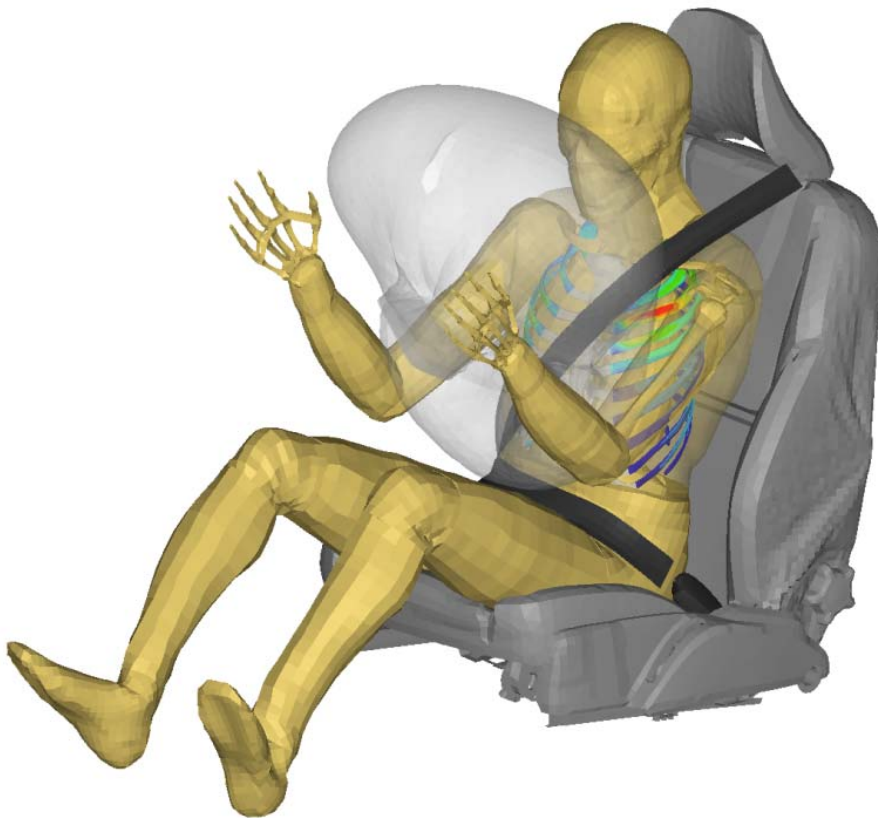




FORDONSSTRATEGISK  
FORSKNING OCH INNOVATION

# Förbättrad skadeprediktering med humanmodeller, steg 2



Projekt inom Fordon och trafiksäkerhet

Författare: Karin Brolin, Manuel Mendoza-Vazquez, Johan Davidsson, Lotta Jakobsson,  
Bengt Pipkorn, Krystoffer Mroz

Datum: 2015-03-05

## Innehåll

<b>1. Sammanfattning</b> .....	<b>3</b>
<b>2. Bakgrund</b> .....	<b>4</b>
<b>3. Syfte</b> .....	<b>5</b>
<b>4. Genomförande</b> .....	<b>6</b>
<b>5. Resultat</b> .....	<b>6</b>
5.1 Identifiering av skadekriterier (arbetspaket 1) .....	6
5.2 Skaderisikkurvor för THUMS (arbetspaket 2, 3).....	7
5.3 Fältdata (arbetspaket 4) .....	9
5.4 Jämförelse av THUMS skaderisker med verklig data (arbetspaket 6).....	10
5.5 Rekonstruktioner av enskilda olyckor med THUMS (arbetspaket 5, 7, 8) .....	12
5.6 Bidrag till FFI-mål .....	13
<b>6. Spridning och publicering</b> .....	<b>14</b>
6.1 Kunskaps- och resultatspridning .....	14
6.2 Publikationer .....	14
<b>7. Slutsatser och fortsatt forskning</b> .....	<b>15</b>
<b>8. Deltagande parter och kontaktpersoner</b> .....	<b>15</b>
<b>9. Referenser</b> .....	<b>16</b>

### Kort om FFI

FFI är ett samarbete mellan staten och fordonsindustrin om att gemensamt finansiera forsknings-, innovations- och utvecklingsaktiviteter med fokus på områdena Klimat & Miljö samt Säkerhet. Satsningen innebär verksamhet för ca 1 miljard kr per år varav de offentliga medlen utgör hälften.

För närvarande finns fem delprogram Energi & miljö, Fordons- och trafiksäkerhet, Fordonsutveckling, Hållbar produktionsteknik och Transporteffektivitet. Läs mer på [www.vinnova.se/ffi](http://www.vinnova.se/ffi)

## 1. Sammanfattning

Thoraxskador är en av de främsta orsakerna till dödsfall och allvarliga skador i bilolyckor. Därför behövs förbättrade skyddssystem för åkande, vilka hittills har utvecklats med krockdockor (virtuella eller fysiska). Virtuella krockdockor kan endast användas i specifika krockscenarier medan virtuella modeller som representerar människan, vanligen kallade humanmodeller, har potentialen att simulera alla krockar som förekommer i verkliga situationer, inklusive krockar med en kombination av olika belastningar, t.ex. sneda och överlappande krockar. På väg mot nollvisionsmålet finns det ett ökat behov av människoliknande verktyg som är känsliga för belastningar i alla riktningar och som kan användas i dessa komplexa krockkonfigurationer, samt för att finjustera system som lindrar krockvåldet och skyddar de åkande. Det saknas dock väldefinierade och accepterade kriterier och tröskelvärden för att prediktera bröstkorgsskador med humanmodeller. Detta projekt fokuserade på skadekriterier för bröstkorgen för humanmodellen *Total Human Model for Safety (THUMS)* i frontalkrockar.

Först användes THUMS för att utvärdera skadekriterier på övergripande, struktur och vävnadsnivån och för att ta fram riskkurvor för AIS2+ thoraxskador. Riskkurvorna genererades baserad på data från kadaverprov med sex olika belastningsfall. När kvaliteten på riskkurvorna och hur väl de representerade data från kadaverprov hade utvärderats, visade det sig att kriterierna ”skjuvspänning” i två revben och ”DcTHOR” var mest lovande. Sedan användes THUMS för att simulera ett representativt statistiskt urval av verkliga frontalkrockar och riskkurvor för fem olika skadekriterier jämfördes med en riskkurva framtagen baserad på det verkliga utfallet. Jämförelsen visade att THUMS med de framtagna riskkurvorna konsekvent överskattade skaderiskerna. Som ett komplement till den statistiska utvärderingen användes THUMS för enskilda olycksrekonstruktioner av fem verkliga frontalkrockar, vilket illustrerade att skadekriterier på vävnadsnivån har stor potential som riktningsoberoende kriterier men för att matcha fältdata krävs stor detaljrikedom i modellen och de är beroende av materialegenskaper och kvaliteten på elementnätet.

