbenstöjning testades om den kunde prediktera risk för revbensfrakturer i olycksrekonstruktioner, det sista steget i Figur 1. Olika typer av olycksrekonstruktioner, med olika styrkor och svagheter, genomfördes för att totalt sett öka modellens och skadekriteriets användbarhet. Dels genomfördes detaljerade rekonstruktioner av våldokumenterade olyckor, dels genomfördes så kallade populationsbaserade rekonstruktioner av ett stort antal olyckor med begränsad information kring olyckan.



Figur 1. Processkiss av aktiviteter för vidareutveckling av bröstskadekriterium

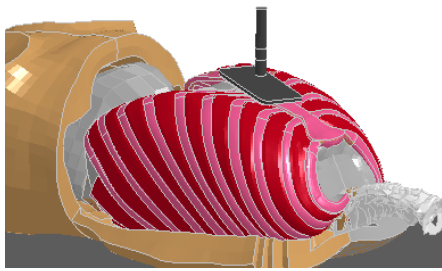
I första steget utvecklades och validerades modellerade revben 1-12 genom simulering av böjprov utförda av Kindig 2009, där revbenets främre del trycktes mot den bakre delen, d.v.s. i antero-posterior riktning (Figur 2). Modellerna validerades för prediktering av kraft vs deformation och töjning vs deformation i revbenen.



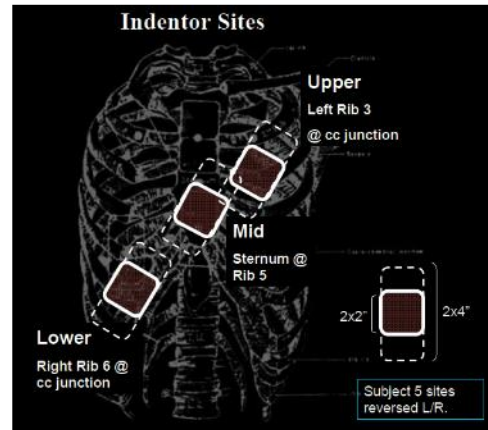
Figur 2. Provmetod för antero-posterior böjning av ett revben, Kindig 2009

Andra steget i valideringen av bröstkorgsmodellen var att simulera publicerade s.k. Isolerade thoraxprov, där en bröstkorg har lagts på en bänk och belastas ovanifrån med en kvadratisk aluminium platta (impaktor), se Figur 3a. Simuleringarna syftade till att återskapa de biologiska proven i Shaw 2007. Tre olika områden på bröstet belastades av impaktorn, se Figur 3b. Simuleringarna genomfördes med belastningshastigheten 1 m/s. Totalt fem provkonfigurationer återskapades. Modellresponsen jämfördes med data från de 16 trådtöjningsgivare som var monterade på revbenen i Shaw 2007.

Bröstkorgsmodellen validerades även för lateral belastning genom simulering av publicerat prov där en pendel träffade bröstet från sidan i 4,2-6,5 m/s (Troseille et al., 2008). Modellresponsen jämfördes med data från de 96 trådtöjningsgivare som var monterade på revbenen.



Figur 3a. Simulering av "isolerade" thorax prov



Figur 3b. Impaktorpositioner enligt Shaw 2007

I det tredje steget med helkroppsmodelleringen simulerades prov från tre olika referenser: Forman et al. (2002), Shaw et al. (2009) och Crandall et al. (2011). Proven i de tre referenserna var samtliga frontalkollisioner av olika konfigurationer. Test serie 1 (Forman et al. 2002) utfördes i en Ford Taurus interiör med DeltaV 30 km/h med totalt tre testobjekt där ingen fick fraktur. Test serie 2 (Shaw et al. 2009) utfördes i en "Gold-standard set-up" med delta V 40 km/tim, varvid alla 8 objekten fick ett flertal frakturer. Test serie 3 (Crandall et al. 2011) utfördes också i "Gold-standard set-up" med delta V 30 km/tim, ingen av de två objekten erhöll revbensfrakturer.

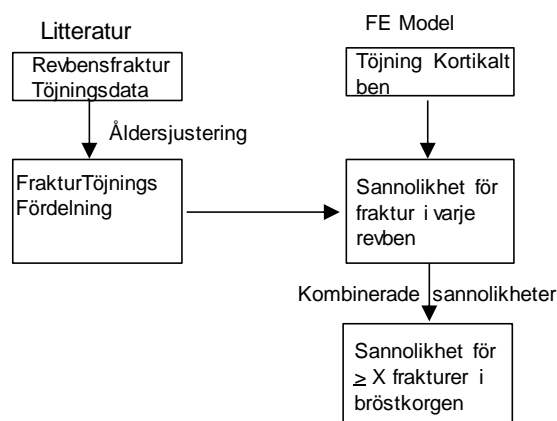
I det fjärde steget användes helkroppsmodellen för rekonstruktion av ett antal olyckor, varvid bröstskadekriteriet jämfördes med personskadefall och skadefördelning. Rekonstruktionerna; de detaljerade Volvofallen, samt de populationsbaserade rekonstruktionerna i både frontal och sidokollisioner är beskrivna under WP4. För sex av de detaljerade Volvofallen utvärderades betydelsen av storleken hos den åkande för kinematiken och risken att skadas. Utvärdering utfördes genom att transformera (morpha) THUMS modellen (50%-ils man) till längd och BMI för de sex individerna.

För respektive steg gjordes utvärderingen av kriteriet i följande ordning:

1. Prediktering av kinematiken
2. Prediktering av deformationen av bröstet (kraft vs deformation)
3. Prediktering av töjningsmönster för revben och bröstben
4. Prediktering av antalet revbens och bröstbensfrakturer

För prediktering av risken för en revbensfraktur används en probabilistisk metod (Figur 4).





Figur 4. Probabilistisk revbensfrakturpredikeringsmetod

## 4.2 WP 2– Skadekriterier för bröst- och ländrygg

Detta arbetspaket syftade till utveckling av skadekriterium/-er för bröst- och ländryggsskador och fördjupad förståelse för humanmodellens möjlighet att illustrera relevanta skademekanismer. Skador på ryggraden är mindre utforskade än skador på huvud och bröstorg, varför detta område kräver mer skademekanismsforskning än de övriga. Arbetet har delats in i följande delområden.

### **Skadeuppkomst och -mekanismer**

Analyser av olycksdatabaser och en sammanställning av tidigare publikationer inom området har genomförts med syfte att identifiera skadetyper, skadelokalisation och skademekanismer. Denna kunskap utgör underlag för framtagning av skadekriterier samt en fördjupad förståelse av skademekaniserna. Som ett komplement till litteraturen har en olycka från Volvos databas rekonstruerats, både fysiskt och virtuellt med THOR, samt virtuellt med humanmodellen. Dessa rekonstruktioner syftar till fördjupad förståelse av ryggskademekanismer samt skillnaderna mellan krockdockans och humanmodellens förmåga att återskapa detaljerad information om skadeförloppet.

### **Biomekanisk respons av ryggraden och utvärdering av humanmodell**

Med syfte att utvärdera biofideliteten hos humanmodellens bröst- och ländrygg har detaljerad genomgång av relevanta publicerade biologiska experiment sammanställts. Några utvalda experiment har rekonstruerats med den ursprungliga modellen och jämförts med resultaten från experimenten. Ursprunglig modell har modifierats med syfte att bättre kunna utvärdera skademekanismer.

### **Skadekriterieutveckling**

Baserat på identifierade skademekanismer har möjliga skadekriterier utvärderats. Detta arbete har inkluderat litteraturstudier och rekonstruktioner av biologiska experiment, med fokus på att undersöka potentialen för ett spänningsbaserat kriterium, samt ett mer pragmatiskt arbetssätt med fokus på att finna kraft- och momentrelaterade kriterier med matchning mot rekonstruktioner av detaljerade olyckor. Sammanställning och fördjupning i publicerade biologiska experiment samt skademekanismsstudier bildar underlag för kriterieutvecklingen. De detaljerade olycksrekonstruktionerna, genomförda i WP4, har använts för framtagning av en första generation av ett ryggskadekriterium, baserat på kombination av krafter och moment.

### **Parametriserad stolsmodellutveckling, inklusive provning och simuleringsserie**

Med syfte att ta fram data till utvecklingen av en generisk parametriserad stolsmodell anskaffades ett urval av bilstolar från åtta olika vanliga bilar på marknaden. En metod utvecklades för att prova stolarna kvasi-statiskt för att erhålla styvhetsdata. Baserat härpå utvecklades den generiska stolsmodellen, och den kalibrerades den mot egenskaperna erhållna från de kvasi-statiska stolsproven.

Därefter utfördes en slädsérie med den generiska stolen, både mekaniskt och i CAE, med syfte att utvärdera olika stolsegenskapers påverkan på lasterna i ryggraden i en fordonskollision. Genom att variera fjäderstyvheter för den generiska stolen och sittpositionerna studerades påverkan av responsen hos THOR dockan med fokus på bröst- och ländryggrad.

### 4.3 WP 3– Skadekriterier för huvudet

Detta arbetspaket syftade till att utvärdera ett skadekriterium/-er för huvud- och hjärnskador och erhålla en ökad förståelse för hur väl humanmodellen predikterar dessa skador. Historiskt har det utförts mycket forskning på våld mot huvudet; dessa skador är vanligt förekommande och leder ofta till allvarliga och bestående besvär. Trots det saknas konsensus om kriterier och riskfunktioner. En anledning är att mycket forskning har bedrivits på djur, och omräkning av resultaten härifrån är problematisk för att vara giltiga för människan. En annan anledning är att de olika humanmodellerna som används idag i forskning och i industrin skiljer sig åt. En ytterligare anledning är att huvudskador inte utgörs av en enda skadetyper och att skademekanismerna skiljer sig åt för olika hjärnskador, såsom kontusion och töjning av hjärnvävnad vid rotationsacceleration. Detta innebär att det är osannolikt att ett enskilt huvudskadekriterium korrekt kan prediktera risken för olika huvudskador. För att utvärdera ett skadekriterium har olyckor rekonstruerats med humanmodellen. Risken för huvudskada och hjärnskada har beräknats och utfallet har jämförts med de fastlagda skadorna hos de åkande i olyckorna.

