

A25575

# Tåleevne og fart

## Forfattere

Isabelle Roche-Cerasi

Thomas Jonsson



Kilde: EuroNCAP

**SINTEF Teknologi og samfunn**

Transportforskning

2013-11-30

# Tåleevne og fart

**EMNEORD:**

Tåleevne

Risiko

Fartsgrenser

**VERSJON**

1.0

**DATO**

2013-11-30

**FORFATTERE**Isabelle Roche-Cerasi  
Thomas Jonsson**OPPDRAGSGIVER**

Arild Ragnøy, Statens Vegvesen

**OPPDRAGSGIVERS REF.**

Arild Ragnøy

**PROSJEKTNR**

102005412

**ANTALL SIDER OG VEDLEGG:**

25+ vedlegg

**SAMMENDRAG****Overskrift sammendrag**

Statens vegvesen, Vegdirektoratet ønsker oppdatert dokumentasjon for å vurdere om kunnskapsbasen for dagens fartsgrensesystem bør revideres, og som kan danne grunnlag for hvilke fartsgrenser som kan være forenlige med nullvisjonen.

Rapporten presenterer en litteraturstudie som skal gi kunnskap om hvilke fartsgrenser i byer som vil være forenlige med Nullvisjonen. Denne litteraturstudien er basert på to tilnærminger: Den første; det trafikkingeniørperspektivet fremlegger risikokurver for alvorlige skader og dødsfall ved ulike kollisjonsfart; et viktig verktøy for politiske beslutninger som representerer den gjennomsnittlige risikoen på vegene. Den andre tilnærmingen er den biomekaniske, som fokuserer på ulike faktorer og skademekanismer.

**UTARBEIDET AV**

Isabelle Roche Cerasi

**SIGNATUR****KONTROLLERT AV**

Dagfinn Moe

**SIGNATUR****GODKJENT AV**

Roar Norvik

**SIGNATUR****RAPPORTNR**

A25575

**ISBN**

9788214056273

**GRADERING**

Fortrolig

**GRADERING DENNE SIDE**

Fortrolig

# Innholdsfortegnelse

<b>Introduksjon</b> .....	<b>3</b>
<b>A Trafikkingeniørperspektiv</b> .....	<b>4</b>
<b>1 Konseptualisering</b> .....	<b>4</b>
1.1 Hva påvirker normalfarten på en veg/gate? .....	4
1.2 Hva påvirker kollisjonsfarten? .....	5
1.3 Hva påvirker alvorlighetsgraden ved en ulykke? .....	5
1.4 Sammenstilling av tidligere studier.....	6
<b>2 Konklusjon (ut fra et trafikkingeniørperspektiv)</b> .....	<b>10</b>
<b>B Biomekaniske perspektiv</b> .....	<b>11</b>
<b>1. Introduksjon</b> .....	<b>11</b>
<b>2. Biomekaniske studier</b> .....	<b>12</b>
2.1 Eksperimenter .....	12
2.2 Skadekriterier .....	14
2.3 Førere og passasjerer.....	17
2.4 Fotgjengere .....	17
2.5 Syklister .....	19
<b>3 Konklusjon (ut fra et biomekanisk perspektiv)</b> .....	<b>21</b>

## BILAG/VEDLEGG

---

Kröyer, HRG., Jonsson, T., Varhelyi, A., 2014. *Relative fatality risk curve to describe the effect of change in the impact speed on fatality risk of pedestrians struck by a motor vehicle.* Accident Analysis and Prevention 46, 143–152.

---

## Introduksjon

Fotgjengere er de mest sårbare trafikanter i byer med komplekse trafikkforhold, og unge og eldre er spesielt sårbare når de går i et slikt risikofylt miljø. De har høyere risiko for å bli alvorlig skadd dersom de blir involvert i en trafikkulykke. Disse ulykkene skjer oftere i urbane områder med lav hastighet og hodeskader er den viktigste dødsårsaken for fotgjengere og syklister.

Ulykkesdata gir kunnskap om hvor alvorlig skadene er og er grunnleggende innen biomekanikkforskning for å etablere en relasjon mellom de ulike typer skader og omstendighetene rundt ulykken. Forskere innen biomekanikk studerer menneskets tåleevne og vurderer beskyttelseskriterier for menneskekroppen. Forskning på skademekanismer og risikoen for skade bidrar til å forbedre utforming av kjøretøy. Faktisk er det mulig å redusere risikoen for alvorlige fotgjengerskader med nye energiabsorberende bilmaterialer og intelligente bilsystemer. Kollisjonstester og numeriske simuleringer gir også kunnskap om forholdet mellom skadens alvorlighetsgrad og kollisjonsfarten i ulykker mellom bil og fotgjenger, hvilke typer kjøretøy som forårsaker flest skader og hvilke støttyper som forårsaker benbrudd, når det er tatt hensyn til faktorer som alder og mangel på muskulær tonisitet.

Å forbedre fotgjengersikkerhet er nødvendig og direkte koblet til bilens kollisjonsfart (Rosén et al., 2011). Mange studier på forholdet mellom kollisjonsfart og fotgjengeres dødsrisiko og skader de siste tiårene, viser at en fartsgrense over 50 km/t er farlig for fotgjengere i en trafikkone delt med kjøretøyer, og at en reduksjon i fartsgrensen fra 50 til 30 km/t fører til en dramatisk reduksjon i risikoen for at fotgjengere blir alvorlig skadet. Studier basert på ulykkesdata fra de siste 30 årene, har gitt grunnlag for risikokurver for alvorlige skader og død ved ulik kollisjonsfart. Disse resultatene er viktige for å utvikle gode sikkerhetstiltak i urbane soner.

Trafikksituasjonen er ganske annerledes i dag og forholdene (f.eks befolkning, kjøretøy, medisinsk behandling) er endret. Risikoen varierer betydelig med alder, og den gjennomsnittlige risiko for alvorlig skade eller død for en eldre fotgjenger er høyere enn for en yngre fotgjenger ved samme kollisjonsfart.

Resultatene på dødsrisikoen ved kollisjonsfart er av stor betydning for å bedre fotgjengersikkerhet. Dette ved å begrense fartsgrensene til nivåer som ikke kan påregnes å medføre alvorlig skade eller død i soner der fotgjengere kan møte biler (krysningspunkt), ved å skape fysisk separasjon i soner med høyt fartsnivå eller ved å utvikle intelligente systemer for biler (automatisk bremsing).

Det er nødvendig å ha god kunnskap om forholdet mellom kollisjonsfart og trafikantens skaderisiko, og å studere påvirkning av andre faktorer på dette forholdet (Tefft, BC, 2011, Rosén et al., 2011 og andre studier nevnt av disse forfattere).

Rapporten inneholder to deler. Den første delen presenterer det trafikkingeniørperspektivet som leverer risikokurvener versus kollisjonsfart, et verktøy for politiske beslutningstakere for å definere prinsipper og kriterier for fartsgrenser på ulike typer veier og tettbygde områder. Den andre delen er det biomekaniske perspektivet som fokuserer på faktorer knyttet til skademekanismer som øker risiko.

## A Trafikkingeniørperspektiv

### 1 Konseptualisering

Det er mange ulike faktorer som påvirker alvorlighet av skade ved påkjøring av fotgjenger eller syklist. Nedenfor er det gjort et forsøk på å gi et konseptuelt bilde av dette, relatert til de delene denne rapporten har fokusert på.

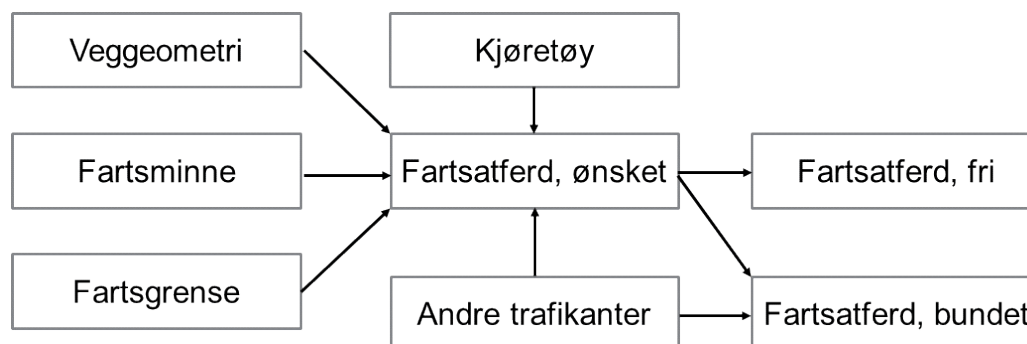
Konseptualiseringen er delt inn i tre deler:

1. Hva påvirker "normalfarten" på en strekning?
2. Hva påvirker kollisjonsfarten en fotgjenger blir påkjørt med (gitt en bestemt normalfart)?
3. Hva påvirker alvorlighetsgraden av skaden for en påkjørt fotgjenger/syklist (gitt en bestemt normalfart)?

Det er først og fremst det tredje punktet som denne rapporten har hatt som hensikt å fokusere på, men for å koble dette til fartsgrensen på en strekning må man også være bevisst det første og andre punktet, ettersom fartsgrensen påvirker allerede i del 1 over.