Detta projekt har utvärderat skadekriterier för en humanmodell och utvecklat riskkurvor för AIS2+ thoraxskador. Det har förbättrat kunskaperna om skadekriterier för humanmodeller genom aktiva diskussioner och samarbete mellan parterna från industrin och akademien inom SAFER Vehicle and Traffic Safety Center at Chalmers samt genom flera vetenskapliga publikationer och presentationer. Projektet har resulterat i en doktorsavhandling.

## 2. Bakgrund

Bröstkorgsskador är en av de främsta orsakerna till dödsfall och allvarliga skador vid bilolyckor. Nuvarande krockdockor har begränsad känslighet för avancerade skyddssystem för de åkandes bröstorg (thorax) (Forman 2005, Kent 2003). Därför finns det ett starkt behov av ett mer avancerat verktyg för att utveckla och utvärdera framtida skyddssystem för åkande i syfte att minska risken för thoraxskador. Nya fordonsmodeller är främst utvecklade i en virtuell miljö. Ändringar i designen måste göras i ett tidigt skede. För att i ett tidigt skede i utvecklingen bedöma hur säker fordonsdesignen och dess skyddssystem för åkande är, är det viktigt att ha tillgång till virtuella verktyg som kan prediktera skaderisken för de åkande i krocksimuleringar. De virtuella krockdockorna är begränsade till ett fåtal specifika krockscenarion, som exempelvis frontalkrock, och kan inte prediktera hur de åkande kommer att påverkas i komplexare krockscenarion. Virtuella humanmodeller har potentialen att prediktera kinematik och skadebild i dessa komplexa scenarion. Därför förväntas humanmodeller spela en viktig roll i framtida projekt om fordon och säkerhetssystem. För att vara konkurrenskraftiga behöver den svenska fordonsindustrin därför ha tillgång till humanmodeller som kan prediktera skadebild i komplexa belastningsfall.

Moderna numeriska humanmodellerna finns nu tillgängliga för universitet och näringsliv. Dessa passar bra för parameterstudier och är som sådana lämpliga för virtuell testning och för att bedöma säkerhetspotentialen för framtidens fordon. För närvarande utvecklas familjer av humanmodeller; Toyota tillhandahåller olika storlekar av *Total Human Model for Safety* (THUMS, Toyota 2008) och så småningom kommer *Global Human Model Consortium* att tillhandahålla modeller i fler storlekar än genomsnittsmannen. Humanmodeller erbjuder möjligheten att förstå skademekanismer på en detaljerad nivå och att fastställa skadekriterier. Dessa kriterier kan användas för att ta fram utvärderingsmetoder för nya skyddssystem för åkande. Det saknas dock väldefinierade och accepterade kriterier för att prediktera thoraxskador med humanmodeller, vilket gör att de är svåra att använda dem i fordonsutveckling.

För krockdockor är de mest använda skadekriterierna vid frontalkrockar maximal bröstkompression ("Cmax") som är definierat som förhållandet mellan bröstorgens deflektion och bröstorgens initiala djup (Kroell et al., 1974), och det viskösa kriteriet ("VCmax") som definieras som den maximala produkten av bröstkompressionen och derivatan av deflektionen med avseende på tiden (Lau och Viano, 1986). Nyligen föreslog Song (2011) det kombinerade deflektionskriteriet ("DC") som tar hänsyn till bröstbenskompressionen och skillnaden i deflektion mellan bröstorgens vänstra och högra sida. På grund av begränsningar i krockdockornas utrustning kan dessa kriterier inte effektivt differentiera mellan moderna skyddssystem för åkande (Petitjean et al., 2002) och med humanmodeller finns det en möjlighet att använda mer förfinade kriterier.

I THUMS är kriteriet för benbrott plastisk töjning i revbenens kortikala ben. Alla finita element där töjningen uppnår ett fördefinierat värde tas bort och bidrar inte till bröstorgans styvhet i resten av simuleringen. Song et al (2011) föreslog användning av plastisk töjning utan elementeliminering för att bedöma antalet revbensfrakturer. En probabilistisk metod för att prediktera risken för revbensfrakturer, kallad "fatal strain", utvecklades av Forman et al (2012) som jämförde den största töjningen för varje revben med en fördelning av brotttöjningar som erhållits från dragtester. Det är tveksamt om töjning är ett lämpligt skadekriterium för de humanmodeller som finns idag, eftersom elementstorleken i modellerna kan vara för stor för att adekvat simulera töjningsfördelningen. Därför finns det ett behov av att utforska nya thoraxskadekriterier på övergripande, struktur och materialnivå samt att utveckla motsvarande riskfunktioner för THUMS i krocksimuleringar.

I tidigare projekt (SAFER-finansierat projekt B7: *Improved injury prediction using HBM* och EU FP7-projektet *Thorax*) initierade partnerna i detta projekt forskning om bröstorgans respons och skadekriterier för humanmodeller. En grundlig validering av THUMS thorax-modell utfördes av Pipkorn et al (2011). THUMS har en bröstkorgsrespons som är känsligt för avancerade skyddssystem för åkande såsom bältesförsträckare, belastningsbegränsare och krockkuddar (Mendoza-Vazquez 2012). Skadekriterier på övergripande nivå föreslogs baserat på forskning som utförts med olika humanmodeller och simuleringar utfördes i syfte att föreslå förbättringar till krockdockan THOR-NT (Brolin 2012). Därför användes THUMS versionerna 1.4 och 3 i den här studien och bröstorgans elementnät och materialegenskaperna förbättrades och validerades av Chalmers och Autoliv.

### 3. Syfte

Syftet med detta projekt var att föreslå och utvärdera AIS2+ skadekriterier och riskkurvor för bröstkorgen för en av de främsta humanmodellerna, *Total Human Model for Safety* (THUMS). Fokus var på 50:e-percentils-mannen och ålder togs i beaktande vid framtagningen av riskkurvorna. Detta gjordes genom att: identifiera skadekriterier med litteraturstudier (arbetspaket 1), ta fram skaderiskkurvor för THUMS genom att rekonstruera tester med kadaverprov (arbetspaket 2), bedöma kvaliteten på riskkurvorna med statistiska metoder och robusthetssimuleringar (arbetspaket 3), sammanställa fältdata (arbetspaket 4) för att utvärdera hur väl THUMS med de föreslagna skadekriterierna i simuleringar överensstämde med fältdata för enskilda (arbetspaket 5) och representativa (arbetspaket 6) frontalkrockar, samt bedöma modellens användbarhet jämfört med HIII (arbetspaket 7) och i interna projekt på Autoliv och VCC (uppgift 8). Projektet har försett Sveriges bilindustri med kunskap om skadeprediktering med humanmodeller i krocksimuleringar och förbättrat verktygen som i dag används för att utvärdera skyddssystem för åkande.