### 4.4 WP4 – Olycksrekonstruktioner

Olyckor har analyserats och rekonstruerats med syfte att verifiera användbarheten och robustheten hos de utvalda kriterierna, samt för att öka förståelsen av humanmodellens förmåga att prediktera skadorna. Tre olika typer av rekonstruktioner har utförts; fysiska rekonstruktioner med krockdockor samt detaljerade respektive populationsbaserade rekonstruktioner med humanmodellen. De fysiska rekonstruktionerna ingick även i de detaljerade rekonstruktionerna, varvid jämförelse mellan humanmodell och krockdocka kunde göras.

#### ***Fysiska rekonstruktioner***

Två fysiska fordonsrekonstruktioner har genomförts som komplement till de detaljerade rekonstruktionerna. Förutom att båda bidrog i jämförelsen med krockdockor, var syftet med en av dem att studera ryggskaademekanismer, medan syftet med den andra var att generera indata till de virtuella rekonstruktionerna.

#### ***Detaljerade rekonstruktioner med humanmodell***

Olyckor som möjliggjorde en detaljerad rekonstruktion eftersöktes, analyserades och dokumenterades. Målet var att få en relevant spridning av krocksituationer (från sida till frontalt) och åkande, motsvarande exponering av skador i thorax och rygg. Flera databaser genomsöktes. Förutom detaljerad information om krocken, inklusive krockvåld, de åkande och skadorna, krävdes tillgång till data som möjliggjorde utveckling och validering av en interiörmodell av fordonet. För de utvalda fallen genomfördes rekonstruktion med humanmodellen, varefter sannolikhetsmått för skadorna enligt humanmodellen jämfördes med förekomsten av de faktiska skadorna.

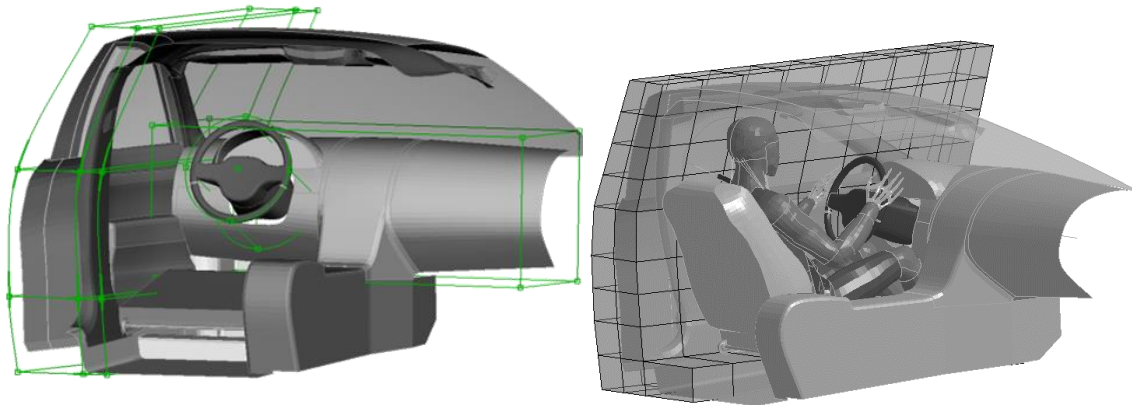
#### ***Populationsbaserade rekonstruktioner med humanmodell***

En virtuell populationsbaserad utvärdering av de föreslagna skadekriterierna utfördes med syfte att få en uppfattning om användbarheten för det föreslagna skadekriteriet. Riskfunktioner skapades från en större datamängd med både skadade och oskadade åkande ur NASS-CDS databasen. Förutom uppfattning av skadekriteriernas användbarhet utvärderades robustheten genom att variera parametrar både för fordon och den åkande.

En tidigare publicerad generisk interiörmodell användes vid simuleringarna (Iraeus, 2016 (Figur 5)). Modellen var baserad på 14 laser-uppmätta vanliga europeiska bilar. Modellen innehåller bälte

och frontalluftkudde för frontalanalyserna och sidokrockkudde och uppblåsbar gardin för sidokollisionsanalyserna.

En frontal och en lateral populationsbaserad analys genomfördes. För den frontalbaserade analysen utfördes 1000 simuleringar, och för den sidokollisionsbaserade analysen utfördes 100 simuleringar. Kollisionsparametrarna varierades i simuleringarna på samma sätt som de varierade i datamängden från NASS.



Figur 5. Modell av de populationsbaserade simuleringarna för frontal- och sidokollisioner

## 5 Mål

Målet med projektet var att utveckla "accepterade" och "implementerbara" skadekriterier med gränsvärden för matematiska humanmodeller med fokus på bröstorg, huvud, samt bröst- och ländrygg, som kan användas för att utveckla avancerade skyddssystem.

De flesta delmoment och mål har genomförts. På grund av begränsad tillgänglighet av detaljerade olycksdata och valida matchande fordonmodeller fick de detaljerade rekonstruktionerna begränsas till Volvobilar. Totalt genomfördes 20 detaljerade rekonstruktioner, och de bidrog framför allt till utvecklingen av bröstskadekriteriet och ryggsksadekriteriet. På grund av att antalet olyckor med hjärnskada var relativt litet (25 % av totalt 20 rekonstruerade olyckor) kunde inte projektet rekommendera ett huvudskadekriterium att användas i humanmodellen. Dock var målen för huvudskadekriteriedelen enligt ursprunglig målbild lägre än för de övriga kroppsdelarna.

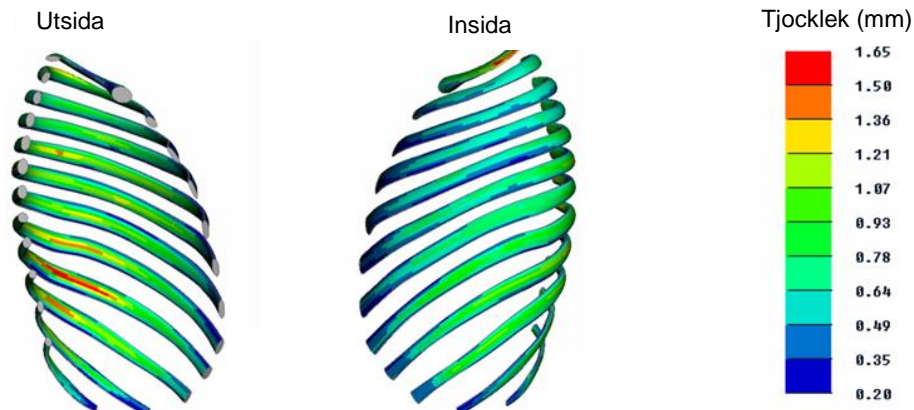
Förseningar i projektet avseende utvecklingen av den parameteriserade stolsmodellen innebar att den inte kunde inkluderas i den populationsbaserade rekonstruktionsstudien. Detta medförde att rekonstruktionsstudien inte kunde användas för att få indata till ryggsksadekriteriearbetet. Däremot, och i tillägg till ursprungligt mål, byggdes och genomfördes en parameterstudie av en fysisk stolsmodell, vilket gav ytterligare kunskapsstillskott till ryggsksadedelen. Vidare finns nu både en fysisk och virtuell stolsmodell tillgänglig som kommer användas i efterföljande projekt, som bland annat innehåller en fördjupning av ryggsksadekriterieframtagning.

Trots ovanstående avvikelser har projektet genomförts i linje med ursprungligt mål, och det har gett viktigt kunskap om skadekriterier och modellutveckling för humanmodellens fokuserade kroppsdelar. Det har resulterat i användbara verktyg och mått för industrin och viktiga bidrag till forskningen, samt flera elevarbeten.

## 6 Resultat och måluppfyllelse

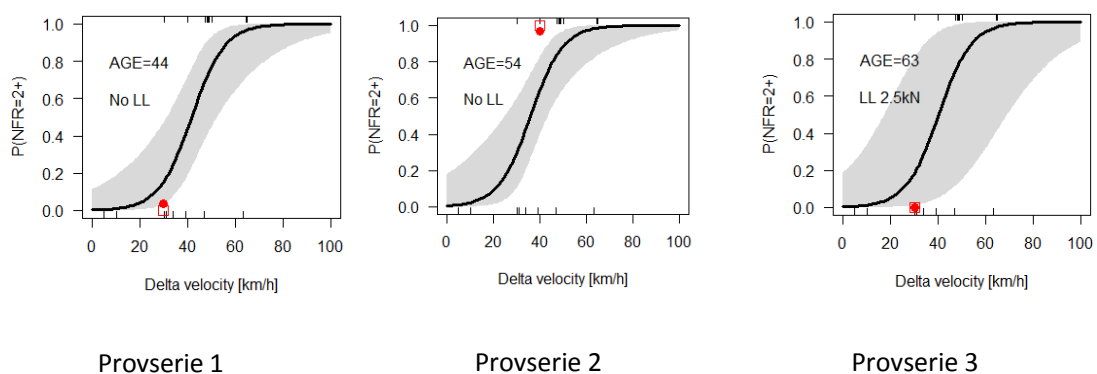
### 6.1 WP1 - Utveckling av ett kriterium för prediktering av bröstskador

Detaljerade modeller utvecklades av revbenen 1-12. Modellerna motsvarar revbenen hos en genomsnittlig man (Shi et al., 2014). Modellerna validerades genom simulering av böjproven i antero-posterior riktning enligt Figur 2. En komplett bröstorg utvecklades från de tolv revbensmodellerna, se Figur 6. Det kortikala benets tjocklek varierades längs med revbenet. Bröstkorgsmodellen integrerades i SAFER THUMS v9 modellen.



Figur 6. Projektets utvecklade bröstorg med tolv generiska revben

Utfallet för humanmodellens prediktering av risken för två eller fler revbensbrott för de tre slädtestserierna visas i Figur 7. Humanmodellen predikterade inte några frakturer för provserie 1 (Forman et al. 2002), där ej heller testobjekten fick frakturer. I provserie 2 (Shaw et al. 2009) predikterade humanmodellen en 100 %-ig risk för två eller fler frakturer, vilket var samstämmigt med att samtliga testobjekt erhöll flertal frakturer. Humanmodellen predikterade noll risk för två eller fler revbensfrakturer i provserie 3 (Crandall et al. 2011), där de två testobjekten ej erhöll revbensfrakturer.