#### 1.1 Hva påvirker normalfarten på en veg/gate?

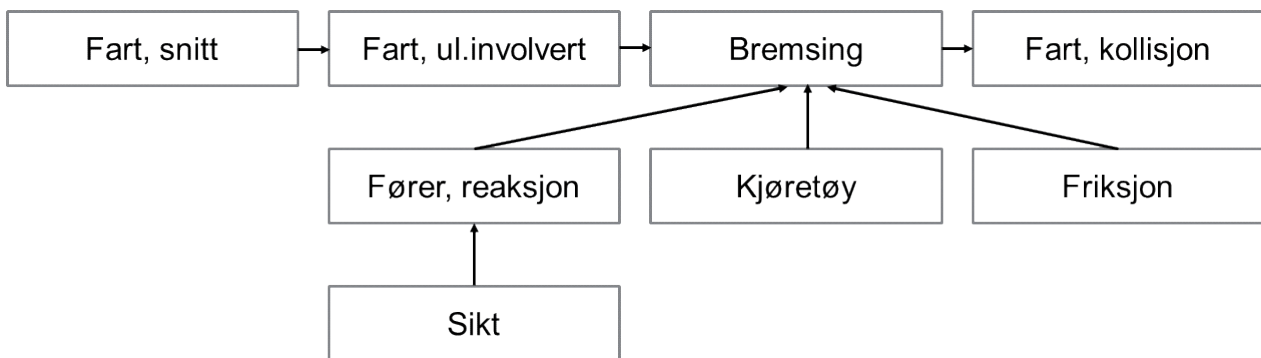
Mange ulike faktorer spiller inn på førerens fartsvalg (Figur 1), og fartsgrensen er bare en av faktorene. Tidligere studier av omskiltning av fartsgrenser viser at en endring av fartsgrensen med 10 km/t kun gir en gjennomsnittlig fartsendring på rundt 2-3 km/t (Hydén m.fl. 2008, Bång & Pezo-Silvano 2012, Trafikverket 2012). Andre faktorer som spiller inn er vegens/gatens geometri, veg-/gatebredde, parkerte kjøretøy langs strekningen, om føreren kommer fra en strekning med høyere eller lavere fart (fartsminne), type kjøretøy en kjører med mer (Hansen m.fl. 2007, Ivan m.fl. 2012, Berntman m.fl. 2012). Dessuten påvirker andre trafikanter både som normgivende for hva som er akseptabel fart, og potensielt som begrensning i mulig valg av fart om det oppstår kø.



Figur 1: Flowchart – faktorer som påvirker normalfart

## 1.2 Hva påvirker kollisjonsfarten?

Normalfarten på ei gate er ikke nødvendigvis den samme som kollisjonsfarten en fotgjenger blir påkjørt med. Det finnes mange årsaker/mekanismer bak dette (Figur 2). En av forklaringene er at bilisten ofte rekker å reagere og bremser ned farten like før kollisjonsøyeblikket, noe som bidrar til en lavere kollisjonsfart. Hvor mye føreren rekker å bremse kommer an på førerens egen reaksjonstid, som dessuten påvirkes av sikt, og bremsetiden som påvirkes av ulike kjøretøys- og vegegenskaper (som f.eks. friksjon mellom dekk og vegdekke).

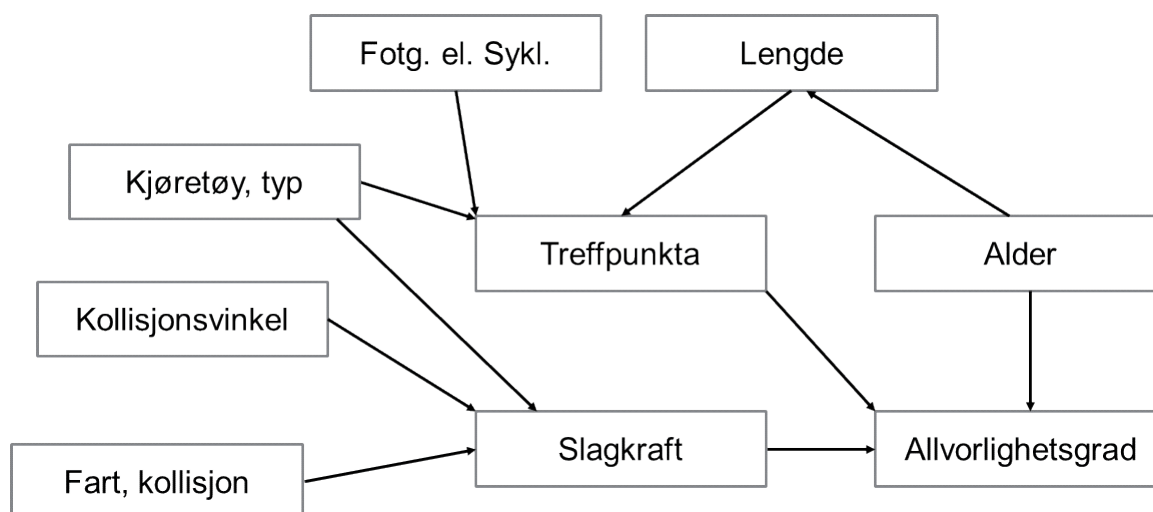


**Figur 2:** Flowchart – faktorer som påvirker kollisjonsfart

Ulykkesinvolverte kjøretøy har en annen fartsfordeling enn gjennomsnittet på en veg, eksempelvis har førere som kjører i relativt høy fart større risiko for å bli involvert i ulykker og er overrepresentert i trafikkulykker. En av årsakene til dette kan beskrives ut fra Pasanen (1992) sitt resonnement om "frie kjøretøy". Pasanen analyserte filmopptak av kollisjoner mellom motorkjøretøy og fotgjengere utenfor Helsingfors jernbanestasjon. En av konklusjonene hans er at det aldri er kjøretøy som står i kø, men frie kjøretøy, som kolliderer med fotgjengere. Et fritt kjøretøy er enten det fremste kjøretøyet i en kø eller et kjøretøy som kommer alene. I ett fritt kjøretøy har altså føreren fritt fartsvalg uten å være bundet av foranliggende kjøretøy, og har dermed ofte en noe høyere fart enn gjennomsnittet. Årsaken til at frie kjøretøy kjører på fotgjengere kan skyldes, at få fotgjengere forsøker å gå mellom den korte luken som er mellom to kjøretøy i en kø.

## 1.3 Hva påvirker alvorlighetsgraden ved en ulykke?

I kollisjonen mellom motorkjøretøy og forgjengere spiller kollisjonsfarten en avgjørende rolle, men også mange andre faktorer påvirker.



**Figur 3:** Flowchart – faktorer som påvirker alvorlighetsgraden til en ulykke med påkjørt fotgjenger eller syklist

Figur 3 gir en oversikt over faktorer som påvirker alvorlighetsgraden av en ulykke. De fleste av disse faktorene tas mer detaljert opp i andre deler av rapporten. Mye av det som påvirker alvorlighetsgraden av en ulykke avhenger av hvordan den påkjørte personen mer i detalj blir truffet av kjøretøyet, som igjen styres av om personen er fotgjenger eller syklist, personens høyde, hvilket type kjøretøy personen blir påkjørt av etc. En annen viktig faktor er personens alder, som er et indirekte mål på hvor mye personen tåler i forhold til kollisjon personen blir utsatt for.

## 1.4 Sammenstilling av tidligere studier

Dette avsnittet oppsummerer forskningen på sammenhengen mellom kollisjonsfart og fotgjengeres sannsynlighet for å overleve en kollisjon. Avsnittet er først og fremst basert på følgende fire artikler:

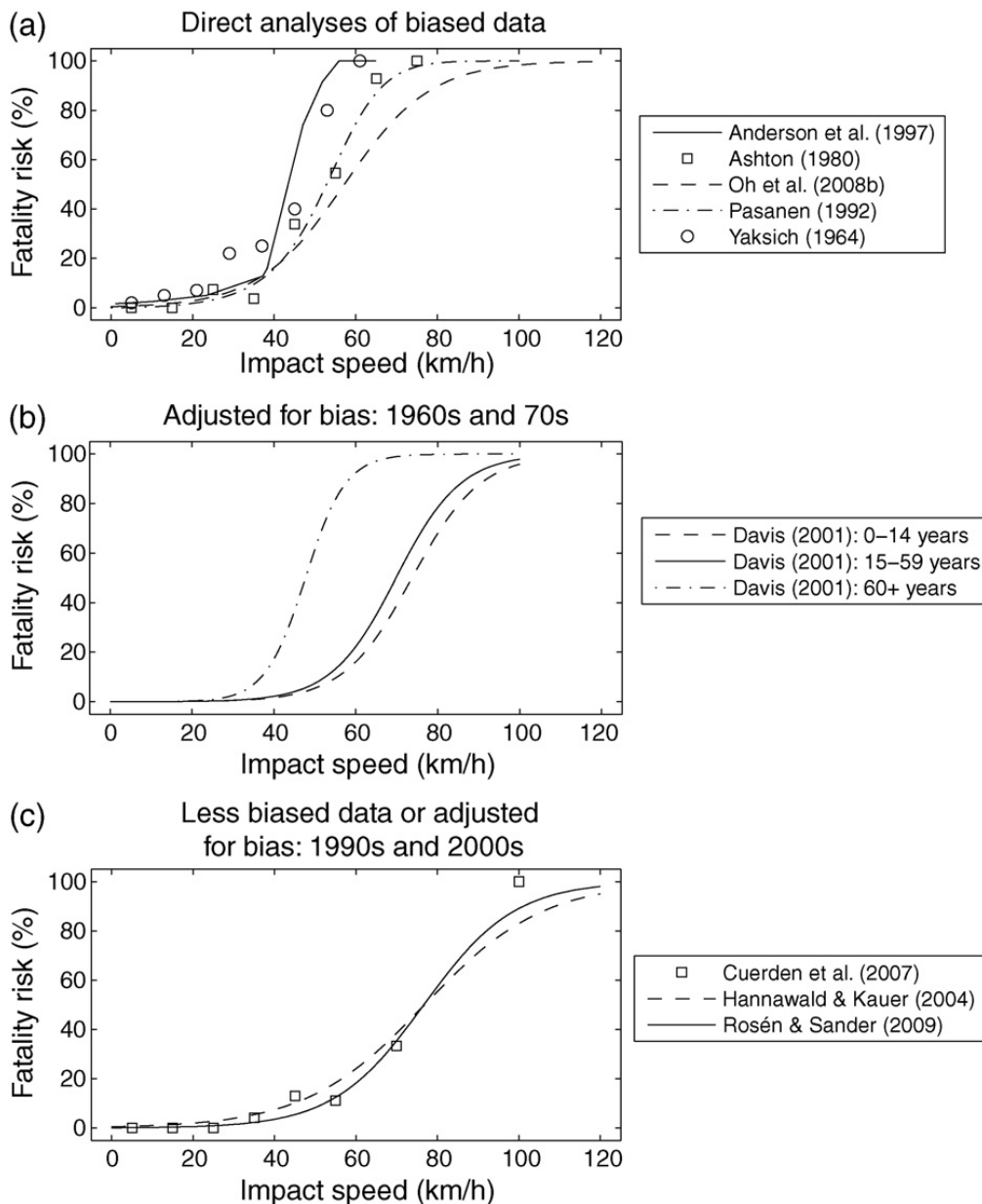
- Davis (2001) var den første til å virkelig ta hensyn til tidligere metodologiske problemer med tanke på beregninger av sannsynligheter for skadegrad ved ulike fartsnivåer ved kjøretøy-fotgjengerkollisjoner og som samtidig forsøkte å gjøre noe med det.
- Rosén og Sander (2009) gjorde det samme i Europa, som Davis tidligere hadde gjort i USA, men med nyere og mer omfattende data.
- Rosén m.fl. (2011) har gjennomført en stor systematisk litteraturgjennomgang av studier på kollisjon.
- Krøyer m.fl. (2014<sup>1</sup>) bygger videre på Rosén m.fl. (2011) og presenterer nye måter å tolke risikokurver på og hvilke konsekvenser dette medfører