## 4. Genomförande

Projektet genomfördes genom ett intensivt samarbete mellan partnerna Autoliv Research AB (Autoliv), Chalmers tekniska högskola (Chalmers), Volvo AB (Volvo), och Volvo Personvagnar (VCC) från 1 april, 2013 till 31 december, 2014. Det har omfattat numeriska simuleringar med humanmodeller och analyser av olycksdata från fältet. Projektet hade en aktiv kärngrupp bestående av 7 seniora forskare från partnerna samt en doktorand från Chalmers.

Doktoranden Manuel Mendoza-Vazquez planerade simuleringsaktiviteter, valde med stöd från de industriella partnerna ut de thoraxskadekriterier som utvärderades, simulerade kadaverprov för att skapa riskkurvor, samt utvärderade dessa genom att simulera representativa frontalkollisioner jämfört med fältdata. Volvo tillhandahöll datorresurserna för alla simuleringar utförda av Chalmers. VCC tillhandahöll fältdata och bidrog med analys och planering till utvärderingen av skaderisk. Autoliv bidrog med THUMS-förbättringar och numeriska simuleringar av specifika olycksfall. Många arbetsmöten har hållits med deltagare från alla partners för att analysera, diskutera och dra lärdomar från de numeriska olycksrekonstruktionerna.

Samarbete med internationella partners var en viktig del av detta projekt. Manuel Mendoza-Vazquez besökte University of Virginia, USA, sent under våren 2013 för att studera det experimentella upplägget för de kadaverprov som användes för att skapa riskkurvor med THUMS. Japan Automotive Research Institute (JARI) var med som en aktiv samtalspartner under analysen av fältdata och erbjöd en FE-modell av en liten personbil som eventuellt kunde användas med urval av olycksdata från NASS. När projektet fattade beslutet att fortsätta med data från VCC på volvobilar skickades den NASS-data som hade sammanställts till JARI för framtida samarbete kring thoraxskadekriterier och framtagning av riskkurvor för FE-humanmodeller.

## 5. Resultat

Under projektets gång avlade Manuel Mendoza-Vazquez sin doktorexamen vid Chalmers tekniska högskola (Mendoza-Vazquez 2014) och projektet bidrog till 6 publikationer. Projektresultaten presenteras i detta kapitel med referenser till arbetspaketet som definierades i ansökan tillsammans med en kort beskrivning av metodiken. För en fullständig beskrivning av metoder och resultat refereras till doktorsavhandlingen (Mendoza-Vazquez 2014).

### 5.1 Identifiering av skadekriterier (arbetspaket 1)

En litteraturstudie genomfördes för att identifiera skadekriterier som kan prediktera thorax AIS2+ skador med en humanmodell. Kriterier valdes ut baserat på om det var

möjligt att mäta med THUMS, om det fanns en föreslagen koppling till en skademekanism, och att det inte var avhängigt ett visst skyddssystem. 24 skadekriteriekandidater identifierades varav följande valdes ut för simulering i efterföljande arbetspaket:

**Kriterier på övergripande nivå** var "Cmax" (Kroell et al. 1974), "VCmax" (Lau and Viano 1986), bröstkorgsdeflektionen "Dmax" (Kleinberger et al. 1989), "DC" (Song et al. 2011), kombinerade deflektion av ett flertal punkter på bröstkorgen som ursprungligen togs fram för THOR "DcTHOR" (Davidsson et al. 2014), och den "totala interna energin" för det kortikala benet i alla revben.

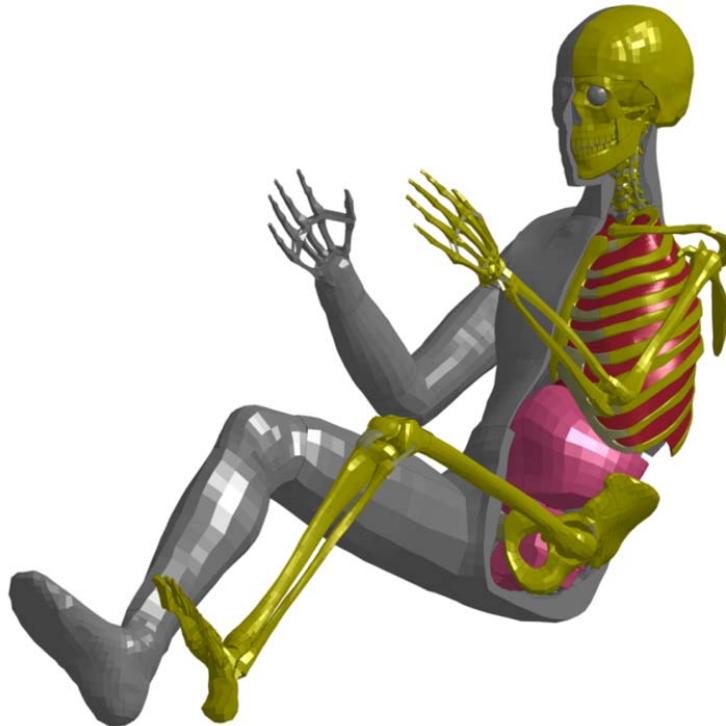
**Kriterier på strukturnivå** var "revbenens deflektion från ändpunkt till ändpunkt", "förändring i revbenens krökning", och den "interna energin" för det kortikala benet i varje revben.

**Kriterier på materialnivå** för revbenets kortikala ben var "huvudtöjning", "huvudspänning", "plastisk töjning", "skjuvspänning" och "von Mises-spänning".

## 5.2 Skaderiskkurvor för THUMS (arbetspaket 2, 3)

Den humanmodell som använts i denna studie var en modifierad THUMS v3 (Mendoza-Vazquez et al. 2013, figur 1). Revbenets trabekulära ben modellerades med hexaeder-element och det kortikala benet med skalelement (elasticitetsmodul 13 GPa, sträckgräns 93,5 MPa). De pre- och postprocessorer som användes var LS-PREPOST (v2.4, LSTC, Livermore, CA, USA) och Primer (v10.0, Oasys Ltd., UK). Finitelementlösaren var LS-DYNA (version 971 R4.2.1, LSTC, Livermore, CA, USA). Data analyserades med kod i MATLAB (R2007b, The Math Works Inc., Natick, MA, USA) som utvecklats internt.