Figur 7. Predikterad risk (svart kurva) och konfidensintervall (grå yta) för fraktur på minst två revben vid olika hastighetsändringar enligt humanmodellen och förekomsten av revbensfrakturer i referensproven (röda punkter).

Resultaten av simuleringarna av de 20 detaljerade rekonstruktionerna som har utförts i WP4 visar att för de fall där de åkande hade revbensfrakturer predikterades en hög sannolikhet för två eller fler frakturer (Tabell 1). I ett fall predikterades en hög risk för fraktur trots att den åkande inte hade någon fraktur.

Tabell 1. Predikterar risk för två eller fler frakturer för de 20 detaljerade rekonstruktionerna

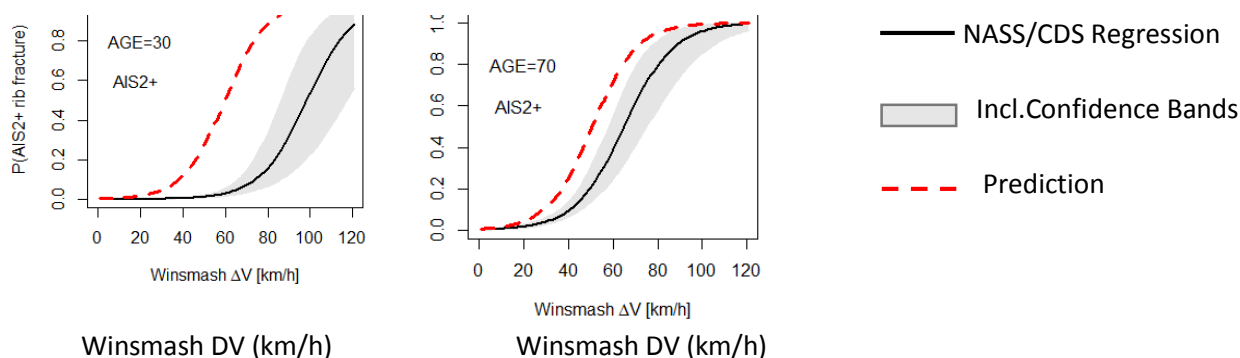
Nr	Ålder	Skada	AIS2+ Revbensfraktursrisk
1	67		0.1%
2	81	Bröstsfraktur 1 (AIS2)	0.2%
3	82		1.1%
4	44		98.4%
5	44	Lungskontusion(AIS3)	86.7%
6	67	Revbensfraktur höger sida 1-2 st (AIS2)	94.7%
7	62	Revbensfraktur vänster sida 1 (AIS1), Pneumothorax (AIS2)	76.0%
8	85	Revbensfrakturer höger sida 4 (AIS 3), Pneumothorax (AIS4)	97.0%
9	79		0.3%
10	42		21.7%
11	19	Mjältraktur (AIS3)	34.0%
12	42	Revbensfraktur 9 (AIS3), Bröstsfraktur 2 (AIS2)	92.8%
13	46		0.0%
14	52	Bröstkontusion (AIS1)	6.1%
15	39		5.2%
16	37		28.0%
17	38	Bröstsfraktur 1 (AIS2), Bröstkontusion (AIS1)	0.8%
18	34		0.1%
19	42		30.0%
20	22	Blödning i lunga	5.8%

För den transformerade (morphade) modellen minskade revbensfraktursrisken i ett fall (Tabell 2). För två av modellerna ökade revbensfraktursrisken och för övriga tre modeller var risken i stort sett oförändrad.

Tabell 2. Predikterad revbensfraktursrisk för original och morphad SAFER THUMS modell

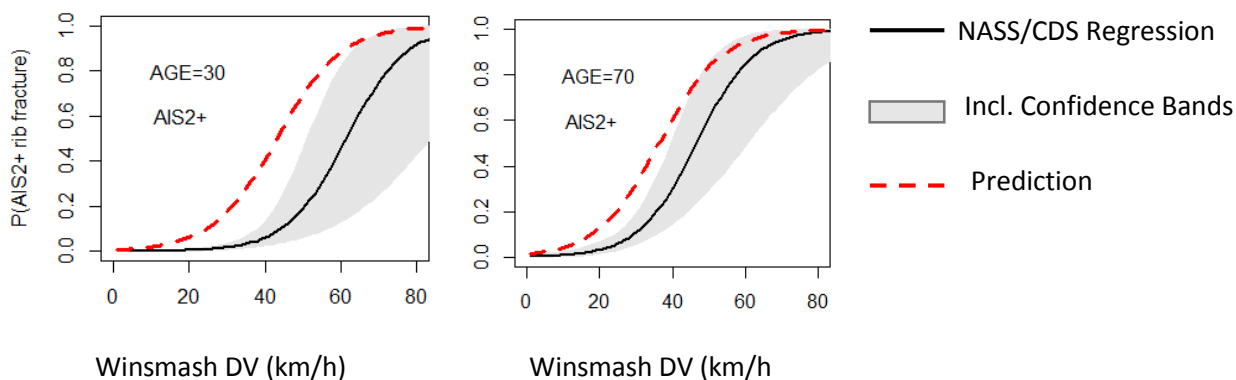
Nr	Längd (cm)	BMI	Original 2+ Revbensfraktursrisk	Morphad Human Modell 2+ Revbensfraktursrisk	Bröst skada
5	165	24	86.7%	66.6%	Lungskontusion (AIS 3)
8	153	26	97%	100.0%	Revbensfrakturer (AIS3), Pneumothorax (AIS 4)
9	186	26	0.3%	2.4%	-
16	163	24	39.3%	94.6%	-
17	170	31	0.8%	1.5%	Bröstsfraktur (AIS 2), Kontusion (AIS 1)
18	188	27	0.1%	30.0%	

För både de frontala och de laterala populationsbaserade simuleringarna predikterade human-modellen en högre risk för en 30- och 70-åring att få två eller fler revbensfrakturer jämfört med resultatet från NASS analysen (Figur 8 och 9). Speciellt för 30-åringen predikterades en högre risk. I den populationsbaserade studien predikterades för 30-åringen en 50 %-ig risk för två eller fler frakturer för delta V = 60 km/tim i frontala kollisioner, medan motsvarande delta V i NASS analysen var 100 km/tim. För en 70-åring predikterade modellen en 50 %-ig risk för två eller fler frakturer för delta V = 50 km/tim medan för NASS analysen var motsvarande delta V = 65km/tim.



Figur 8. AIS 2+ Revbensfrakturspredikteringar för frontalkollisionssimuleringar, Populationsbaserad rekonstruktionserie

I den populationsbaserade sidokollisionsstudien predikterade modellen en högre risk för två eller fler revbensfrakturer hos en 30-åring än vad NASS analysen gjorde (Figur 9). Risken 50 % uppnåddes för en 30-åring vid delta V = 40 km/tim, medan motsvarande gräns i NASS analysen var 60 km/tim. För en 70-åring predikterades en 50 %-ig risk vid delta V = 35 km/tim av modellen och vid delta V = 45 km/tim i NASS analysen.



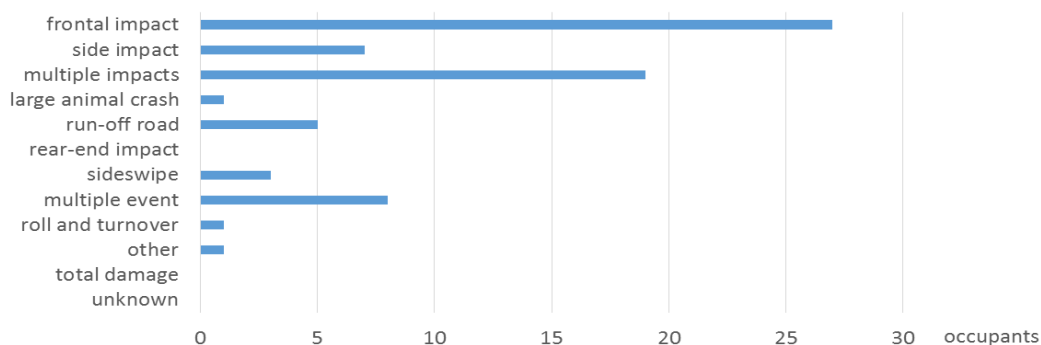
Figur 9. AIS 2+ Revbensfrakturspredikteringar för lateralkollisioner, Populationsbaserad rekonstruktionserie

## 6.2 WP 2– Skadekriterier för bröst- och ländrygg

### Skadeuppkomst och -mekanismer

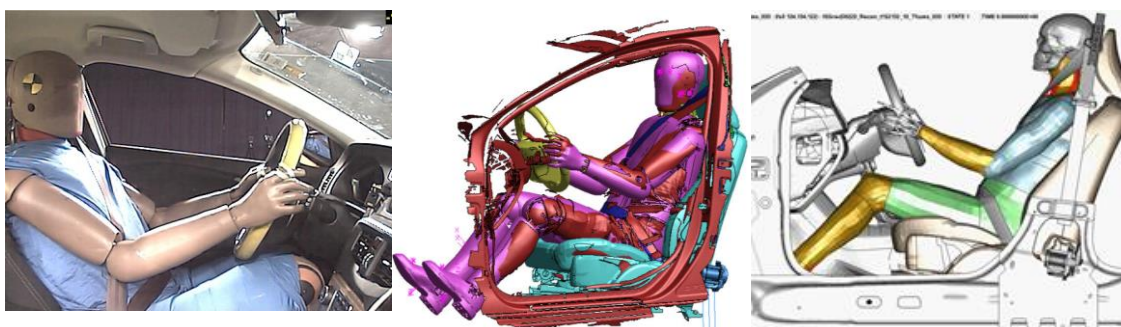
Ett flertal litteraturstudier och olycksanalyser har genomförts för att identifiera viktiga parametrar för utveckling av ett ländrygggradsskadekriterium (Engelbrektsson, 2017, Jakobsson et al. 2016). Fördelningar av till exempel skadetyper, skadelokalisation, situation för uppkomst och potentiell skademekanism har dokumenterats. Majoriteten av skadorna i bröst- och ländrygg vid bilolyckor är kompressionsskador. I studien på Volvobilar (Jakobsson et al., 2016) kategoriserades 51 % som kompressionsskador, följt av 24 % "anterior wedge fractures". (Engelbrektsson 2017), utförde en kombinerad CIREN och NASS data analys. I CIREN fanns det 898 personer, varav 198 med bröstskador, och i NASS fanns det 41 919 personer varav 816 med bröstskador. Tvärskottsfraktur var den vanligaste skadan, följt av kompressionsfrakturer. De flesta frakturerna fanns i ländryggen. Den mest frekventa delen för frakturuppkomst är övergången mellan länd- och bröstrygg.