Forskningen på betydningen av fart for trafikkikkerheten har en lang historie. Yaksich (1964) gjennomførte allerede på 50- og 60-tallet, studier på sammenhengen mellom fart og risikoen for at påkjørte fotgjengere ville omkomme. Siden den gang er en rekke publikasjoner utgitt, som har presentert nye resultater innenfor tema (Ashton m.fl. 1977, Ashton 1980, Walz m.fl. 1983, Teichgräber 1983, Pasanen 1992, Andersson m.fl. 1997, Gårder 2004, Rosén & Sander 2009).

<sup>1</sup> Artikkelen er akseptert og vil presenteres i Accident Analysis and Prevention i begynnelsen av 2014. Se vedlegg.



De tidligere studiene led dog under en del metodiske brister. Det ble ikke tatt hensyn til, blant annet en underrepresentasjon av lettere skader i datagrunnlaget og/eller en aldersfordeling for påkjørte fotgjengere som ikke var representative. Asthon bemerket i sin studie skjevheter i datagrunnlaget med tanke på skadegrad, og konstaterte at det ikke er mulig å anslå sannsynligheter for skadegrad ut fra hans materiale. Likevel er data fra denne studien, og studier med liknende problemer, benyttet av flere forskere for å anslå sannsynligheter for skadegrad (Walz 1983, Teichgräber 1983, Pasanen 1992, Andersson m.fl. 1997). Disse feilaktige kollisjonskurvene har i flere tiår vært grunnlag for det allment aksepterte forholdet mellom kollisjonsfart og skadegrad for påkjørte fotgjengere (Figur 4a).

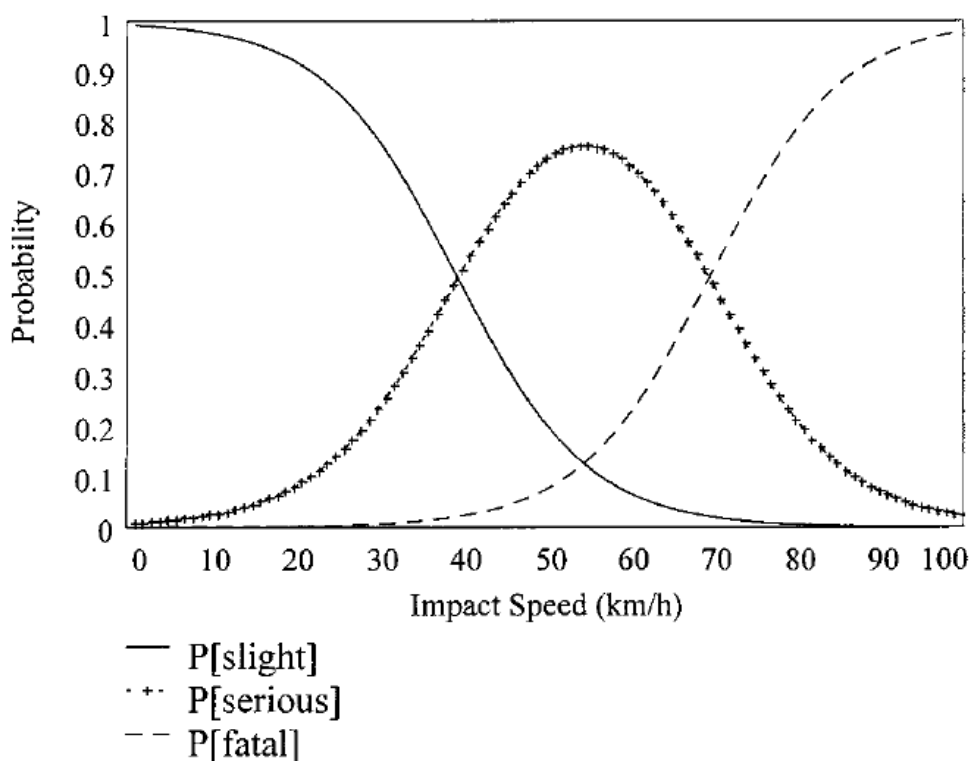


**Figur 4:** Sammenhengen mellom kollisjonsfart og dødsrisiko i studier av ulik kvalitet (Rosén m.fl. 2011)



I den senere tid har flere forskere blitt klar over for unøyaktighetene i disse beregningene. Først ut var Davis (2001) som estimerte en kollisjonskurve ut fra Asthons data fra 60- og 70-tallet. Ved hjelp av en "ordered logit response"-modell, tok han hensyn til skeivhetene i data, og delte datasettet inn etter fotgjengernes alder. Han fikk da fram en kollisjonskurve for fotgjengere med en mye lavere risiko for dødsfall enn de tidligere aksepterte kurvene, med unntak av for den eldste aldersgruppen (60+), hvor sammenhengen mellom kollisjonsfarten og dødsrisiko var lik (Figur 4b). I en enda nyere studie av Rosén og Sander (2009) benyttes et nyere og mer representativt datamateriale fra Tyskland fra 1999 til 2007. I studien estimeres nye sammenhenger som peker på ytterligere lavere risiko enn hva Davis (2001) hadde beregnet seg fram til (Figur 4c).

Davis utforsket ikke bare risikoen for å omkomme i sin studie, men også fordelingen av skader ut fra skadegrad (Figur 5). Kanskje hadde "Nullvisjons-tankene" begynt å spre seg til USA ettersom Davis konkluderte med en anbefaling om at fartsgrensen ikke burde være høyere enn 40 km/t (25 mph), da det ved lavere fart enn dette skulle være en større sannsynlighet for å bli lettere skadd enn alvorlig skadd.



**Figur 5** Sannsynlighet for alvorlighetsgrad av skade ut fra kollisjonsfart, for påkjørte fotgjengere i alderen mellom 15 og 59 år (Davis 2001).

Rosén og Sander (2009) påpeker at selv om studier viser at sannsynligheten for å bli drept som fotgjenger ved en gitt kollisjonsfart er betydelig lavere enn tidligere antatt, medfører ganske små endringer i fartsnivå store relative risikoendringer. En endring i +10 km/t medfører en dobling i risikoen for å bli drept som fotgjenger ved påkjørsel av personbil. I Krøyer med flere (2014) diskuteres det nærmere hvilke konsekvenser de nye studiene har for trafikksikkerhet og risikoen.

Både Rosén og Sander (2009), Fredriksson med flere (2010) og Krøyer med flere (2014) konstaterer at det store flertallet av påkjøringer av fotgjengere skjer i et fartsnivå på under 50 km/t

og at man dermed bør fokusere på sammenhengen mellom kollisjonsfart og dødsrisiko ved fartsnivåer under 50 km/t. Her spiller det samme som ble påpekt i de tidlige kollisjonsstudiene inn, nemlig at det er et stort antall lettere skadde ved de lave fartsgrensene som bør tas hensyn til. Problemet i de tidlige studiene var at man ikke regnet alle lettere skadde. Køyer med flere påpeker at med det store antallet fotgjengere ved fartsnivåer under 50 km/t, vil selv en liten økning i dødsrisiko på noen få prosent til føre til et betydelig antall drepte. En liten absolutt endring i dødsrisikoprosenten vil altså føre til store endringer i antall dødsfall blant fotgjengere.