Totalt reproducerades 23 kadaverprover (medellängd på 1,77 m, medelvikt på 70,2 kg och en medelålder på 61 år vid dödsfallet) med den modifierade THUMS modellen. Skaderiskkurvorna konstruerades med parametrisk analys av överlevnadsdata (*Survival analysis*), där ett kadaver ansågs vara skadat om antalet brutna revben (NFR) var två eller fler. Simuleringsresultaten matchades med respektive kadaverprov. För skadekriterier på övergripande nivå användes det maximala värdet. För kriterier på struktur- och materialnivå användes det maximala värdet i revbenet med det näst högsta värdet. I analysen av överlevnadsdata ansågs alla skadevällande prov vara vänster-censurerad och alla icke-skadevällande prov höger-censurerad. Figur 2 visar fem av de framtagna riskkurvorna. För urvalet användes Akaike Information Criterion (AIC) som gav ett värde för den relativa kvaliteten och hur väl kurvan passade datamängden (tabell 1). Skaderiskkurvorna med det lägsta AIC-värdet togs fram med kriterierna "DcTHOR" och "skjuvspänning" när de justerats för ålder.

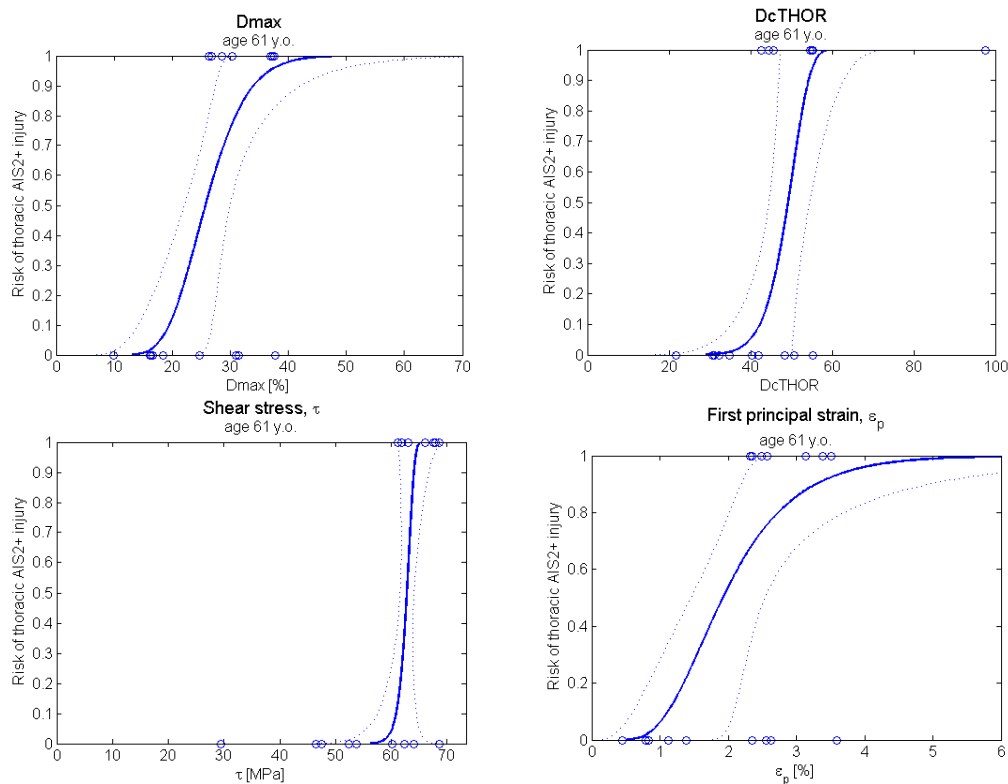


Figur 1: Huden på den modifierade THUMS (Mendoza-Vazquez et al. 2013) är borttagen för att visa bröstkorgen och de inre mjukvävnaderna.

Tabell 1. Värderna för Akaike information criterion (AIC) och de valda fördelningarna för överlevnadsanalys, med och utan åldersjustering.

Nivå	Skadekriterium	Utan åldersjustering		Med åldersjustering	
		Fördelning	AIC	Fördelning	AIC
Övergripande	Cmax [%]	Log-logistic	26.9	Log-logistic	28.8
	VCmax [m/s]	Log-logistic	31.9	Log-logistic	33.8
	Dmax [%]	Log-logistic	25.1	Log-normal	26.4
	DC	Log-normal	23.3	Log-normal	23.8
	DcTHOR	Log-logistic	19.0	Weibull	16.3
	TIE [mJ]	Log-logistic	26.4	Log-logistic	28.1
Struktur	E2E [%]	Log-logistic	32.8	Log-logistic	34.7
	IE [mJ]	Log-logistic	23.6	Log-normal	24.1
	Vinkelförändring [%]	Weibull	25.9	Weibull	27.4
Material	Max huvudtöjning [%]	Log-logistic	26.5	Log-logistic	28.4
	Plastisk töjning [%]	Weibull	22.7	Log-normal	24.1
	Max huvudspänning [MPa]	Log-logistic	24.1	Log-normal	25.2
	Skjuvspänning [MPa]	Log-normal	20.0	Weibull	15.6
	von Mises-spänning [MPa]	Log-logistic	24.7	Log-normal	26.0





Figur 2: AIS2+ skaderisckurvor för THUMS från övre vänstra hörnet till nedre högra hörnet: ”Dmax”, ”DcTHOR”, ”skjuvspänning”, och ”huvudtöjning”.