I de 72 djupstudiefallen i studien med Volvobilar uppkom majoriteten av ryggskadorna vid frontalkollisioner, vilket sammanfaller med exponering av olyckor (Jakobsson et al., 2016), se Figur 10. Relativ olycksfördelning samt fördelning av total skadefördelning visar en kraftig överrepresentation av ryggskadorna vid komplexa skadehändelser, såsom multipla kollisioner och avkörningsolyckor.



Figur 10. Fördelning av de 72 djupstudiefallen med ryggsador per olyckstyp i Jakobsson et al. (2016)

Av de totalt 72 Volvofallen med bröst-ländryggsfrakturer hade endast 25% en skada av grad AIS2+ på kroppsdelarna bröst, buk och höft. Detta innebär att bröst-ländryggs-skadan var den enda allvarliga skadan i höft-bål-området i ¼ av fallen. Ett exempel på det är fall 4 bland de utvalda olyckorna för detaljerad rekonstruktion med humanmodell (Tabell 3). I det fallet erhöll en medelstor 44-årig man i en V40 kompressionskada i ländryggen vid en högvåldsfrontalkrock. Utöver kompressionsfraktur i L5 erhöll han skador i höger fotled och vänster fot. Denna olycka rekonstruerades även fysiskt i Volvos krocklab, se mer i kapitel 6.4 och Figur 18-19. Föraren i krockprovet representerades av en THOR krockdocka. Olyckan rekonstruerades även virtuellt, både med THOR och med de två generationerna av humanmodellen i projektet (Figur 11 a-c).

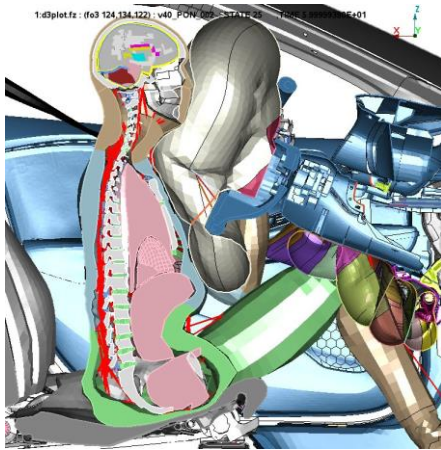


Figur 11a, THOR i krockprovet med Volvo V40CC

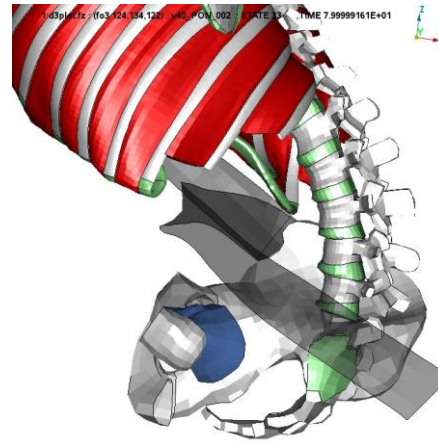
Figur 11b, Virtuellt och fysisk THOR, överlagrade

Figur 11c, Humanmodellen

I olyckan uppstod deformationer i sätets struktur på undersidan strax framför trolig höftposition. Detta bedömdes vara orsakad av interaktion med den åkande under krocken. Denna deformation återskapades i krockprovet och i de virtuella rekonstruktionerna, och det bekräftades att deformationerna av röret i stolens struktur sammanföll med maximala axiella krafter i ryggen. Detta gav en fördjupad förståelse av möjlig mekanism bakom kompressionsfrakturer i frontalkollisioner, en mekanism som bland annat diskuterades i Jakobsson et al. (2016). Jämfört med THOR ger analys av humanmodeller en mer detaljerad information om interaktion med skyddssystemet och lokala laster i skelettet. I THOR kan ryggkrafter mätas i en givare i ryggraden. I humanmodellen är det möjligt att studera varje koda för sig, och på så sätt möjliggöra förbättrad analys av skademekanismerna. Figur 11 a-b visar humanmodellen (version 9.0) under krockförloppet. Analysen av rekonstruktionen med version 8.0 bidrog till att ryggmodellen uppdaterades under projektet, dock återstår ytterligare förbättringspotential, speciellt med avseende på modellens förmåga att prediktera töjningar i kotkroppen. Detta kommer att behandlas i ett fortsättningsprojekt.



Figur 11a. Tvärsnitt av humanmodellen ( $t = 60$  ms)



Figur 11b. Detaljbild av ryggraden ( $t = 80$ ms)

### **Biomekanisk respons av ryggraden och utvärdering av humanmodell**

Utvärdering av biofideliteten av humanmodellen utfördes som ett examensarbete (Afwerki, 2016). Biofideliteten hos bröst- ländryggradsmodellen visade sig undermålig och ommodellering var nödvändig. Deformerbarheten hos diskarna var inte representerade, facettledkapselligamenten var olämpligt placerade och för korta, styvheten hos "ligament flavum" var för hög och avståndet mellan diskarna var för litet.

Ommodellering av humanmodellen var inte planerad att ingå i detta projekt. På grund av bristfällig biofidelitet hos ryggraden genomfördes ändå en uppdatering av bröst- ländryggraden hos humanmodellen. Östh (2017) modellerade om kotkropparna genom att göra geometrin mer biofidelisk och att byta ut den tidigare stela materialdefinitionen till en elastisk. Materialegenskaperna för ligamenten (Anterior Longitudinal Ligament (ALL), Posterior Longitudinal Ligament (PLL), Capsular Ligament (CL), Ligamentum Flavum (LF), Supraspinal Ligament (SSL), Interspinous Ligament (ISL), and Intertransverse Ligament (ITL)) modifierades också till mer biofideliska egenskaper. Dessutom adderades kraft och momentgivare längs ryggraden för att möjliggöra extrahering av krafter och moment för olika kotor i ryggraden.

Genom ett examensarbete med studenter från Strasbourg validerades ländryggsradsmodellen genom modellering av 18 publicerade belastningslastfall med ländryggs kotor av olika komplexitet. En preliminär utvärdering av ryggradsmodellens förmåga att prediktera frakturer utfördes. Arbetet visade på en potential hos modellen att prediktera kotfrakturer (Cornu and Hareng, 2018). Under projektets gång uppdaterades humanmodellen från version 8.0 till 9.0. Den uppdaterade ryggraden inkluderades i version 9.0 och möjliggjorde därvid att krafter och moment kunde extraheras.

### **Skadekriterieutveckling**

Vid projektets start fanns inga förslag på kriterier för frakturprediktering i bröst- och ländrygg applicerbara för humanmodeller. Med utgångspunkt från möjliga skador i bröst- och ländrygg identifierades trolig skademekanism, och idéer för hur detta skulle kunna mätas med krafter och moment i modellen sammanställdes, se Figur 12. Utöver de fem mer prioriterade skadorna (A-E) i Figur 12, listades även interna diskskador, interspongiös diskherniering, Chance fraktur, spinalutskottfraktur, facettledsdislokationer, ryggmärgsskador och skador på främre ligament, dock alla av lägre prioritet.



	Skador	Skademekanism	I modellen
A	Kompressionsskador (inkl burst)	Ren kompression	Axiell kraft (Fz) i kotkroppen
B	Anterior wedge kompressionsfraktur (inkl burst)	Kompression + flexion	Axiell kraft (Fz) och flexionsmoment (My)
C	Lateral wedge kompressionsfraktur (inkl burst)	Kompression + lateralflexion	Axiell kraft (Fz) och lateralflexionsmoment (Mx)
D	Kompressionsfraktur med rotationkomponent	Kompression+ rotation	Axiell kraft (Fz) och rotationsmoment (Mz)
E	Transversalutskotts-fraktur	kompression + lateral flexion	Tvårsnitt i transversalutskott, mäta kraft/moment (vilka och hur kombinera?) – kräver välmodellerad omgivning.

Figur 12. Skador, skademekanism och hur mäta i modellen, för de sex mest prioriterade skadorna

För skadorna på kotkroppen (A-D) identifierades funktioner som kombinationer av krafter och moment in kotkropparna, vilket motiverar ett sammanvägt kriterium i linje med Nij (ref). För detta krävs interceptvärden för respektive komponent. Data från litteraturen på toleransvärden för de olika lastkomponenterna sammanställdes, samt försök gjordes att få till statistiskt framtagna värden representativt för samtliga funna prov. Detta visade sig vara mycket svårt, bland annat på grund av stora variationer i provuppsättning och resultatredovisning från genomförda prov. En mer pragmatisk tillvägagångssätt tillämpades, varvid toleransnivåer valdes från några utvalda referenser, för Fx samt resultanten av Mx och My. Baserat på detta skapades ett första generations kriterium, relevant för flera av de identifierade skadorna på kotkropparna.

Kraft- och momentbaserat kriterium är inte det optimala för humanmodeller. Möjligheten att nyttja töjningsinformation och därmed kunna skapa lokala kriterier som är riktningso känsliga är mer optimalt. Dock kräver det både utveckling av modelluppbyggnad samt ytterligare analyser av biologiska prov. Inom projektet utfördes en hel del arbete med syfte mot ett sådant kriterium, dock gick det inte inom projektets ramar att komma fram till ett konkret förslag. För utvecklingen av ett töjningsbaserat kriterium, baserat på prediktering av töjning i kotorna, krävs en mer detaljerad modellering av kotkroppen, där det kortikala benets tjocklek och materialegenskaper modelleras mer i detalj. Dessutom måste omgivande strukturer som diskar och ligament, som påverkar töjningspredikteringarna i kotkroppen, också modelleras mer i detalj.