Hovedkonklusjonene fra Krøyer med flere (2014) er:

1. Risikokurvene for dødsrisiko varierer betydelig fra studie til studie, fordi de er basert på ulike populasjoner og med forskjellige metodiske utgangspunkt.
2. Den absolutte dødsrisikokurven som et visuelt verktøy (fra 0 til 100% dødsrisiko) kan føre til misforståelser om hvordan fartsendringer ved lavt fartsnivå påvirker dødsrisiko. Denne typen kurver bør derfor suppleres med kurver over relativ dødsrisiko. En kombinasjon av absolutte og relative risikokurver gir et bedre inntrykk av hvordan kollisjonsfart påvirker dødsrisiko.
3. Den absolutte dødsrisikokurven tillates ikke for fastsettelse av en "sikker fartzone" som kan brukes til 'speed management'. Den relative dødsrisikoen-modellen viser at effekten av fartsendringer på dødsrisiko er lik for forskjellig basisfart ved urbane fartsnivåer.
4. Hvis en absolutt dødsrisikokurve viser lavere absolutt dødsrisiko i forhold til en annen (eldre) absolutt risikokurve, betyr det ikke nødvendigvis at den relative dødsrisikoen er mindre følsom for endringer i kollisjonsfart.
5. Den relative dødsrisiko-modellen viser at en beskjeden fartsreduksjon /-økning vil ha en betydelig effekt på sannsynligheten for dødsfall, og dermed på antall dødsulykker på alle urbane fartsnivå. Modellen tilsier at ved urbane fartsnivå, vil en økt kollisjonsfart resultere i en betydelig økning av dødsrisiko, og derfor bør stor forsiktighet utvises når økt fart vurderes.
6. Siden det relative risikoforholdet er ganske stabil ved ulik basisfart, bør det største potensialet for å redusere dødsulykker gjennom fartsreduksjon være på disse fartsgrensene der de fleste av dødsulykkene oppstår.
7. For å finne passende fart, er det flere andre aspekter som må vurderes, som bl.a. eksponering, risiko for ulykker, risiko for alvorlige skader, reisetid, bærekraft, tilgjengelighet, subjektiv sikkerhet, mobilitet, sosial ulikhet, osv.

Andre resultater og diskusjoner i litteraturen som er verdt å nevne:

- Rosén og Sander (2009) fant i sin studie at halvparten av ulykkene med drepte fotgjengere skjedde i fartsnivåer mellom 50-80 km/t. De mener at det er en mulighet for å overleve kollisjoner som fotgjenger ved disse fartsnivåene, og at det derfor burde fokuseres mer på fotgjengersikkerhet også ved disse fartsnivåene.
- Rosén og Sander (2009) også har sett nærmere på effekten av kjønn på sannsynligheten for å bli drept som fotgjenger. Som i tidligere studier har de funnet at kvinnelige fotgjengere har lavere sannsynlighet enn mannlige for å bli drept ved påkjørsel. Kontrollert for andre faktorer konstaterer de at dette er et indirekte resultat av at kvinner beveger seg mer i miljøer med lavt fartsnivå og menn i miljøer med høyt fartsnivå. Tar man hensyn til dette finner de ikke noen kjønnsforskjeller.

- I tillegg til det tidligere nevnte problemet om underrapportering av ulykker med lettere skadde og utvalg som ikke er representative med tanke på aldersfordeling, er det også stor usikkerhet ved estimering av fart.
- Et annen statistisk problem er at ved fartsnivåer under 30 km/t og over 80 km/t er grunnlaget i form av antall drepte fotgjengere forholdsvis lite (og ved fartsnivå over 80 km/t er grunnlaget i form av påkjørte fotgjengere generelt lavt). Hver enkelt drepte fotgjenger vil dermed gi store utslag for risikovurderingen og usikkerheten i modellen blir da stor.
- I Sverige har man med sykehusrapportering av trafikkulykker fått et mye mer detaljert bilde av antall skadde fotgjengere og syklist. Dette har konstatert at påkjørsel av fotgjengere utgjør en forholdsvis liten andel av det totale antallet skadde fotgjengere og syklist (Jonsson 2013). Gruppene singel sykkelulykke, singel fotgjengerulykke (fallulykke) og motorkjøretøy-sykkelulykke er alle større. Motorkjøretøy-fotgjengerulykke gir forholdsvis alvorlige skader, men singelulykkene kan også medføre alvorlige konsekvenser. Man bør altså være bevisst at selv om man klarer å redusere trafikkulykker mellom fotgjenger og motorkjøretøy, betyr ikke dette at man har redusert alle typer fotgjenger- og sykkelulykker.
- Studiene er nesten utelukkende begrenset til påkjørte fotgjengere. I enkelte studier er syklist antatt til å ha samme risiko for å bli drept som fotgjengere. Kollisjonsmekanismene er ikke de samme for fotgjenger og syklist, se seksjon 2.5. Syklistene befinner seg høyere oppe og i en annen kroppsposisjon enn en fotgjenger ved kollisjon med kjøretøy.

## 2 Konklusjon (ut fra et trafikkingeniørperspektiv)

Fart spiller en viktig rolle, dels for sannsynligheten for ulykker, men spesielt for alvorlighetsgraden. De tidligere forhold som er dokumentert, med størst økning i sannsynligheten for en fotgjenger å bli drept i en kollisjon mellom 30 og 60 km/t, har i stor grad vist seg å være feil. Det er en betydelig sannsynlighet for å overleve en kollisjon opp til hastigheter på rundt 80 km/t. Dette betyr ikke at dette er en passende fart i miljøer med samspill mellom bilister og fotgjengere/syklist. De fleste fotgjengere og syklist blir skadet i hastigheter på rundt 30-60 km/t og den relative risikoen for å bli drept mellom to forskjellige hastigheter endres drastisk, selv med små fartsendringer. En forandring i kollisjonsfart på 10 km/t fører til en endring i risiko for å bli drept ved en faktor på 2 til 2,5.

I tillegg til kollisjonsfarten, er det også flere andre faktorer som spiller inn på hvor alvorlig skadet en truffet fotgjenger/syklist blir. En av de viktigste er alder, der fotgjengere med alder over 60/65 år har større risiko for å bli drept enn yngre fotgjengere. De eldres korrelasjon mellom kollisjonsfart, og sannsynligheten for å bli drept ligner faktisk på koblingen som tidligere feilaktig ble funnet for alle fotgjengere. Fra et nullvisjonsperspektiv, må systemet være utformet med fokus på utsatte grupper, og det er dermed et spørsmål om det er dette forholdet som bør bli retningslinjen.

Fartsgrensen er bare en av mange faktorer som påvirker kollisjonsfarten. Dette bør tas i betraktning når retningslinjene for å bestemme fartsgrenser blir vedtatt.

## B Biomekaniske perspektiv

### 1. Introduksjon

Alvorlige konsekvenser av ulykker, dvs. død, redusert helse og livskvalitet er uakseptable. Transportsystemet bør være utformet slik at risikoen å bli drept eller alvorlig skadet i trafikkulykker er så lav så mulig. Det er ønsket å sette fartsgrensene i urbane områder på ett nivå som beskytter alle sårbare trafikanter mot dødsfall og alvorlige skader; dvs. barn, fotgjengere og syklister.

Forholdet mellom kollisjonsfart og risiko er et verktøy for politiske beslutningstakere, til å definere prinsipper og kriterier for å sette fartsgrenser for ulike typer vegger og tettbygde områder. Risikokurvene for alvorlige skader og død ved ulik kollisjonsfart er viktige for å forstå risikonivået på vegnettet.

I følge ekspertene i biomekanikk, reflekterer ikke risikokurvene helt kompleksiteten til realiteten og inkluderer ikke påvirkningen av alle faktorer som øker risikoen. En fartsreduksjon impliserer likevel en reduksjon av påvirkningen av risikofaktorene og av antall ulykker (for alkohol og narkotika, må vi forutsette at førere under innflytelse er reseptive overfor fartsgrenser) (Laumon, 2013).

Biomekanikk er studien om strukturer og funksjoner til biologiske systemer ved hjelp av mekaniske og fysiske teorier. Forskere innen biomekanikk består ofte av ingeniører, leger og fysikere. For å identifisere skademekanismene, går de i dybden og analyserer ulykkesdata og påvirkning av faktorer. Ulykkesdata gir kunnskap om alvorlighetsgraden av skader ved bruk av en skala (Abbreviated Injury Scale, AIS), og er grunnleggende innen biomekanikkforskning for å etablere en relasjon mellom ulike typer skader og omstendighetene rundt ulykken.

Biomekanikkekspertene bruker fire typer forskningsmetoder for å analysere omstendighetene der en skade oppstår; for eksempel under en plutselig deselerasjon eller et kraftig støt:

- frivillige personer,
- anatomiske deler,
- krasjtest dummyer (testdukker) og
- numeriske simuleringer

Målet er studien av menneskets tåleevne og vurdering av beskyttelseskriterier for menneskets kroppsdeler.

Forskningsresultatene bidrar mest til å forbedre utforming av kjøretøydesign. Det er faktisk mulig å redusere risikoen for alvorlige fotgjengerskader med nye energiabsorberende bilmaterialer og intelligente førerstøttesystemer. Kollisjonstester og numeriske simuleringer gir også kunnskap om forholdet mellom skadens alvorlighetsgrad og kollisjonsfarten i ulykker mellom bil og barn, fotgjengere eller syklister. Videre hvilke typer kjøretøy som forårsaker flest skader og hvilke kollisjonstyper som forårsaker benbrudd, når det er tatt hensyn til faktorer som alder og mangel på muskulær tonisitet.