### 5.3 Fältdata (arbetspaket 4)

Datasökningar utfördes för att identifiera relevant fältdata. Inklusionskriterier diskuterades och fastställdes, med fokus på olyckor med Volvo-bilar eller 4:e generationens Ford Taurus eftersom det fanns tillgängliga interiör FE-modeller av dessa biltyper. Databaserna som studerades var CIREN, NASS, INTACT, GIDAS, STRADA, samt de som tillhandahölls av Folksam och VCC. Databaserna från CIREN, INTACT, GIDAS, STRADA och Folksam hade inte ett tillräckligt antal bilolyckor med de relevanta bilmodellerna och åkandeskadorna. Försök att kombinera två eller flera av databaserna gjordes, men klassningssystemen för olyckor och skador som används i de olika databaserna tillät inte en sådan sammanslagning. NASS-databasen innehåller ett begränsat antal olycksfall för varje fordonstillverkare, modell och olyckskonfiguration. Dessa fall skalas sedan för att få en databas som är representativ för de olyckor som inträffar i USA, varför antalet olyckor med Taurus som identifierades i NASS-databasen var begränsat. Därför utgjorde Volvo Cars *Traffic Statistical Accident Database* (VCTAD) underlag för fältdata genom hela projektet. Databasen innehåller data för volvobilar i Sverige vars reparationskostnader på grund av bilolyckan överstiger en specifik nivå. Personskador är kodade enligt AIS. Den huvudsakliga måttenheten för krockvåldet som används vid frontalkrockar är *Equivalent Barrier Speed* (EBS) som

beräknas med hjälp av en matris över energiabsorption och den kvarvarande deformationen av den aktuella bilens frontstruktur. För ett begränsat antal fall i databasen finns ytterligare information tillgänglig, såsom exempelvis acceleration som en funktion av tid från *Digital Accident Research Recorder* (DARR).

För att jämföra skaderisckurvorna framtagna för THUMS (avsnitt 5.2) med verklig skaderisk (avsnitt 5.4) valdes en delmängd av fältdatan ut med följande inkluderingskriterier:

- bältade förare med känd personskadebild,
- involverade i en frontalkrock 2002-2012,
- bilmodell från 1999-2012,
- med en krockriktning riktad klockan 11 - 13, och
- ett horisontalt överlapp på 2/3, centralt överlapp på 1/3 eller fullständigt överlapp.

Tretton av de totalt 1007 förarna ådrog sig en thorax AIS2+ skada. Parametrisk överlevnadsanalys utfördes på delmängden med mjukvaran R [21] för att ta fram skaderisckurvorna för thorax AIS2+ skadorna för fältdata, med EBS som oberoende variabel och ålder som en kovariat. Weibull-fördelning med åldersjustering passade datan bäst och resulterade i riskkurvan för AIS2+ thoraxskador i figur 3. Metod och resultat beskrivs närmare i Mendoza-Vazquez et al. 2014.

Fem fall valdes ut från VCTAD för olycksrekonstruktion med THUMS (avsnitt 5.5). Fallen valdes ut baserat på andra kriterier än delmängden för statistisk analys:

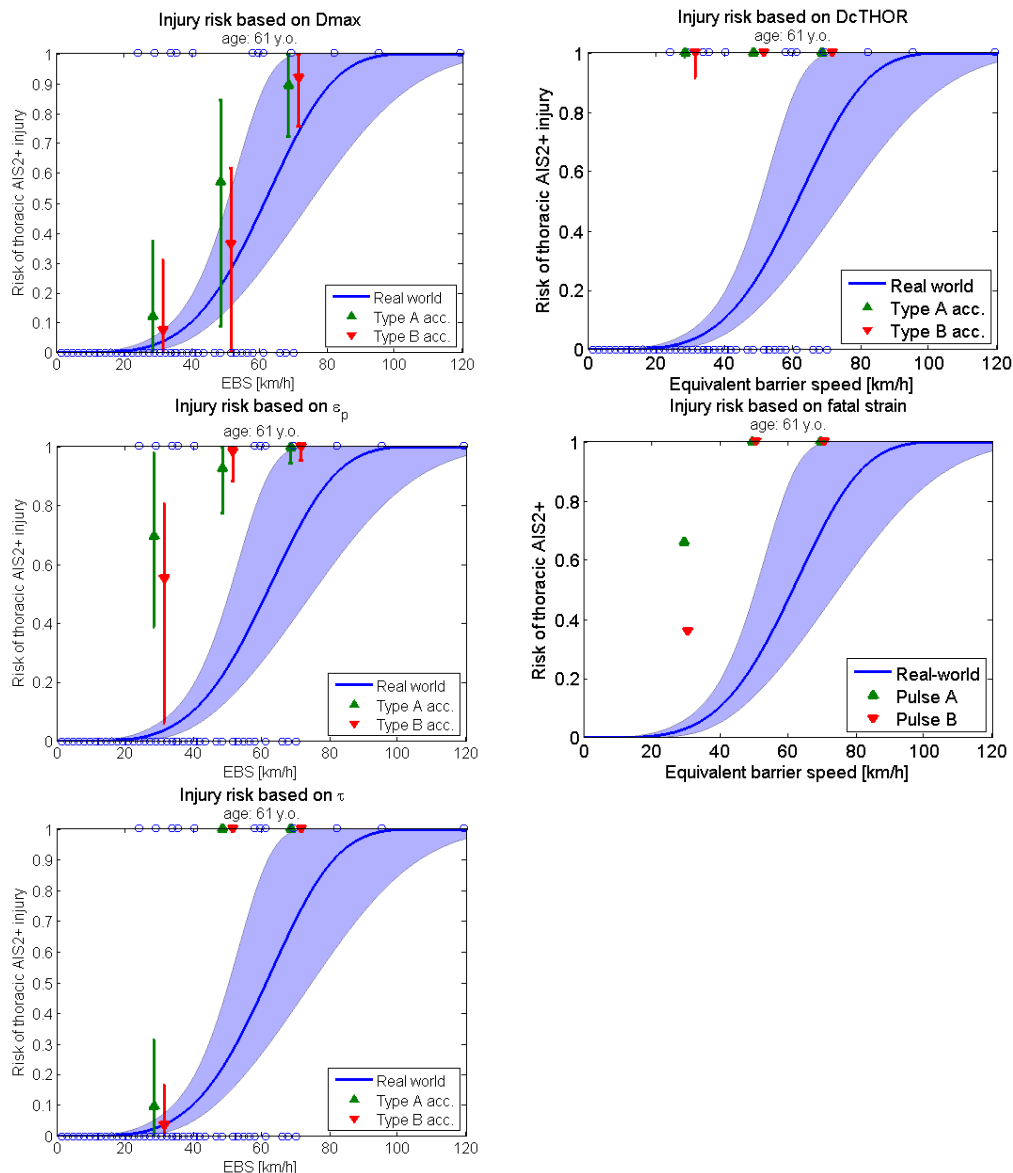
- frontalkrockar utan begränsningar på vinkel eller överlapp,
- tillgänglig DARR-data,
- begränsad inträngning i kupén,
- detaljerad beskrivning av olyckan,
- detaljerade personskadeuppgifter, och
- fordonsmodeller där en validerad interiör CAE-modell var tillgänglig för rekonstruktionen.