### **Parametriserad stolsmodellutveckling inklusive provning och simuleringsserie**

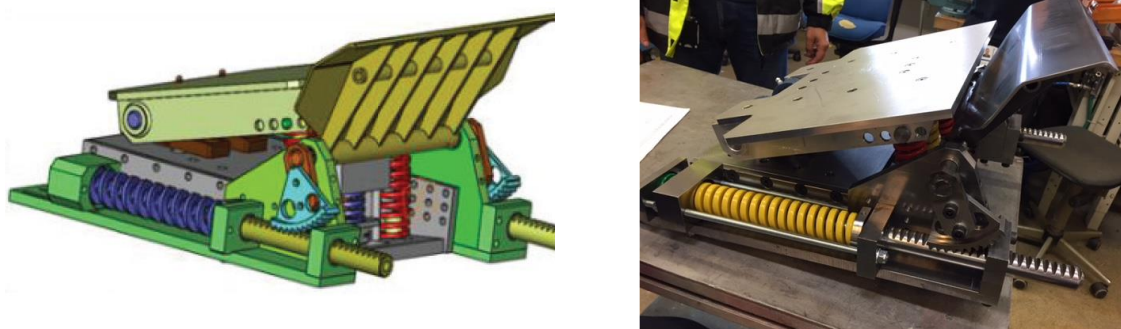
Provmetoden för utveckling av den generiska stolsmodellen baseras på en stel dockrumpa monterad på en hydraulkolv. Dockrumpan trycks horisontellt över stolsdynan, se Figur 13. Totalt provades åtta olika stolar: Ford Taurus, Volvo SPA, Ford Fiesta, Ford B-Max, Honda Civic, Ford Focus, Toyota Corolla och Saab 9-3. Stolarna provades i 0 och 15 graders vinkel, se Figur 13.



Figur 13. Kvasistatisk provmetod för stolar.  
Vänster: dockrumpa av aluminium utan orange bomullstyg. Mitten: provmetoden 0 grader.  
Höger: provmetoden 15 grader.

För stolarna monterade med 0 graders vinkel varierade den horisontella max-kraften för de olika stolarna mellan 2 och 7 kN. Högst maxkraft noterades för stolarna i Saab 9-3 och Ford Focus. Den vertikala max-kraften varierade mellan 4 och 8 kN. Högst maxkraft noterades för stolarna i Honda Civic och Volvo SPA. För stolarna monterade med 15 graders vinkel varierade den horisontella max-kraften mellan 5 och 15 kN. Högst max-kraft noterades för stolarna i Saab 9-3 och Ford Focus. Den vertikala kraften varierade mellan 4 och 15 kN. Högst maxkraft noterades för stolarna i Saab 9-3 och Ford Focus.

En generisk stol utvecklades baserat på resultaten från stolsprovningsen; en virtuell och en fysisk (Figur 14). Den generiska stolen är en vidareutveckling av en generisk stol publicerad av Uriot et al. (2015). I projektet var det endast planerat att skapa en virtuell generisk stolsmodell. Dock fanns det ett behov av en fysisk generisk stol för utvärdering av stolens egenskaper även i fysiska prov, varvid det beslutades att även bygga en fysisk version.



Figur 14. Generisk Parameteriserad Stol.

Stolens består av 2 delar för vilka styvheten kan varieras. En sittyta och ett underglidningsskydd (Figur 15).

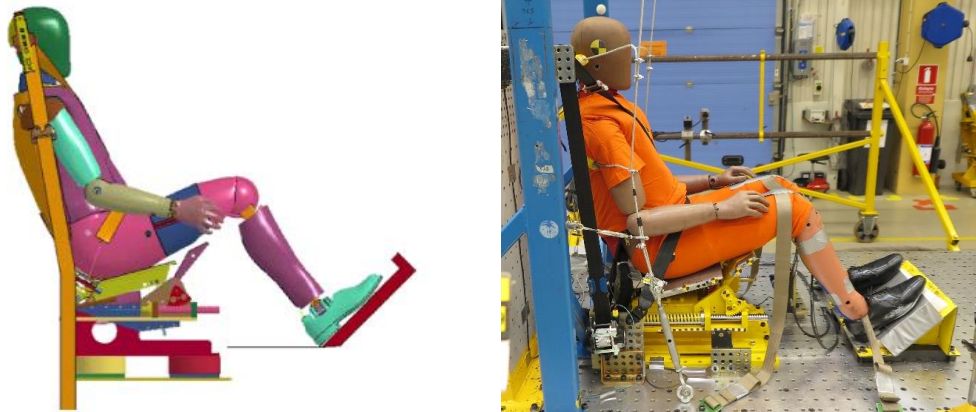


Fjädrar för Sittyta

Underglidningsskydd

Figur 15. Generisk stol med fjädrar som reglerar styvheten för sittytan och underglidningsskyddet

En parameterstudie genomfördes med syfte att utvärdera påverkan av olika stolars egenskaper för responsen hos den åkande. Fokus för denna parameterstudie var att utvärdera hur olika stolars styvhet påverkar kinematik och kraftflöde i ryggen för en åkande. Studien genomfördes både mekaniskt och med CAE med den generiska stolen (Figur 16). En THOR krockdocka positionerades på den generiska stolen och säkrades med ett "state-of-the-art" 3-pt bältesystem. Bältesystemet bestod av en rulle med försträckare, en omlänkare och en höftförsträckare. En stelbarriärspuls för kollisionshastigheten 50 km/tim användes. Egenskaperna för den generiska stolen varierades genom att variera styvheterna för sittyta och underglidningsskydd (Figur 15). De olika styvheterna som varierades var styv/styv (styv för sittyta och styv för underglidningsskydd), styv/mjuk och mjuk/mjuk (Volvo Spa).



Figur 16. Slädprovsuppställning

De preliminära resultaten visade att lägsta kompressionskraft ( $F_z$ ) och moment ( $M_y$ ) i ländryggraden uppkom för den generiska stolen med styv sitttyta och styvt underglidningsskydd medan högst kompressionskraft ( $F_z$ ) och moment ( $M_y$ ) uppkom för stolen med mjuk sitttyta och styvt underglidningsskydd. Detta är första steget mot en ökad förståelse för stolens påverkan på ryggraden. CAE-modellen av den generiska stolen kan användas tillsammans med humanmodellen för att utveckla ett kriterium för fraktur i ländryggen. Den generiska stolen kan också användas till att utveckla principer hur en stol skall vara konstruerad för att minimera risken för fraktur i ländryggen.

### 6.3 WP 3– Skadekriterier för huvudet

#### **Litteraturgenomgång**

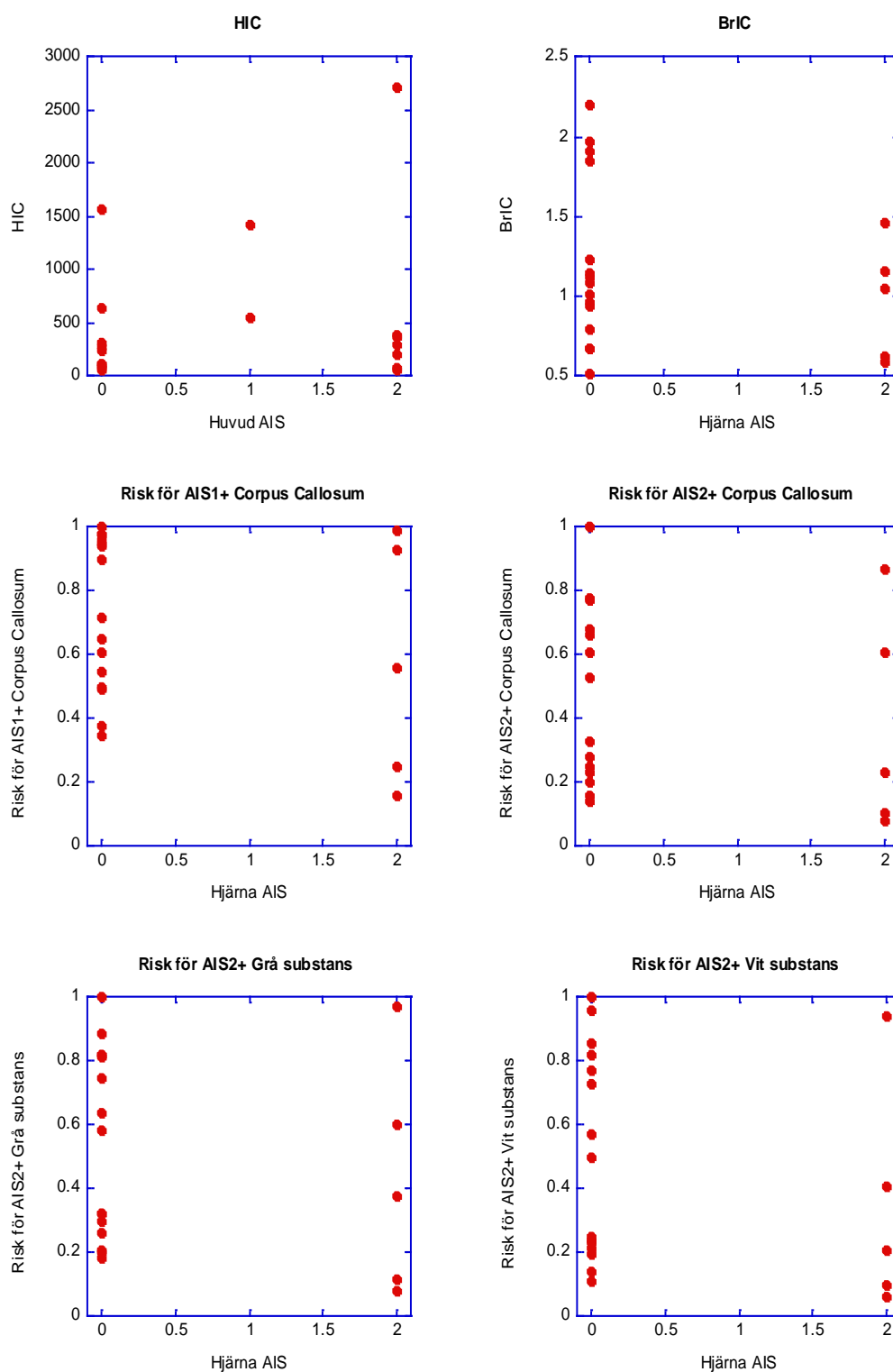
En litteraturgenomgång har genomförts, men ännu inte redovisats, eftersom intensiv forskning på området pågår som ännu inte publicerats; dessa delarbeten inväntas. Sammanställningen av de nya arbetena kommer att utföras i ett annat projekt.