Biomekaniske parametere som påvirker alvorlighetsgraden av skader er: (1) faktorer knyttet til trafikanter (f.eks fotgjengere, syklister), alder, kjønn, BMI, helseproblemer, tåleevnen til

kroppsdeler (f.eks hodet og hjernen, halsen, brystet, øvre og nedre ekstremiteter), muskeltonisitet, mageinnholdet, solid- og hulorganer, etc. (2) typer kollisjoner (frontal, side, bakfra, rollover), (3) krasjfaktorer (støtretning, delta V, deselerasjon, beltebelastning, airbag interaksjon, etc.) (4) typer kjøretøy (f.eks SUV, SEDAN).

Rollen til alle disse biomekaniske parametere er selvfølgelig vanskelig å kvantifisere.

## 2. Biomekaniske studier

Biomekaniske studier er basert på epidemiologiske dataanalyser og rapporter fra politi og sykehus. Rapportene inneholder kontekstuelle faktorer relatert til ulykken (f.eks. sted og infrastruktur, bremsingsmerkene på veien) og biltilstanden (f.eks bilskader, rattskader, seteposisjon og sikkerhetsbelteskader, etc.). Andre databaser tar i betraktning data fra forsikringsdatabaser (Fatal Analysis Reporting System (FARS), Cooperative Crash Injury Study (CCIS), German In-depth Accident Study (GIDAS)). Disse dataene er viktige for å studere relevante ulykkemekanismer, men det mangler ofte viktige parametere for forskningstudiene.

### 2.1 Eksperimenter

Det er fire typer av biomekaniske studier:

- (1) Rekonstruksjoner med frivillige personer.

Målet med disse eksperimentene, som selvfølgelig foregår under terskelet for smerte er å identifisere den fysiologiske og ikke-skadelige atferden for å definere komfortindekser. Bare frivillige voksne uten medisinsk historie deltar i slike eksperimenter.

- (2) Rekonstruksjoner med Post Mortem Human Subjekt (PMHS) (Figur 6)

Målet er å analysere skademekanismer med å velge relevante kollisjonsbetingelser og en spesifikk kroppsdeler som skal være skadet med vilje under eksperimentet. Forholdene er derfor forhåndsdefinert og anatomiske deler er utstyrt med sensorer (f.eks kollisjonsfart og retning, støtssted på kroppen).

For eksempel kan et eksperiment være et hode som støter mot frontruten.

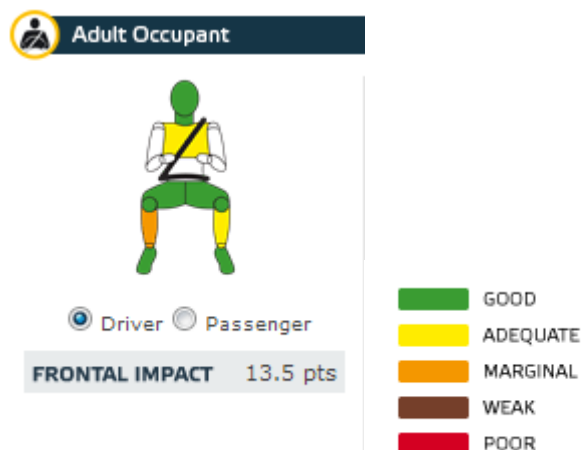
Disse eksperimentene gir kunnskap om menneskekroppens bevegelse og tåleevne relatert til kollisjonskraft, basert på biologiske egenskaper, selv om det er utfordringer relatert til bruk av lik. Skader blir evaluert av en lege med spesialkompetanse i obduksjon (dvs. beinbrudd).



**Figur 6:** Kjøretøy-fotgjenger kollisjonstest med PHMS (Kilde: Chalandon, 2007)

(3) Krasjtester med dummyene/testdukker (dvs. mekaniske modeller)

Dummies (det er flere modeller Hybrid eller EuroSID for voksne og barn) er utstyrt med flere sensorer og fremlegger mekaniske bevegelseskurver (Figur 8). Disse krasjtestene hjelper å evaluere bildesign og beskyttelsessystemer for voksne og barn, for flere typer ulykker (frontal, side, bakfra). Hver bil er evaluert med standardtester med hensyn til sikkerhet. (Figur 7)



**Figur 7:** Eksempel av en førerbeskyttelsesvurdering i en frontal ulykke for et spesifikt bilmerke (kilde: EuroNCAP)

Disse tester hjelper å forbedre energiabsorberende og deformerbare strukturer og beskyttelsessystemer. Dummies er utviklet for å være mer og mer bio-representative med strukturer og materialer som oppfører seg så likt som mulig som menneskekroppen. (Figur 8)



**Figur 8:** Dummy (Kilde: EuroNCAP)

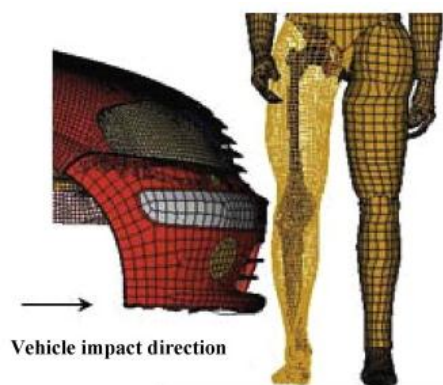
De siste dummyene er fotgjengere som tilsvarer barn og voksne. Siden 2009, er kriterier integrert i biltesten for å beskytte fotgjengere (EuroNCAP).

Fotgjenger-dummies er brukt til å evaluere fotgjengerbeskyttelse og for å forbedre de frontale delene av bilen. For å beregne den potensielle risikoen for skade, utføres kollisjonstester mot bilens frontparti, panseret, frontruten, pansersforkanten og støtfangeren.



#### (4) Numeriske modeller

Simulering av effekter ved hjelp av numeriske modeller inkludert mekaniske egenskaper av vev og bein. Finite Element (FE) modellene gir kunnskap for å forbedre beskyttelsessystemer for førere, passasjerer og fotgjengere/syklister og har potensial til å skape en mer omfattende forståelse av menneskekroppens bevegelse, skademekanismer og tåleevne (Figur 9).



**Figur 9:** Finite Element modell (Kilde: Mo, 2012)

## 2.2 Skadekriterier

### Det såkalte kriteriet: Abbreviated Injury Scale (AIS)

Vurdering av alvorlighetsgraden av hver skade er basert på en universell skala (Abbreviated Injury Scale, AIS) som beskriver 6 alvorlighetsgradsnivåer av en skade for hver kroppsregion. Alvorlighetsgrad 1 tilsvarer en småskade, 2 en moderatskade, mens 3, er alvorlig, 4 meget alvorlig og 5 kritisk; 6 er en skade der det finnes ingen tilgjengelig terapeutisk ressurs (f.eks. død). Hardt skadd er en fellesbetegnelse på meget alvorlig og alvorlig skadd.

AIS-skalaen endres regelmessig for å ta hensyn til de nye terapeutiske ressursene.

Denne skalaen er en effektiv måte å klassifisere skader og deres alvorlighetsgrad på, for å relatere dem til ulykkesomstendighetene. Men det gir ikke nok indikasjon om skadeassosiasjonen og konsekvensene, for eksempel, for en polytraumatisert person som likevel er viktig for å evaluere beskyttelsen av systemer (Roche-Cerasi, 1997). Det er hvorfor andre kriterier brukes som skadealvorlighetsskåret (Injury Severity Score, ISS) som beregnes ved å summere kvadratene av de tre høyeste AIS-skårene.

En MAIS verdi eller maksimal AIS representerer den høyeste AIS-verdien for en person som lider av flere skader.

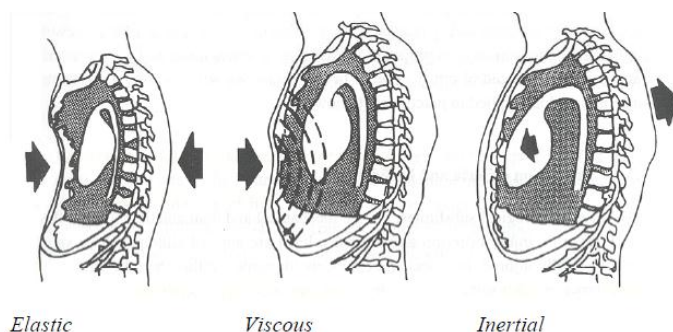
### Skademekanismer

Det finnes mange ulike skademekanismer for hver kroppregion. En skade oppstår hvis vev eller ben er deformert over den tolererte grensen. Over denne grensen, vises strukturelle og funksjonelle skader i vev og bein.

De viktigste mekanismene av skader er komprimering og spenning som overskrider den elastiske toleransen av kroppen; belastning som forårsaker mekaniske bølger og interne skader og overskrider



viskøsgrensen av kroppregion; inertiskademekanismer som forårsaker rivning av interne strukturer på grunn av inertieffekter. (RTO, 2007)



**Figur 10: Skademekanismer**

### Skadekriterier

Det er viktig at hver kroppsregion har et vel definert skadekriterium for å kunne evaluere menneskelig reaksjon til kollisjonskraft og effektiviteten til beskyttelsessystemene og kjøretøydesignet. Det som gjør det komplisert, er at disse systemene må beskytte alle trafikanter, alle typer organer og alle typer skader i alle typer ulykker.

Skadekriteriene representerer grensen for kroppsregions tåleevne og har vært historisk definert som en enkel verdi. Under denne verdien, vil mest sannsynlig en alvorlig skade ikke oppstå. For eksempel, er grenseverdien for hodeskadekriterium, 1000 (Head Injury Criterion, HIC). HIC gir skaderisiko og er definert som den standardisert maksimumsverdien av hodeakselerasjon og er også avhengig av tidsintervallet til akselerasjonen.