Alla fallen gällde föraren; fyra av dem i nyare Volvo-modeller från 2008-2009 och en i en äldre Volvo V70 från 1997. Endast en förare (det äldre fordonet från 1997) erhöll skador på thorax med frakturer på revbenen och bröstbenet.

#### **5.4 Jämförelse av THUMS skaderisker med verklig data (arbetspaket 6)**

THUMS placerades i fordonets förarsäte (validering beskrivs kortfattat i avsnitt 5.5 och ingående i Mendoza-Vazquez 2014, bilaga A). Metod och resultat beskrivs närmare i Mendoza-Vazquez et al. 2014. I korthet läggs två olika accelerationspulser på modellen av fordonskupén för var och en av de tre valda EBS-värdena; 30, 50 och 70 km/h. Risken som predikterades med den modifierade THUMS och motsvarande åldersjusterade riskkurvor överskattade skaderisken jämfört med fältdata (figur 3). Det skadekriterium som låg närmast fältdata-riskerna var "Dmax", där konfidensintervallen överlappade för alla testade EBS och accelerationspulser. Kriterierna "skjuvspänning", "huvudtöjning",

och ”fatal strain” predikterade större risk snabbare än ”Dmax”; spännings- och tøjningsbaserade kriterier predikterade mer än 90% risk för en EBS på endast 50 km/h. ”DcTHOR”-kriteriet predikterade över 95% risk redan vid EBS på 30 km/h. Dessa resultat indikerar att det finns många utmaningar när skadekriterier framtagna med data från kadaverprov jämförs med fältdata och ytterligare arbete behövs för att undersöka hur skadekriterier för humanmodeller bäst kan tas fram för att prediktera verkliga risker.

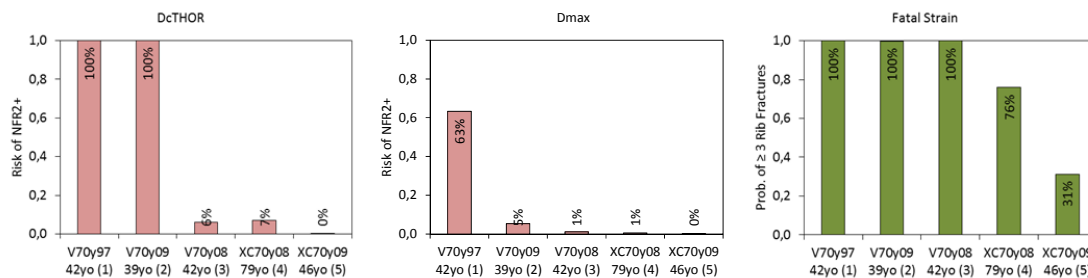


Figur 3: Skaderisker predikterade med ”Dmax”, ”DcTHOR”, ”huvudtøjning” ( $\epsilon_p$ ), ”fatal strain”, och ”skjvningsspänning” ( $\tau$ ), (från övre vänstra hörnet till nedre högra hörnet) i THUMS-simuleringar med tre EBS och två accelerationspulser (röda och gröna trianglar) jämfört med skaderiskkurvan baserade på fältdata som åldersjusterades för 61 år (blå korridor).

### 5.5 Rekonstruktioner av enskilda olyckor med THUMS (arbetspaket 5, 7, 8)

De fem enskilda fall som valdes ut för rekonstruktion (avsnitt 5.3) simulerades med THUMS i förarpositionen. Modellerna för fordonskupéerna validerades med data från en fysisk rekonstruktion av en frontalkrock mellan det äldre fordonet och ett av de nyare fordonen, utförd av VCC 2010 med HIII 50:e-percentil-krockdockor. Denna rekonstruktion simulerades med en virtuell HIII 50:e-percentil-krockdocka och där resultaterande kinematik och accelerationer jämfördes med motsvarande experimentella data. Detta beskrivs mer ingående i Mendoza-Vazquez 2014, bilaga A.

Krockpulsen för varje rekonstruktionsfall togs från fälldata (DARR), förutom för de två fallen som var fysiskt rekonstruerade i ett krocktest. I dessa två fall användes krockpulserna från krocktestet. Thoraxskadekriterierna som valdes ut för utvärdering var "DcTHOR" och "Dmax" för två eller fler revbensfrakturer (NFR2+) och "fatal strain" för tre eller fler revbensfrakturer (NFR3+). Resultaten från dessa initiala simuleringar visar att inget av kriterierna konsekvent reflekterade skadebilden för alla olyckor, figur 4. "DcTHOR" och "fatal strain" kriterierna predikterade utfallet för det äldre fordonet, medan "Dmax" gav en lägre risk. För de nyare fordonen överskattades skaderisken, främst med kriteriet "fatal strain". Den lokala töjningsfördelningen i revbenen överensstämde inte helt med frakturmönstret hos den skadade föraren, vilket påverkade skadepredikteringen med "fatal strain" mer än "DcTHOR" och "Dmax".



Figur 4: Skaderisker predikterade med "DcTHOR", "Dmax" och "fatal strain" med THUMS i rekonstruktionssimuleringar av fem fall: (1) Volvo V70 årsmodell 1997, 42-årig förare med frakturer på revben och bröstben, (2) Volvo V70 årsmodell 2009, 39-årig förare utan bröstskador, (3) Volvo V70 årsmodell 2008, 42-årig förare utan bröstskador, (4) Volvo XC70 årsmodell 2008, 79-årig förare utan bröstskador, och (5) Volvo XC70 årsmodell 2009, 46-årig förare utan bröstskador.

Dessa initiala olycksrekonstruktioner med THUMS illustrerar att skadekriterier på vävnadsnivå har stor potential att ge modellspecifika kriterier som fungerar i alla belastningsriktningar, men de kräver en modell med stor detaljrikedom och är beroende av materialegenskaper och kvaliteten på elementnätet för att matcha fälldata. Ytterligare steg, inklusive fler fall och modifierade uppsättningar av de initiala fallen, behövs för att verkligen utvärdera varje kriteriums robusthet och välja ut kriterier för industriell implementering. I den aktuella studien gjordes inga modifieringar i modelluppställningen (sittställning, hur bältet var placerat, o.s.v.). Pågående aktiviteter inkluderar ytterligare rekonstruktioner, speciellt för att mer exakt rekonstruera frakturmönstren för den skadade föraren.