#### **Analys av olycksdata för att bestämma forskningsprioriteringar**

En analys av amerikanska olycksdata (NASS; olyckor från 2001 - 2015) genomfördes i samarbete med kollegor vid JARI (Antona-Makoshi et al., 2018). Studien, som är unik i sitt slag, visade att forskning kring skador på huvudet (ansiktsskador exkluderat i analysen) bör prioritera områden som prevention av svåra hjärnskakningar, eftersom de drabbar 79 % av alla med huvudskada i de analyserade trafikolyckorna. Dessutom framkom att kvinnliga bilåkande är utsatta för en 1.5 ggr högre risk än män för denna typ av hjärnskakning (MAIS2+). Vidare framkom att åkande som var 65 år eller äldre löpte ca tio gånger högre risk för subduralblödning än de som var yngre än 65 år.

#### **Analys av data från olyckor**

Totalt ingick 20 rekonstruerade fall i analysen, varav 45 % hade huvudskada och 25 % hjärnskada. Alla skador var mindre allvarliga. Skadegraden var AIS1 eller AIS2. Analys av olycksdata visade att ingen av de utvärderade skadekriterierna predikterade utfallet på fältet (se Figur 17). Skadekriteriet *Head Injury Criterion* (HIC) hade en svag korrelation mellan AIS-grad för huvudet och predikterat HIC-värde (Figur 17, överst till vänster). Dock bör det påpekas att denna korrelation sannolikt är en funktion av två enskilda datapunkter. Dessa två individer var skadade (en AIS1 och en AIS2) och rekonstruktionerna predikterade mycket höga HIC värden. Vävnadstjningen i hjärnbalken (Corpus Callosum) hade en negativ korrelation mellan AIS-grad och predikterad risk (på AIS 1+ och AIS2+ nivå, mittenraden Figur 17) för skada. En av anledningarna till detta var att de predikterade tjningarna hade stor variation i fall där den åkande inte hade hjärnskador.



Figur 17. Predikerad risk (röda punkter) som funktion av utfall/skador i olyckorna.

### **Förslag på skall- och hjärnskadekriterium att användas med humanmodeller**

Detta delprojekt kan inte ge förslag på skall- och hjärnskadekriterium att användas med humanmodeller. En anledning är att antalet olyckor med hjärnskada var relativt litet (25 % av totalt 20 rekonstruerade olyckor). En annan och mer trolig anledning är att interaktionen mellan huvud

och luftkudde, eller objekt som huvudet träffade i olyckan, skiljer sig mellan rekonstruktionerna och olyckorna, varför den för huvudet predikterade kinematiken inte motsvarar den i olyckorna.

## 6.4 WP4 – Olycksrekonstruktioner

### *Fysiska rekonstruktioner*

Två fysiska rekonstruktioner har genomförts som del av projektet. Båda fallen ingår bland de "Detaljerade rekonstruktioner med humanmodell"; fall 4 och 5 i Tabell 3.

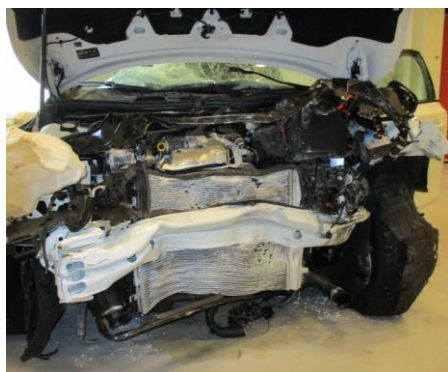
Fall 4 involverade en Volvo V40CC (årsmodell 2014) som kolliderade front-front (10 graders vinkel och 80 % överlapp) mot en Peugeot Bipper med högt våld, se Figur 18a. Vid krocken hade Volvon hastigheten 60 km/h och motparten 80 km/h. Den 44-åriga föraren i Volvon fick skador i ryggen, höger fotled och vänster fot. Olyckan kommer från Volvo Cars djupstudiedatabas och hade analyserat ingående av Volvos haverikommission med tillgång till detaljerad information om olyckan, bilen och föraren. Olycksplatsen hade undersökts på plats och intervjuer genomförts med räddningstjänst och andra på plats. Bilen hade tagits till Volvo Cars haverikommissions verkstad och analyserats i detalj. Föraren i olyckan bidrog både med tillstånd till fullständig personskadeinformation, samt att demonstrera sin troliga sittställning vid olyckan. Skadorna, inklusive radiologi analyserades av läkare i teamet. Kompressionsfrakturen på L5 visas i Figur 18b. Vid krockprovet representerades föraren av en THOR krockdocka. De är av liknande storlek. Krockkonfigurationen och hastigheter valdes baserat på analys av bilarnas deformationsmönster samt Volvobilens EDR data med information om accelerationer under krockförloppet. En jämförelse mellan utfallet för Volvobilen från olyckan och rekonstruktionen visas i Figur 19a-b. Det primära skälet att denna olycka valdes för fysisk rekonstruktion var fördjupad analys av ryggskaademekanismer. Denna analys beskrivs ytterligare under WP2.



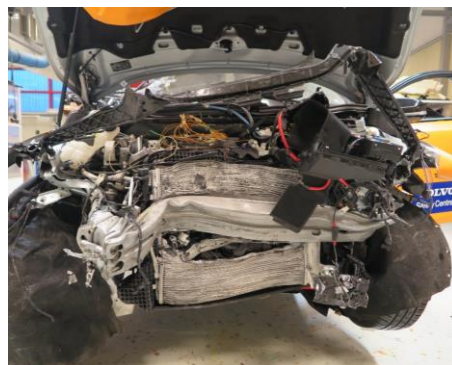
*Figur 18a, Foto på krockkonfiguration av olyckan med Volvo V40CC (Volvon till vänster)*



*Figur 18b, Förarens kompressionsfraktur på ländryggskota L5*



Figur 19a, Foto på bil i olyckan

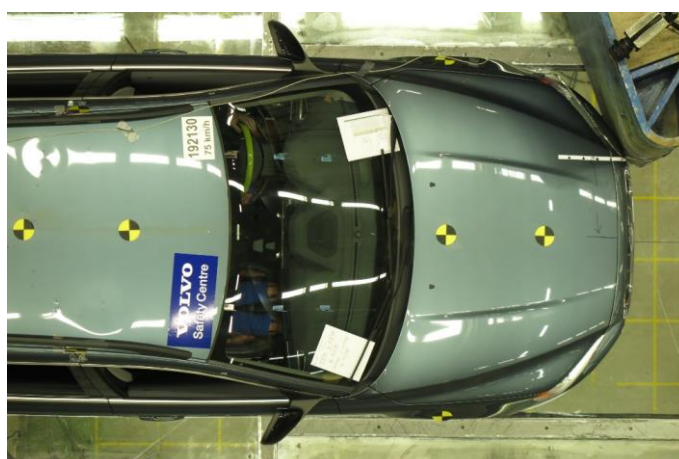


Figur 19b, Foto på bil från krockprovet

Den andra rekonstruktionen var en Volvo V70 (årsmodell 2011) som frontalkolliderade med en Scania lastbil. Föraren, en man på 44 år, erhöll en ansiktsfraktur, lungkontusion, frakturer på båda armarna och vänster lårben, samt ett öppet sår på höger smalben. Utöver föraren färdades tre barn i åldrarna 11-14 år i bilen. Barnen erhöll inga eller lindriga skador. Endast föraren ingår i denna studie (fall 5 i Tabell 3).

Även denna olycka kommer från Volvo Cars djupstudiedatabas och har analyserats ingående, inklusive dokumentation av olycksplats, intervjuer med berörda och detaljanalys av bilen. Skadorna, inklusive radiologi analyserades av läkare i teamet. Två krockprov genomfördes, en med en HIII krockdocka och en med THOR krockdocka på förarplats. Båda dockorna är något större än föraren, som var 165 cm lång och vägde 65 kg.

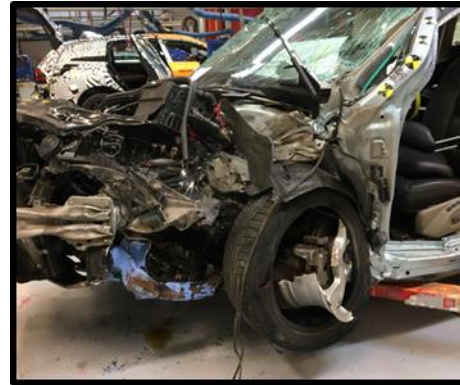
Olyckan valdes primärt på grund av osäkerhet i krockpulsen, då ingen information om detta fanns från olyckan. Genom att rekonstruera olyckan i krocklabbet kunde en detaljerad krockpuls uppmätas och användas vid rekonstruktionerna med humanmodellen. Helbilssimuleringar genomfördes före krockprovet för val av exakt krockkonfiguration. Tillgänglig information var foton på båda fordonen och beskrivning av troligt olycksförlopp. Som ersättning till lastbilsfronten användes en stel barriär. Vald konfiguration var 75 km/h med en vinkel på 20° mot barriären och 30% överlapp, se Figur 20. En jämförelse mellan utfallet för Volvobilen från olyckan och rekonstruktionen visas i Figur 21 a-b.



Figur 20 Foto på krockkonfiguration av olyckan med Volvo V70



Figur 21a, Foto på bil i olyckan. Taket har klippts bort av räddningstjänsten



Figur 21b, Foto på bil från krockprovet

### Detaljerade rekonstruktioner med humanmodell

Följande databaser söktes igenom för att identifiera fall som uppfyllde kriterierna för detaljerade rekonstruktioner: NASS/CDS data med krockpulsinformation från EDR och CIREN och Volvo Cars databaser, samt Folksamns databas. För få fall med samma fordon medförde att en meningsfull rekonstruktionsstudie med detaljerade rekonstruktioner av fall från NASS databasen inte skulle kunna utföras. Projektet valde därför att avstå från att inkludera data från NASS till förmån för de detaljerade rekonstruktionerna med fall från Volvo Cars databas, för där fanns tillgång till validerade interiörmodeller i CAE.