Andre kriterier er Nakkeskadekriterium (Neck Injury Criterion, NIC) for en frontal kollisjon og bestemmes av krefter på halsen og varigheten av disse kreftene.

Thorax-indeks (Thoracic Trauma Index, TTI) for en sidekollisjon er gjennomsnittet for maksimal akselerasjon av abdominal ryggraden (12 spinal segment) og den høyeste av de to verdiene for maksimal akselerasjonen av de øvre (8) og lavere (4th) ribbeina.

Viskøskriterium (Viscous Criterion, VC) er et kriterium for brystkassen og bestemmes av hastigheten til komprimering og thoraxdeformasjon.

Femur Force kriterium (FFC) bestemmes av komprimeringsspenningen på femur samt varigheten av komprimeringskraften som opptrer på femur. (Crash Analysis Criteria Description, 2005)

### Skadefaktorer

Skadegraden er en kombinasjon av tre typer faktorer; dvs. pre-krasj-, krasj- og post-krasj- faktorer (IRCOBI, 2006)

Pre-krasj-faktorer: kjønn, alder, høyde, vekt, Body Mass Index (BMI), eksisterende medisinske tilstander, biomekaniske toleranse, muskeltonus, mageinnholdet, blærevolum, alkohol, narkotika, klær, sitteposisjon i bilen, sitteholdning, belteposisjon, pre-krasj bremsing.

Krasj-faktorer: støtretning, hastighetsendring (delta V), maksimum kjøretøydeselerasjon, pulsvarighet, maksimum beltebelastning, holdning på maksimum beltebelastning, airbag interaksjoner, hjertet, belastning og varigheter, belastning bakfra, interaksjon med andre passasjerer.

Post-krasj-faktorer: alvorlighetsgraden av skader, kombinasjon av skader, responstid til ambulansetjeneste, riktig diagnose av skader, kvaliteten på behandlingen, resulterende funksjonshemninger.

Ikke alle disse faktorene er tilgjengelige i ulykkesdatabasene og biomekanikerne ønsker mer relevante ulykkesdata i framtiden fra politi og sykehus (IRCOBI, 2006).

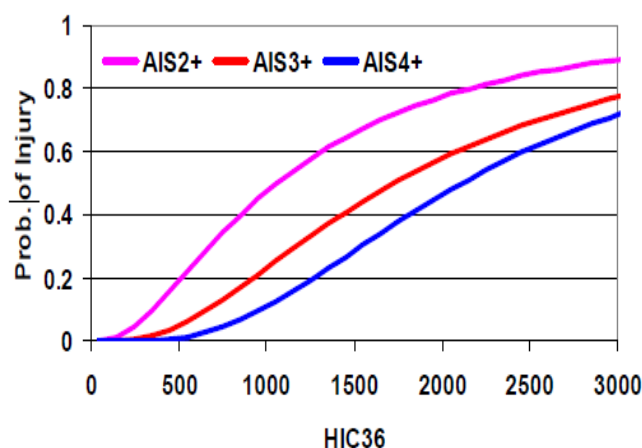
Variasjonen i befolkningen er viktig: For eksempel, beltet på en tykk person kan ikke være riktig posisjonert på hoftebenskammen og dette kan ha som konsekvens perforering av tarmen ved hypertrykk eller å rive mesenterium ved komprimering (Roche-Cerasi, 1997). Det er som for en liten kvinne som sitter nærme rattet og som kan være hardt skadet på brystkassen og hodet i en møteulykke. Beinstyrke og tåleevne til beinbrudd varierer også mye i befolkningen.

Krasj-faktorer som kollisjonskraften og dens varighet er viktige faktorer, men det er kombinasjonene av flere faktorer som fører til høyere eller lavere risikonivåer.

### Tåleevne

Kurver er lagt for hvert skadekriterium i forhold til sannsynlighetsverdiene av AIS. Tåleevnen representerer derfor et poeng på disse risikokurver. Et tolerert tåleevnenivå bestemmer tolererte alvorlighetsgrader av skader.

For eksempel angir en tolerert HIC verdi på 1000, tolererte sannsynligheter for alvorlige og meget alvorlige hodeskader (AIS = 3+ og 4+), og en høy sannsynlighet for moderat hodeskader (AIS = 2+) (Figur 11).



**Figur 11:** Sannsynligheten av skade vs. Head Injury Criterion (sidekollisjon, 36 ms) (NHTSA, 2004)

Dette viser at standardene for kjøretøydesign tolerer noen alvorlighetsgrader av skader og at flest av AIS3+ skader skjer under betingelser definert av standardene ved testing av kjøretøy.

Dette er også komplekst fordi det mangler kriteriumsverdier for grupper av befolkningen og flere kriterier for noen kroppsdelene, som magen og myke vev (Roche-Cerasi, 1997). For å kompensere disse manglende data, er matematiske ekstrapolasjonsprosedyrer brukt som løsning for å fremlegge tåleevnekurver for alle grupper av befolkningen (f.eks. for barn og for flere størrelser av menn og kvinner).

Som konklusjon, er det fremdeles mangel på kunnskap om variasjon i tåleevne i befolkningen og mangel av kriterier. Det er også viktig å notere at skadekriterietskurvene for hovedkroppsregion som er tilgjengelige representerer bare gjennomsnittkurven for befolkningen.

### 2.3 Førere og passasjerer

Førere og passasjerer er de som oftest er skadet i vegtrafikkulykker.

Teknologiløsninger for kjøretøy er utviklet med vurderingsprogrammer for å redusere disse skadene (New Car Assessment Programmes, NCAP).

Effektive mottiltak er for eksempel, sikkerhetsbelte, airbag, hodestøtte. Sikkerhetsbeltet er fremdeles det mest effektive beskyttelsessystemet (IRCOBI, 2006) ved å redusere fataliteter med 40 %. Flere liv kunne ha vært spart om alle førere bruker sikkerhetsbeltet. NHTSA vurderer at 2,500 liv hadde vært spart i USA med airbags i 2003 and 14,900 med sikkerhetsbeltet.

Møteulykker har testene vært vel utviklet og designet for å studere kompresjonen av biler under slike kollisjoner. Resultatet er at den frontale delen av bilen komprimeres i stedet for overlevelseshrommet i bilen for passasjerene. Utvikling av bilinteriør, nye materialer for tak og vinduer, og beskyttelsessystemer adaptert til personegenskaper og barn vil også redusere skader. Andre teknologier er lovende som unngår kollisjon med å ta bilkontroll (Collision Avoidance System eller Electronic Stability Control), oppmuntrer bruk av sikkerhetsbelte, tvinger fram respekt for fartsgrensen (ISA systemer), hindrer kjøring under påvirkning av rusmidler og bruk av mobiltelefon. Det mangler enda kunnskap om sikkerhetsfordeler med hensyn til interaksjon mellom førere og bilen. Kunnskap om hvordan mennesket tilpasser seg disse systemene er nødvendig, for å kunne optimere aksept og bruk av disse systemene.

For laterale ulykker, prosedyretester startet i 1997 og teknologiløsninger er fremdeles utviklet for å beskytte førere og passasjerer. Også ulykkesdata inneholder ikke ofte informasjon om posisjonene av personer i bilen; som er viktig for forskningen om sidekollisjon.

### 2.4 Fotgjengere

Fotgjengerskader ved en påkjørsel er avhengig av kjøretøyeenskaper, fysiologiske og biomekaniske faktorer til fotgjenger og krasj-faktorer. De mest alvorlige skadene for en fotgjenger er hode-, bryst- og lavere ekstremitetsskadene. Det er flere steder på bilen som forårsaker mer alvorlige skader enn andre, slik som frontruten og panserforkanten.

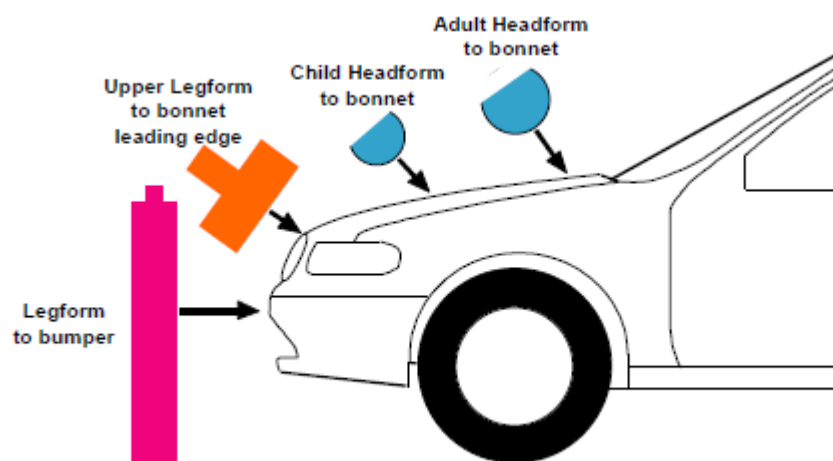
#### Kjøretøydesign

I alle land er fotgjengere og syklister sårbare trafikanter som er involvert i en betydelig andel av alvorlige bil-fotgjenger ulykker. Skadekildene er sammenstøt med veien og bilen. Sammenstøtet med bilen er ansvarlig for de mest alvorlige skadene (IRCOBI, 2006). Dette betyr at forbedringer av bildesign bør redusere andelen av alvorlige fotgjengerskader. Figur 12 viser et eksempel på fotgjenger kinematikk under et støt med en bil.