FORDONSTRATEGISK  
FORSKNING OCH INNOVATION

Förutom framsteg inom prediktering av bröstskador bidrog denna del av projektet till det viktiga delmålet att utvärdera modellen och kriterierna i en tillämpning i industriell miljö. Under projektets gång identifierades, diskuterades och modifierades många problem i strävan mot förenkling och acceptans av modellen, inberäknat kriterier som passar industrins processer.

När rekonstruktionerna med HIII 50:e-percentil jämförs med THUMS för de två fall där simuleringar genomfördes med båda modellerna, var det tydligt att THUMS gav mycket mer information och detaljer. Denna information och de ytterligare detaljerna är viktiga komponenter för att analysera komplicerade krocksituationer, såsom sneda frontalkrockar. Det är av yttersta vikt för bilindustrins utveckling av skyddssystem för åkande likväl som aktiva säkerhetssystem. Därför illustrerar denna studie fördelarna med att introducera THUMS som ett verktyg i framtagningen av nya fordonsmodeller och skyddssystem för åkande.

## **5.6 Bidrag till FFI-mål**

Resultaten från detta projekt kommer att bidra till en minskning av bröstskador hos fordonsförare och passagerare, vilket bidrar till målet att minska antalet dödsfall och skador i trafiken. Den förbättrade skadepredikteringen med humanmodeller kommer att ge bättre precision vid utvecklingen av fordons säkerhet, inklusive situationer i moderna fordon med hög risk. Dessa situationer inkluderar vanligtvis komplexa krockscenarier och påverkas av individuella skillnader. Detta är särskilt viktigt med tanke på utvecklingen inom antikollisionssystem där kritiska beslut om fordonsinterventioner påverkar krockkonfigurationerna. Med de framtagna riskkurvorna för thoraxskador har simuleringar med THUMS potential att introducera betydande designförbättringar på grund av att humanmodeller fungerar i många lastriktningar. THUMS biofidelitet och detaljrikedom kommer att ge industrin betydande möjligheter att ta fram motåtgärder för att förbättra säkerheten i trafiken, inklusive både utveckling av aktiva säkerhetssystem och förbättrade skyddssystem för åkande.

Kunskaper som vunnits i detta projekt kommer att öka den svenska fordonindustrins konkurrenskraft. Ny kunskap har genererats om skaderiskkurvor och tröskelvärden för AIS2+ thoraxskador och implementerats i en existerande humanmodell. Denna kunskap överfördes till humanmodellen THUMS som används av Autoliv och VCC och implementerades för att studera thoraxskador vid frontalkrockar. De ingående studierna av fälldata har genererat ny kunskap om humanmodellens användbarhet för skadeprediktering och utvärdering av skyddssystem för åkande och fordonssäkerhet. Därför bidrar detta projekt till att Sveriges industri behåller sin världsledande position inom trafiksäkerhet.

## 6. Spridning och publicering

### 6.1 Kunskaps- och resultatspridning

Runt om i världen finns det många initiativ för att generera skadekriterier för humanmodeller samt förbättra deras biofidelitet som kan använda resultaten från detta projekt. Specifikt utgör resultaten från detta projekt en viktig pelare inom SAFERs kompetensområde för humanmodeller. Utvecklingen av en ny THOR-docka är en annan pågående aktivitet som har stark anknytning till resultaten från detta projekt. Projektpartnererna har presenterat resultat och kunskap vid internationella möten och konferenser.

### 6.2 Publikationer

De skrivna publikationerna från projektet är listade här med referensnummer i Chalmers Publication Library (CPL). Två vetenskapligt granskade publikationer, ett manuskript, en doktorsavhandling och tre konferenspresentationer:

- Mendoza-Vazquez M, Jakobsson L, Davidsson J, Brodin K, Östmann M (2014) Evaluation of Thoracic Injury Criteria for THUMS Finite Element Human Body Model Using Real-World Crash Data, *IRCOBI Conference Proceedings - International Research Council on the Biomechanics of Injury*, 10-12 september, Berlin, Tyskland. IRC-14-62:528-541. [[CPL 203161](#)]
- Mendoza-Vazquez M, Brodin K, Davidsson J, Wisman J (2013) Human rib response to different restraint systems in frontal impacts: a study using a human body model. *International Journal of Crashworthiness* 18(5):516-529. [[CPL 185861](#)]
- Mendoza-Vazquez M (2014) Thoracic injuries in frontal car crashes: risk assessment using a finite element human body model, *Doctoral thesis*, Institutionen för tillämpad mekanik, Chalmers tekniska högskola, Göteborg, Sverige, ISBN/ISSN: ISBN 978-91-7597-097-4. [[CPL 205139](#)]
- Brodin K, Gras LL, Öst J, Mendoza-Vazquez M, Ólafsdóttir J, Davidsson J. (2013) Human Body Modeling for Integrated Safety Analyses, Adult and Child Models, Presentation vid den 4<sup>th</sup> *International Symposium on Human Modelling and Simulation in Automotive Engineering*, Aschaffenburg, Tyskland, 13-14 maj. [[CPL 192673](#)]
- Brodin K, Mendoza-Vazquez M, Öst J, Ólafsdóttir J, Paas R, Davidsson J. (2013) Human body modeling for integrated safety analyses using THUMS, Presentation vid *THUMS European Users' Meeting*, Manchester, England, 6 juni. [[CPL 192670](#)]
- Brodin K, Öst J, Nydahl M. (2014) Evaluation at low g-level loading. Presentation vid den 5<sup>th</sup> *International Symposium on Human Modelling and Simulation in Automotive Engineering*, München, Tyskland, 16-17 oktober. [[CPL 205756](#)]
- Mendoza-Vazquez M, Davidsson J, Brodin K (2014) Construction and evaluation of thoracic (NFR2+) injury risk curves for an FE-HBM in frontal crashes. Manuskript inskickat till *Journal of Accident Prevention and Analysis*, september 2014.

## 7. Slutsatser och fortsatt forskning

Detta projekt har utvärderat skadekriterier för en humanmodell och utvecklat riskkurvor för AIS2+ thoraxskador. Ett första steg togs med avseende på att kontrollera robusthet och tillämpbarhet i sneda och komplexare belastningsfall, vilket visade sig vara en styrka hos THUMS jämfört med HIII. De skaderiskkurvor som togs fram med THUMS och som bäst återspeglade data från kadaverprov hade justerats för ålder och var kriterierna ”DcTHOR” på övergripande nivå och ”skjuvspänning” i revbenens kortikala ben på materialnivå. Dessa skaderiskkurvor överskattade riskerna jämfört med fälldata och kriteriet ”Dmax” på övergripande nivå överensstämde bäst med fälldata. De enskilda olycksrekonstruktionerna pekade i samma riktning då skaderisken överskattades med de båda kriterierna ”DcTHOR” och ”fatal strain”. Fler fall behövs för att analysera skaderiskpredikteringen med större noggrannhet.