Totalt ingick c:a 30 Volvofall i analysen, och från dessa genomfördes 23 rekonstruktioner med humanmodeller. I varje rekonstruktion användes en FE-interiörmodell för det specifika fordon som var inblandad i kollisionen. Krockpulsen som användes var från det specifika fordonet.

Under rekonstruktionsarbetets gång exkluderades tre fall p.g.a. osäkerheter i fallbeskrivningen eller krockpulserna. De resterande 20 fallen i 16 olika bilar utgjorde underlag för arbetet med kriterieutvärdering i WP1-3. De 20 olycksfallen summeras i Tabell 3. Följande fall är i samma bil: 2 och 3, 8 och 9, 16 och 17, samt 18 och 19. Notera att fallnummer 7, 20 och 21 saknas i tabellen, de är exempel på fall som har exkluderats, eftersom de inte uppfyllde kvalitetskraven.

Tabell 3, Översikt över fall med åkande i Volvobilar för detaljerade rekonstruktioner med humanmodell. MAIS är maximala skadenivå (AIS) på kroppsdelen, eller för hela kroppen i kolumnen med "total".

Fall nr	Plats i bil	Krock -typ	Riktning	Kön	Alder (år)	Längd (cm)	Vikt (kg)	MAIS total	MAIS per kroppsdelen								
									huvud	hjärna	bröst	rygg	nacke	övre extr	nedre extr	Mage	Höft
1	förare	front	12	M	67	178	79	2	0	0	0	2	0	1	1	0	0
2	förare	front	11	M	81	okänd	84	2	0	0	2	0	0	0	0	1	0
3	pass fram	front	11	K	82	okänd	70	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
4	förare	front	12	M	44	180	80	3	0	0	0	3	0	1	2	0	0
5	förare	front	11	M	44	165	65	3	2	0	3	0	0	2	3	0	0
6	förare	front	12	M	67	okänd	okänd	2	1	0	2	0	0	2	0	0	0
8	pass fram	front	11	K	62	okänd	okänd	2	1	0	2	0	0	2	0	0	0
9	bak vänster	front	11	K	85	153	61	4	0	0	4	2	0	2	1	2	2
10	förare	front	12	M	79	186	91	2	2	2	0	0	0	1	1	0	0
11	förare	front	11	M	42	okänd	okänd	2	2	0	0	0	0	2	1	0	0
12	förare	sida	10	M	19	okänd	okänd	3	2	2	3	3	0	0	1	0	2
13	förare	front	11	M	42	170	80	3	0	0	3	0	0	2	2	0	0
14	förare	mult	12	M	46	okänd	okänd	2	0	0	0	2	0	0	0	0	0
15	förare	front	11	K	52	168	67	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0
16	förare	front	11	M	39	182	70	2	2	2	0	0	1	1	1	0	0
17	pass fram	front	11	K	37	163	63	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0
18	förare	mult	11	K	38	170	90	2	1	1	2	0	1	0	1	1	0
19	pass fram	mult	11	M	34	188	94	2	0	0	1	2	0	0	0	1	0
22	förare	front	12	M	42	okänd	okänd	2	0	0	1	0	0	2	2	0	0
23	förare	front	12	M	22	okänd	okänd	3	0	0	3	0	1	1	1	0	0

Tabell 3 visar att majoriteten är frontalkollisioner av olika variationer, ett fall är en sidokollision och tre är "multipla". De multipla fallen inkluderar för samtliga tre (fall 18 och 19 är samma bil) en

frontalkollision efterföljt av en avåkning. För de multipla fallen har frontalkollisionen rekonstruerats, dock kan inte uteslutas att avkörningen också kan ha bidragit till skadeuppkomsten. För de 20 personerna fanns komplett information om vikt och längd i elva fall. Av dessa har sex (fallen 5, 9, 10, 17, 18 och 19) bedömts avvika så mycket från storleken på originalmodellen (177 cm, 78 kg) att transformerade (morphade) modeller (baserat på individens ålder, längd och BMI) använts som komplement. Tabell 3 visar total skadenivå för individen (MAIS total), samt maximal skadenivå per kroppsdel (MAIS kroppsdel). För kriterieutvecklingen hade det varit önskvärt med en större andel individer med skador på de kroppsdelar som speciellt studeras. Detta gäller särskilt för huvudskadorna, vilket försvårar användandet av dessa fall inom WP3.

Tabell 4 visar en sammanställning av de rekonstruktioner som har genomförts, dvs. vilka humanmodeller som använts för respektive fall. Samtliga fall har rekonstruerats med originalmodellen av version 9.0, motsvarande en medelstor man. 16 fall har även rekonstruerats med den tidigare versionen 8.0. De sex individerna som har skalats om och även rekonstruerats med den versionen framgår av tabellen.



Tabell 4, Översikt över rekonstruktioner utförda på de 20 Volvo-fallen som används i skadekriterieutvärderingen. Versionsnummer refererar till version på humanmodellen.

Fall nr	Plats i bil	Krocktyp	DeltaV resultatant (km/h)	Version 8	Version 9	Skalad modell	Kommentar
1	förare	front	49	ja	ja		
2	förare	front	53	ja	ja		
3	pass fram	front	53	ja	ja		
4	förare	front	58	ja	ja		
5	förare	front	53	ja	ja	ja	
6	förare	front	77	ja	ja		
8	pass fram	front	83	ja	ja		ej för WP2 (stol)
9	bak vänster	front	42	ja	ja	ja	
10	förare	front	64	ja	ja	ja	
11	förare	front	64	ja	ja		
12	förare	sida	75	ja	ja		ej för WP3 (IC)
13	förare	front	70	ja	ja		
14	förare	multipl	34	ja	ja		
15	förare	front	54	ja	ja		
16	förare	front	64	ja	ja		
17	pass fram	front	64	ja	ja	ja	ej för WP3 (laptop)
18	förare	multipl	39		ja	ja	
19	pass fram	multipl	39		ja	ja	
22	förare	front	65		ja		
23	förare	front	90		ja		

## 7 Spridning och publicering

### 7.1 Kunskaps- och resultatspridning

Hur har/planeras projektresultatet att användas och spridas?	Markera med X	Kommentar
Öka kunskapen inom området	X	Resultat från projektet har publicerats i ett flertal vetenskapliga publikationer (se publikationslista i kap 7.2)
Föras vidare till andra avancerade tekniska utvecklingsprojekt	X	Projektresultaten nyttjas i forskning och utvecklingsprojekt inom industrin, samt forskningsprojekt inom akademien.
Föras vidare till produktutvecklingsprojekt	X	Humanmodellen med den uppdaterade ryggraden och förädlade bröstkorgen används tillsammans med de nyutvecklade kriterierna i utvecklingsprojekt hos de industriella parterna.
Introduceras på marknaden	X	Projektresultaten (verktyg och metoder) är viktiga möjliggörare för utveckling av skyddssystem i framtida bilar.
Användas i utredningar/regelverk/tillståndsärenden/ politiska beslut	X	Projektets publikationer och interna analyser med modellen och kriterierna används som påverkan och upplysning i olika sammanhang för utveckling av globala standarder och regelverk.

Projektet ingår i ett större kluster av forskningsprojekt inom SAFER med fokus att utveckla virtuella humanmodeller för att möta dagens och framtidens behov av detaljerade och skadepredikerande människolika verktyg för skyddssystemutveckling. Detta kluster samverkar med internationella forskare. Projektet har verkat i detta sammanhang och därmed både gynnats av och bidragit till de gemensamma kunskaps- och resultatspridningsplattformar som tydligt satt svensk forskning inom detta område på en hög internationell nivå.

### 7.2 Publikationer

Detta projekt har hittills resulterat i fem examensarbetsrapporter med totalt sju studenter på tre universitet, åtta "peer-reviewed" artiklar (varav fem i pågående granskningsprocess (reviewprocess)), samt ytterligare ett konferensbidrag och några publikationer under arbete:

#### **Examensarbeten**

Afwerki, H., (2016). **Biofidelity evaluation of thoracolumbar spine model in THUMS**, Master Thesis, Chalmers University of Technology

Pärus, R., (2017). **Rib fractures and their correlation with solid organ injuries**, Master Thesis, Umeå University

Engelbrektsson, A., (2017). **Circumstances leading to thoracic and lumbar spine fractures in motor vehicle crashes**, Master Thesis, Umeå University

Cornu, N., Hareng, N., (2018). **Localized lumbar spine fracture prediction for automotive crash simulation**, Master Thesis, Strasbourg University

Storm, S., Lundin, L. (2018). **Detailed FE rib modelling for fracture Prediction**, Master Thesis, Chalmers University of Technology

#### **Peer-review publikationer**

Jakobsson, L., Björklund, M., Westerlund, M. (2016). **Thoracolumbar spine injuries in car crashes**, IRCOBI

- Antona-Makoshi, J., Mikami, K., Lindquist, M., Davidsson, J., Schick, S. (2018). **Accident analysis to support the development of strategies for the prevention of brain injuries in car crashes**, AAP 2018
- Piqueres, A., Iraeus, J., Lorente, A., López-Valdés, F., Juste-Lorente, O., Maza-Frechín, M., Pipkorn, B. (2018). **Kinematic assessment of subject personification of human body models (THUMS)**, IRCOBI
- Iraeus, J., Pipkorn, B. (2019a). **Multi-scale validation of rib strain in human body models**, Submitted to IRCOBI
- Iraeus, J., Brodin, K., Pipkorn B, (2019b). **Generic finite element models of human ribs, developed and validated for stiffness and strain prediction – To be used in rib fracture evaluation for the human population in vehicle crash**, Submitted to Journal of Mechanical Behavior of Biomedical Materials
- Iraeus, J. Storm, S., Lundin, L, Agnew, A. Kemper, A., Pipkorn, B. (2019c). **Detailed subject specific rib modelling for fracture prediction**, submitted to AAAM
- Pipkorn, B., Iraeus, J., Bunketorp, O., Björklund, M., Jakobsson, L. (2019a). **Multi-scale validation of a rib fracture prediction method for human body models**, Submitted to IRCOBI
- Pipkorn, B., Iraeus, J., Bunketorp, O., Lindqvist, M., Puthan, P. (2019b). **Injuries to car occupants – NASS study to enable priorities for development of injury prediction capabilities of human body models**, Submitted to AAP

### ***Konferenspresentationer***

- Iraeus, J., Davidsson, J., Brodin, K. (2017). **Recent HBM activities at Chalmers University**, Presentation at Conference: Human Body Modelling in Automotive Safety, VDI Conference, Berlin

## **8 Slutsatser och fortsatt forskning**

Resultaten från detta projekt gör det möjligt att vidareutveckla och utvärdera skyddssystem för framtida fordon. Ett validerat bröstskadekriterium har framtagits och en första generation av ett ryggfrakturkriterium har föreslagits för SAFER THUMS humanmodell. Under projektet har en förbättrad förståelse av hur huvudskador skall predikteras uppnåtts. Dessutom har ny kunskap framtagits avseende modellutveckling av berörda kroppsdelar, och en bas för vidare olycksanalys och rekonstruktioner har skapats.