Figur 12: Fotgjenger kinematikk under et bil-fotgjenger støt (EU consultation, 2004)

For å utvikle mottiltak for å forbedre bildesign og å redusere skader blant fotgjengere og syklister, definerer Europakommisjonen kjøretøystandarder og testforhold for å bedre beskytte sårbare trafikanter. Men på grunn av kompleksiteten til kravene for bilprodusentene, ble en tofaset tilnærming fulgt med impaktorsystemer for ben og hode som representerer de fleste bil-fotgjenger støtene (Figur 13)

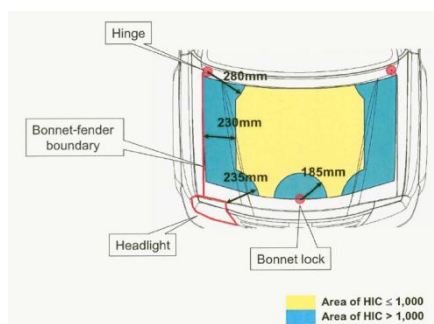


**Figur 13:** Impaktorsystemer for forgjengertestene (Lawrence, 2004)

Kravtestene for fotgjenger er basert på 40km/t. Kjøretøyets kollisjonsfart for disse fire typer støt og tåleevnekriterier er definert for ulike kroppsdeler som en HIC verdi på 1000 (det er fremdeles stor diskusjon rundt disse tester om kriteriumsverdiene). Utfordringene er å utvikle delsystemer som har bio-representative verktøyer for å evaluere risiko for fotgjengere. Noen prosedyrer kan ikke forutsi virkelige resultater og vise skademekanismer (for eksempel skader på hoften og øvre bein forårsaket av panseretsforkant). (EU concertation, 2004 og Kerrigan, 2008). Disse testforhold aksepterer en tolerert alvorlig skaderisiko men bør ikke føre til noen dødsfall ved kontakt med bilen.

I denne hastigheten er fatale skader hovedsakelig hodeskader og forårsakes av kontakten med veien eller bilen. Det mangler informasjon fra ulykkesdatabasene for å relatere skade til veien eller bilen. Hodeskaderisikoen knyttet til de ulike støtstedene på bilen, inkludert frontruten og dens ramme med hodeform støtstester, viste at alvorlighetsgraden av hodeskader er relatert til hodestøtsted og vinkel (Figur 14)

Sammenligninger mellom impaktorene og PMHS for å forutsi hodekinematikk viste forskjeller i kriteriene. (Kerrigan, 2012) Repeterbarheten av tester med dummies som fotgjengere er også lav. Sammenligninger mellom PMHS tester og trafikkulykke data viste likheter i muskelskader, men forskjeller i ryggradskader på grunn av PMHS gjennomsnittsalder, rigid kroppsposisjon og mangel av fysiologiske muskel tonisitet og bein robusthet (Kerrigan, 2008). Disse resultater viser at det er nødvendig med mer data og kunnskap om fotgjengerulykker for å forbedre prosedyretestene og bildesign.



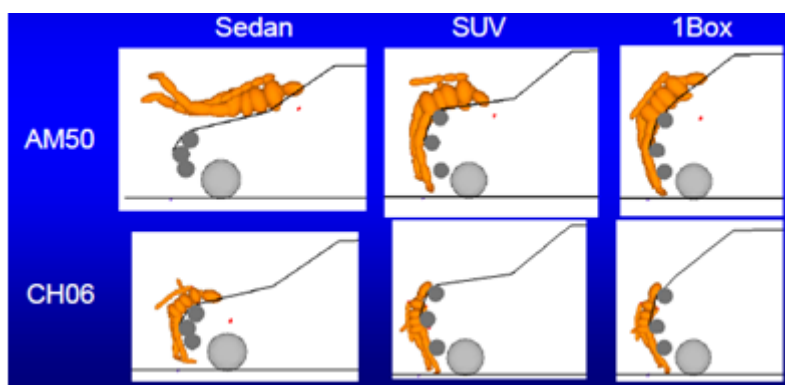
**Figur 14:** Påvirkning av støtsted på HIC verdier (JNCAP, EU consultation)

Selv om det er flere utfordringer knyttet til prosedyretestene, bør pågående forskningsutvikling føre til bedre frontal bildesign for å redusere fotgjengerskader. Andre tiltak som bremsesystemer bør også bidra til å redusere fotgjengerskaderisiko og kollisjoner.

### Alder

Variasjon i alder og modenhet av skjelettet har også en sterk påvirkning på tåleevne. Mangel på flere mekaniske egenskaper gjør evalueringen med dummies og numeriske modeller vanskelig. Likevel simuleringen av barn-bil ulykker viser flere typer kinematikker og alvorlighetsgrader av skader i forhold til typer av biler. (Figur 15).

Det er en stor mangel på informasjon om bilegenskaper i ulykkedatabasene, for å kunne studere hvordan bildesign påvirker fotgjengerskadene. Det mangler også informasjon fra sykehus om langvarige konsekvenser av ulykker for voksne og barn. Det er også lite informasjon om ulykker med barn som syklist.

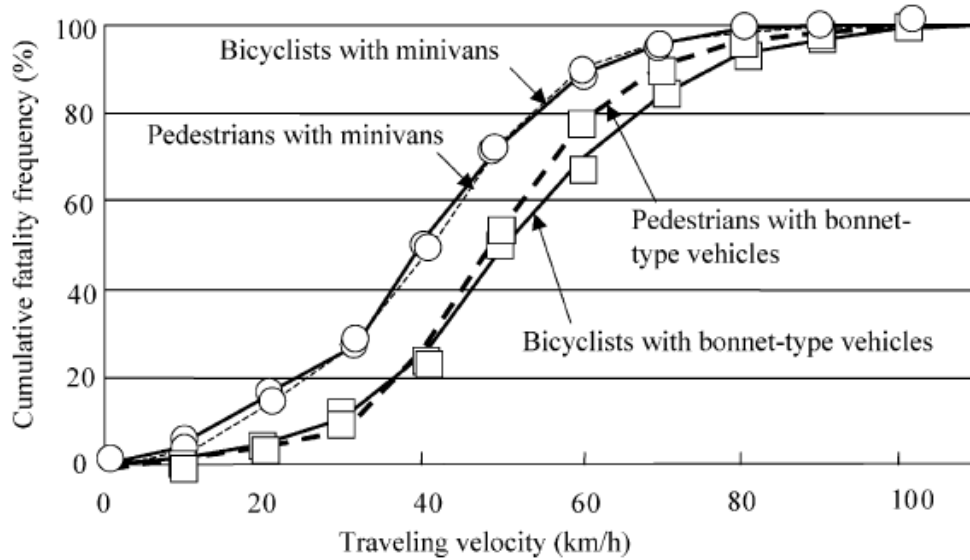


**Figur 15:** Aldersforskjell i kjøretøy-fotgjenger ulykker (IHRA/PS simulering, EU consultation, 2004)

## 2.5 Syklister

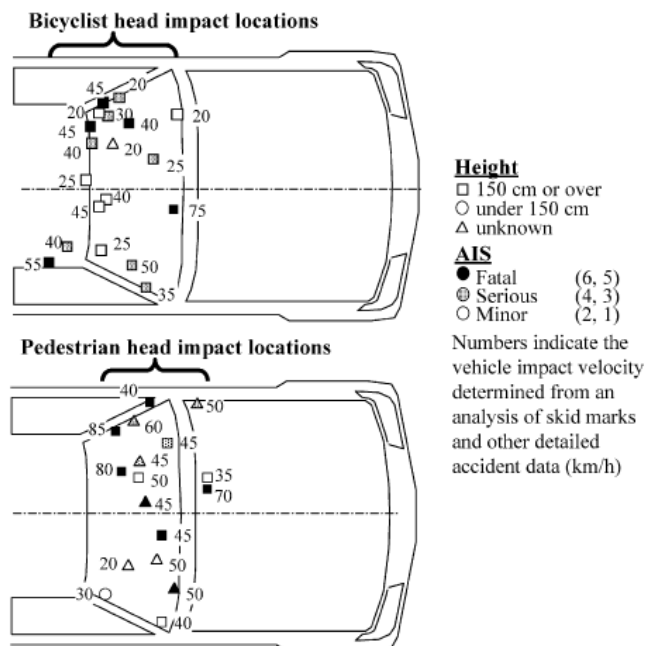
Syklistkinematikken under et sammenstøt med et kjøretøy er litt forskjellig fra kinematikken til en fotgjenger. Både trajektorie og atferd av fotgjengere og syklister under støt er selvfølgelig påvirket av formen på bilen. Kollisjonsposisjonen på bilen er også viktig og resultater fra Maki (2003) viser at et bildesign som er mest skadelig for en fotgjenger også er det for en syklist (Figur 16). Disse resultatene er basert på data som ikke synes å være korrigert for underrapportering av lette skade

(se seksjon 1.4), men underrapporteringen kan antas være lik for fotgjengere og syklister og dermed ikke påvirke konklusjonene.



**Figur 16:** Komparative analyse av kjøretøy-syklist og – fotgjengere ulykker i Japan (Maki, 2003)

Ulykkedata fra Japan viser de vanligste støtstedene for fotgjengere og syklister for flere typer kjøretøy (bil med panser og minivan). Figur 17 viser resultater for kjøretøy med panser og det ser ut at syklistene treffer frontruten eller taket men ikke panseret. Fotgjengere treffer A-pilarer, bakfra panseret og frontruterammen med hodet. Kontaktene med frontruterammen og A-pilarer skaffer alvorlige skader.