Detta projekt har tagit viktiga steg mot förbättrad kunskap om skadekriterier för humanmodeller och fungerat som en av pelarna i SAFERs kompetensområde för humanmodeller. Projektet har kombinerat akademisk forskning och industriella tillämpningar och är en god grund för framtida arbete inom området.

Framtida forskning inom detta område är nödvändig eftersom industrin behöver ett verktyg som representerar den åkande väl och som kan prediktera skador vid belastning från alla riktningar för att utveckla effektiva skyddssystem för åkande i framtidens bilar. Detta behov kommer växa med utvecklingen inom aktiva säkerhetssystem för fordon. Inom utvecklingen av system som undviker och mildrar kollisioner är det av yttersta vikt att kunna utvärdera belastningen på de åkande i olika riktningar och med olika belastningsnivåer, samt jämföra dessa båda aspekter. På väg mot självkörande bilar är ett av nyckelområdena som kommer att göra denna resa möjlig förmågan att prediktera skador som överensstämmer med verkligheten.

## 8. Deltagande parter och kontaktpersoner

<u>Chalmers:</u>	Karin Brolin (projektledare), +46 31 7721509, karin.brolin@chalmers.se Johan Davidsson, +46 31 7723644, johan.davidsson@chalmers.se Manuel Mendoza-Vazques, manuel.mendoza-vazquez@chalmers.se Jac Wismans, jac.wismans@chalmers.se
<u>Autoliv:</u>	Bengt Pipkorn, +46 322 626341, bengt.pipkorn@autoliv.com Krystoffer Mroz, krystoffer.mroz@autoliv.com
<u>VCC:</u>	Lotta Jakobsson, +46 31 591814, lotta.jakobsson@volvocars.com Merete Östmann, +46 31 3252066, merete.ostmann@volvocars.com
<u>Volvo:</u>	Fredrik Törnvall, +46 31 3231693, fredrik.tornvall@volvo.com Stefan Thorn, +46 31 3229768, stefan.thorn@volvo.com Fredrik Jenefeldt, +46 31 3233330, fredrik.jenefeldt@volvo.com

## 9. Referenser

- Brolin K, Mendoza-Vazquez M, Song E, Lecuyer E, Davidsson J (2012). Design implications for improving an anthropomorphic test device based on human body simulations, Proc. of the IRCOBI Conference, s. 843-855, Dublin, Irland, september.
- Davidsson, J., J. Carroll, D. Hynd, et al. (2014) Development of injury risk functions for use with the THORAX Demonstrator; an updated THOR. IRCOBI Conference, 10-12 sept. Berlin, Tyskland.
- Forman J, Kent R, Mroz K, Pipkorn B, Boström O, Segui-Gomez, M (2012) Predicting rib fracture risk with whole-body finite element models: development and preliminary evaluation of a probabilistic analytical framework, 56th Annual Conference Annals of Advances in Automotive Medicine, Barrington, Illinois, 14-17 oktober, 2012, s. 109-124.
- Forman J, Kent R, Ali T, Crandall J, Boström O, Håland Y, (2005) Biomechanical Considerations for the Optimization of an Advanced Restraint System: Assessing the Benefit of a Second Shoulder Belt, Proc. of the IRCOBI Conference, Prag, Tjeckien, s. 337-353.
- Kent R, Patrie J, Benson N, (2003) The Hybrid III dummy as a discriminator of injurious and non-injurious restraint loading. Proceedings/Association for the Advancement of Automotive Medicine 47, s.51-75.
- Kleinberger, M., E. Sun, R. Eppinger, S. Kuppa and R. Saul (1989) Development of improved injury criteria for the assessment of advanced automotive restraint systems, NHTSA.
- Kroell, C. K., Schneider, D. C. & Nahum, A. M. (1974) Impact tolerance and response of the human thorax II. SAE Technical paper, Paper No. 741187, s. 383-457.
- Lau, I. & Viano, D. (1986) The viscous criterion - Bases and applications of an injury severity index for soft tissues. Stapp Car Crash Journal, 30, s. 123-142.
- Mendoza-Vazquez M, Brolin K, Davidsson J, Wismans J (2013) Human rib response to different restraint systems in frontal impacts: a study using a human body model. *International Journal of Crashworthiness* 18(5):516-529.
- Mendoza-Vazquez M (2012) Rib and Thoracic Response in Frontal Car Crashes: A Study Using a Finite Element Human Body Model, THESIS FOR LICENTIATE OF ENGINEERING no 2012:17, Institutionen för tillämpad mekanik, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg, Sverige.
- Mendoza-Vazquez M (2014) Thoracic injuries in frontal car crashes: risk assessment using a finite element human body model, Doctoral thesis, Institutionen för tillämpad mekanik, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg, Sverige, ISBN/ISSN: ISBN 978-91-7597-097-4.
- Mendoza-Vazquez M, Jakobsson L, Davidsson J, Brolin K, Östmann M (2014) Evaluation of Thoracic Injury Criteria for THUMS Finite Element Human Body Model Using Real-World Crash Data, IRCOBI Conference Proceedings - International Research Council on the Biomechanics of Injury, 10-12 september, Berlin, Tyskland. IRC-14-62:528-541.
- Mendoza-Vazquez, M., K. Brolin, J. Davidsson and J. Wismans (2013) Human rib response to different restraint systems in frontal impacts: a study using a human body model. *International Journal of Crashworthiness* 18(5): 516-529.
- Petitjean, A., Lebarbe, M., Potier, P., Trosseille, X. & Lassau, J. P. (2002) Laboratory Reconstructions of Real World Frontal Crash Configurations using the Hybrid III and THOR Dummies and PMHS. Stapp Car Crash Journal, 46, s. 27-54.
- Pipkorn B, Kent R (2011) Validation of a Human Body Thorax Model and its Use for Force, Energy and Strain Analysis in Various Loading Conditions, Proc. of the IRCOBI Conference, Krakow, Polen, september
- Song, E., Lecuyer, E. & Trosseille, X. (2011) Development of injury criteria for frontal impact using a human body FE model. International Technical Conference on the Enhanced Safety Vehicles Conference, 13-16 juni. Washington, D.C., USA.
- Toyota (2008) User's Guide of Computational Human Model THUMS - AM50 Occupant Model: Version 3.0-080225. Toyota Motor Corporation Toyota Central Labs Inc, Japan.