Specifikt har en probabilistisk metod för prediktering av uppkomst av fraktur på två eller fler revben validerats och visats användbar. Metoden är unik i sin förmåga att prediktera skaderisk, oberoende av belastningsriktning, vilket är av stor vikt vid utveckling av integrerade säkerhetssystem, där kollisionsriktningen kan påverkas av de aktiva säkerhetssystemen. Mer forskning krävs dock för att utveckla matematiska materialmodeller för kortikalt och trabekulärt ben och modeller av enskilda revben för att metoden skall kunna förutsäga var på revbenet en fraktur uppstår. Metoden har baserats på ett litet antal individer i ett smalt åldersspann och ett fåtal prov på kortikalt ben. Mer forskning krävs på materialdata för kortikalt ben, för olika åldrar och kön och för olika tøjningshastigheter för att kunna förbättra dessa predikteringar.

Den probabilistiska metoden för prediktering av risken för revbensfraktur inkluderar inte prediktering av bröstbensfraktur. Bröstbensfrakturer förekommer ganska ofta i trafikolyckor, och noterades i flera av de fall som rekonstruerades. Fortsatt forskning bör inkludera bröstbenet i predikteringsmetoden.

Projektet har utarbetat ett förslag på skadekriterium för ländryggsfraktur, baserat på krafter och moment. Idag saknas bra skadeprediktering för ryggraden för samtliga verktyg (krockdockor och humanmodeller), vilket gör detta projektresultat extra värdefullt, även om det i dagsläget inte är fullkomligt. Betydelsen av detta ökar med tendensen att möjliggöra mer bakåtlutade sittställningar i bilar. Projektet har identifierat ett behov av att förfinas/vidareutveckla modelleringen av ryggraden. För att utveckla ett ländkotfrakturskriterium, som är baserat på en fysikalisk parameter i ryggkotan, t.ex. töjning, krävs dock mer kunskap och provning. Detta kommer att adresseras i ett fortsättningsprojekt, vars syfte är att möjliggöra detaljerade predikteringar av risken för kotfrakturer i ländryggraden.

För prediktering av huvudskador krävs mer forskning om skademekanismer, främst gällande skalning av djurdata, modellering av huvudet/hjärnan och för att få en ökad förståelse för hur olika typer av hjärnskador uppstår. Ett annat eftersatt forskningsområde är validering av redan utvecklade modeller med hjälp av rekonstruktioner av data från olycksdatabaser. Flerparten av de skadekriterier och riskfunktioner som används tillsammans med hjärnmodeller/humanmodeller är utvecklade med data från rekonstruktioner av skador som uppkommit i samband med idrottstävlingar; dessa skador är på en låg nivå (AIS1) och är inte representativa för svårare skador i trafikolyckor.

Förutom kunskapsbyggande avseende skadeprediktering för humanmodellen, har projektet även gett erfarenhet av olycksrekonstruktioner. Betydelsen av den åkandes storlek och sittställning vid olyckan bör dock studeras vidare. Dessa och annan svåråtgångad data från olyckor kräver vidare studier och metodutveckling, vilket behövs eftersom korrekta olycksrekonstruktioner utgör facit för modellutveckling och validering.

## 9 Deltagande parter och kontaktpersoner

Autoliv:	Bengt Pipkorn Leila Jaber
VCC:	Lotta Jakobsson Magnus Björklund
Umeå:	Mats Lindqvist
Chalmers:	Johan Davidsson Johan Iraeus (Post Doc)
Sahlgrenska	Olle Bunketorp





## 10 Referenser

Referenser utöver de som finns listade i kapitel 7.2

- Ball, S.T., Vaccaro, A.R., Albert, T.J., Cotler, J.M., (2000). **Injuries of the thoracolumbar spine associated with restraint use in head-on motor vehicle accidents.** *Journal of Spinal Disorders & Techniques* 13 (4), 297-304.
- Brumbelow, M.L., Farmer, C.M., (2013). **Real-world injury patterns associated with hybrid iii sternal deflections in frontal crash tests.** *Traffic Inj Prev* 14 (8), 807-815.
- Brumbelow, M.L., Zuby, D.S., (2009). **Impact and injury patterns in frontal crashes of vehicles with good ratings for frontal crash protection.** In: Proceedings of the The 21st International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, Stuttgart, Germany.
- Carroll, J., Adolph, T., Chauvel, C., Labrousse, M., Trosseille, X., Pastor, C., Eggers, A., Smith, S., Hynd, D., (2010). **Overview of serious thorax injuries in european frontal car crash accidents and implications for crash test dummy development.** In: Proceedings of the 2010 IRCOBI Conference Proceedings.
- Crandall, J., Kent, R., Patrie, J., Fertile, J., Martin, P., (2000). **Rib fracture patterns and radiologic detection—a restraint-based comparison.** In: Proceedings of the The 44th annual AAAM Scientific Conference, Chicago, Illinois, USA, pp. 235.
- Cuerden, R., Cookson, R., Massie, P., Edwards, M., (2007). **A review of the European 40% offset frontal impact test configuration.** In: Proceedings of the Proceedings of the 20th international technical conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), 18-21 June, 2007, Lyon, France.
- Duma, S.M., Kemper, A.R., Mcneely, D.M., Brolinson, P.G., Matsuoka, F., (2005). **Biomechanical response of the lumbar spine in dynamic compression.** *Biomedical sciences instrumentation* 42, 476-481.
- Forman, J.L., Kent, R.W., Mroz, K., Pipkorn, B., Bostrom, O., Segui-Gomez, M., (2012). **Predicting rib fracture risk with whole-body finite element models: Development and preliminary evaluation of a probabilistic analytical framework.** In: Proceedings of the 56th annual AAAM Scientific Conference, Seattle, Washington, pp. 109.
- Huelke, D.F., Mackay, G.M., Morris, A., (1995). **Vertebral column injuries and lap-shoulder belts.** *Journal of Trauma and Acute Care Surgery* 38 (4), 547-556.
- Iraeus, J. and Lindquist, M. (2016) **Development and validation of a generic finite element vehicle buck model for the analysis of driver rib fractures in real life nearside oblique frontal crashes.** *Accident Analysis & Prevention*, 2016. 95, Part A: p. 42-56
- Jakobson, L., Bergman, T., Johansson, L., (2006). **Identifying thoracic and lumbar spinal injuries in car accidents.** In: Proceedings of the Proceedings of the International Research Council on the Biomechanics of Injury conference.
- Jakobsson, L., Axelson, A., Björklund, M., Nilsson, P., Victor, T., (2015). **Run off road safety.** In: Proceedings of the The 24th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, Gothenburg, Sweden.
- Kent, R., Patrie, J., Benson, N., (2003). **The hybrid III dummy as a discriminator of injurious and non-injurious restraint loading.** In: Proceedings of the 47th annual AAAM Scientific Conference, pp. 51.

- Kindig, M.W. (2009). **Tolerance to failure and geometric influences on the stiffness of human ribs under anterior-posterior loading**, in *School of Engineering and Applied Science*. 2009, University of Virginia.
- Pintar, F.A., Yoganandan, N., Maiman, D.J., Scarboro, M., Rudd, R.W., (2012). **Thoracolumbar spine fractures in frontal impact crashes**. In: Proceedings of the Annals of Advances in Automotive Medicine/Annual Scientific Conference, pp. 277.
- Richards, D., Carhart, M., Raasch, C., Pierce, J., Steffey, D., Ostarello, A., (2006). **Incidence of thoracic and lumbar spine injuries for restrained occupants in frontal collisions**. In: Proceedings of the Annual proceedings/Association for the Advancement of Automotive Medicine, pp. 125.
- Shaw, C.G., Lessley, D., et al. (2007). **Quasi-static and dynamic thoracic loading tests: cadaveric torsos**. Proceedings of Proceedings of the International Research Council on the Biomechanics of Injury conference,
- Shi, X., Cao, L., et al. (2014). **A statistical human rib cage geometry model accounting for variations by age, sex, stature and body mass index**. *Journal of Biomechanics*, 2014. 47(10): p. 2277-2285
- Shimamura, M., Ohhashi, H., Yamazaki, M., (2003). **The effects of occupant age on patterns of rib fractures to belt-restrained drivers and front passengers in frontal crashes in japan**. *Stapp car crash journal* 47, 349.
- Trosseille, X., Baudrit, P., Lepout, T., and Vallancien, G. (2008). **Rib cage strain pattern as a function of chest loading configuration**. *Stapp Car Crash Journal*, 2008. 52: p. 205-231
- Uriot, J., Potier, P., Baudrit, P., Trosseille, X., Petit, P., Richard, O., Compigne, S., Masuda, M., Dourad, R., (2015). **Reference PMHS sled tests to assess submarining**. *Stapp car crash journal* 59, pp 203-233
- Wang, M.C., Pintar, F., Yoganandan, N., Maiman, D.J., (2009). **The continued burden of spine fractures after motor vehicle crashes**: Clinical article. *Journal of Neurosurgery: Spine* 10 (2), 86-92.
- Welsh, R., Morris, A., Hassan, A., Charlton, J., (2006). **Crash characteristics and injury outcomes for older passenger car occupants**. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour* 9 (5), 322-334.
- Yoganandan, N., Arun, M.W., Stemper, B.D., Pintar, F.A., Maiman, D.J., (2013). **Biomechanics of human thoracolumbar spinal column trauma from vertical impact loading**. *Annals of advances in automotive medicine* 57, 155.