**Figur 17:** Alvorlighetsgrad av skader i forhold til støtposisjon for syklister og forgjengere (Maki, 2003)



Disse studiene viser at det er nødvendig å studere forskjellene og likhetene mellom ulykkene med fotgjengere og syklistene. Dette kan gi informasjon om faktorene som påvirker skadene med forskjellige typer av biler. Hodet er den mest sårbare delen for begge, fotgjengere og syklistene. Det skal være interessant å vite de langsiktige konsekvensene for sårbare trafikanter (f.eks kronisk hodepine) for alle AIS verdier; spesielt med tanke på funksjonshemming.

### 3 Konklusjon (ut fra et biomekanisk perspektiv)

Det biomekaniske perspektivet fokuserer på alle faktorer som påvirker alvorlighetsgraden av skader. For å identifisere alvorlighetsgrader og skademekanismer, foretrekker biomekanikere å bruke andre kriterier enn farten som er relatert til skademekanismer. Disse biomekaniske kriterier reflekterer den komplekse realiteten og er uansett korrelert til farten. Det er åpenbart at å senke fartsgrensen, reduserer også påvirkningen av alle faktorer.

For biomekanikerne, representerer ikke risikokurvene variasjonen i befolkningen, ulykker og faktorer med å glatte ut, på en måte, forskjellene og påvirkningene av faktorer. Likevel er det anerkjent som et viktig verktøy for politiske beslutninger siden de representerer den gjennomsnittlige risikoen på veien (Laumon, 2013).

Med hensyn til nullvisjon og det å unngå meget alvorlige og alvorlige skader for alle fotgjengere, må vi ta variabiliteten i befolkningen og ulykkene i betraktning.

Men hvilken fartsgrense bør velges for å sikre at ingen vil være hardt skadet i en ulykke?

Den Europeiske kommisjon anbefalte i 2011 ansvarlige myndigheter å innføre fartsgrenser på 30 km/t i boligområder og på alle veier i urbane områder med ett kjørefelt som ikke har separat sykkelfelt, med sikte på å beskytte myke trafikanter mer effektivt. Det er best å finne den minst risikofylte løsningen for hver lokalisering.

Utfordringen er at det mangler mange detaljerte ulykkesdata for å kartlegge skadeårsakene. Den Europeiske kommisjonen konkluderer at sammenlignbare data av høy kvalitet, som dekker alle trafikanter, inkludert syklistene og fotgjengere, er en forutsetning for en vellykket trafiksikkerhetspolitikk. Definisjonene av begrepene "kritisk skadd", "alvorlig skadet" og "lettere skadd" må også forklare med sikte på å gjøre sammenligninger av tiltak og deres betydning i de Europeiske landene.

Det er behov for dybdeanalyser av bilparken, skadene og årsakene. Det mangler også kunnskap om post-krasj-faktorer, funksjonsnedsettelsene og langvarige konsekvenser som funksjonshemming. Uten komplette data om skader og ulykker, er det vanskelig å etablere mottiltak som kan samtidig beskytte både yngre og eldre (IRCOBI, 2006). Betydningen av alder og endring i befolkningen på alvorlighetsgraden av skader må også studeres.



## Referanser

- Anderson, R.W.G., McLean, A.J., Farmer, M.J.B., Lee, B.H., Brooks, C.G., 1997. *Vehicle travel speeds and the incidence of fatal pedestrian crashes*. Accident Analysis and Prevention 29 (5), 667–674
- Ashton, S.J., 1980. *A preliminary assessment of the potential for pedestrian injury reduction through vehicle design*. In: 24th Stapp Car Crash Conference Warren-dale, Pennsylvania, pp. 607–635.
- Ashton, S.J., Pedder, J.B., Mackay, G.M., 1977. Pedestrian Injuries and the Car Exterior. SAE Technical Paper 770092.
- Berntman, M., Jonsson, T., Anund, A., Ekdahl, P., Menninga, H., 2012. *Dimensionerande körfältsbredder - Slutrapport*, Bulletin 271, Institutionen för Teknik och samhälle, LTH, Lund, Sweden
- Bång, K.L., Pezo-Silvano, A., 2012. *Utvärdering av nya hastighetsgränser i tätort - Slutrapport*, KTH, Stockholm, Sweden
- Chalandon, S., Serre, T., Masson, C., Minne, F., Arnoux, P.J., Perrin C., Borde, P., Cotte, C., Brunet, C., Cesari, D. *A comparative study between subsystem and global approaches for the pedestrian impact*. Paper Number 07-0429. NHTSA.
- Crash Analysis Criteria Description, 2005. *Arbeitskreis Messdatenverarbeitung Fahrzeugsicherheit*.
- Davis, G.A., 2001. *Relating Severity of Pedestrian Injury to Impact Speed in Vehicle–Pedestrian Crashes, Simple Threshold Model*. Transportation Research Record 1773, paper no. 01-0495.
- EU consultation, 2004. *Pedestrian protection feasibility study consultation – contributions*. EuroNCAP, <http://www.euroncap.com>
- Fredriksson, R., Rosén, E., Kullgren, A., 2010. *Priorities of pedestrian protection – areal-life study of severe injuries and car sources*. Accident Analysis and Prevention 42, 1672–1681.
- Gårder, P.E., 2004. *The impact of speed and other variables on pedestrian safety in Maine*. Accident Analysis and Prevention 36, 533–542.
- Hansen, G., Garrick, N.W., Ivan, J.N., Jonsson, T., 2007. *Variation in Free-Flow Speed due to Roadway Type and Roadside Environment*, Presented at the 86th Annual meeting of the Transportation Research Board, Washington DC, USA
- Hydén, C., Jonsson, T., Linderholm, L., Towliat, M., 2008. *Nya hastighetsgränser i tätort - Resultat av försök i några svenska kommuner*, Bulletin 240, Institutionen för Teknik och samhälle, LTH, Lund, Sweden
- Ivan, J.N., Jonsson, T., Borsos, A., 2012. *Motor Vehicle Speeds: Recommendations for Urban Sustainability*, Transportation Research Record 2301, Journal of the Transportation Research Board, Washington DC, USA
- Jonsson, T., 2013. *Safety Performance Models for Pedestrians and Bicyclists. Road Safety on Four Continents Conference*, Beijing, China.
- Kerrigan, J.R., Crandall, J.R., Deng, B., 2008. *A comparative analysis of the pedestrian injury risk predicted by mechanical impactors and post mortem human surrogates*. Stapp Car Crash. 52. 527-567.
- Kerrigan, J.R., Arregui-Dalmases, C., Foster, J., Crandall, J.R., Rizzo, A., 2012. *Pedestrian Injury Analysis: Field Data vs. Laboratory experiments*. IRCOBI conference 2012.

- Kröyer, HRG., Jonsson, T., Varhelyi, A., 2014. *Relative fatality risk curve to describe the effect of change in the impact speed on fatality risk of pedestrians struck by a motor vehicle*. Accident Analysis and Prevention 46, 143–152.
- Laumon, B., 2013. *Vitesse de déplacement et autres facteurs d'accident routier*
- Lawrence, G.J.L., Hardy, B.J., Carroll, J.A., Donaldson, W.M.S., Visvikis, C., and Peel, D.A., 2004. *A study on the feasibility of measures relating to the protection of pedestrians and other vulnerable road users – final report*. TRL June 2004.
- IRCOBI, 2006. Future research directions in injury. Biomechanics and Passive safety research.
- Maki, T., Kajzer, J., Mizuno, K., Sekine, Y., 2003. *Comparative analysis of vehicle–bicyclist and vehicle–pedestrian accidents in Japan*. Accident Analysis and Prevention 35 (2003) 927–940.
- Mo, F., Arnoux, P.J., Jure, J.J., Masson, C., 2012. *Injury tolerance of tibia for the car-pedestrian impact*. Accident, Analysis and Prevention. 46. 18-25.
- NHTSA, 2004. *Injury criteria for side impact dummie*.
- Pasanen, E., 1992. *Driving Speeds and Pedestrian Safety: A mathematical Model*. Helsinki University of Technology, Transport Engineering, Publication 77, Finland.
- Roche-Cerasi, I., 1997. *Abdominal injuries. Review of mechanisms and choc tolerance*. Rapport INRETS 9707.
- Rosén, E., Sander, U., 2009. *Pedestrian fatality risk as a function of car impact speed*. Accident Analysis and Prevention 41, 536–542.
- Rosén, E., Stigson, H., Sander, U., 2011. *Literature review of pedestrian fatality risk as a function of car impact speed*. Accident Analysis and Prevention 43, 25–33.
- RTO, 2007. *Methodology for protection of vehicle occupants against anti-vehicular landmine effects*.
- Teichgräber, W., 1983. *Die Bedeutung der Geschwindigkeit für die Verkehrssicherheit*. Zeitschrift für Verkehrssicherheit. 29, 2.
- Trafikverket, 2012. *Slutrapport - Utvärdering av nya hastighetsgränser i tätort*, Publikationsnummer 2012:135, Trafikverket, Borlänge, Sweden
- Walz, F.H., Hoefliger, M., Fehlmann, W., 1983. *Speed Limit Reduction from 60 to 50 km/h and Pedestrian Injuries*. SAE Technical Paper 831625.
- Yaksich, S.J., 1964. *Pedestrians with Milage: A Study of Elderly Pedestrian Accidents in St. Petersburg*, Florida. American Automobile Association, Washington, DC.

## Vedlegg



# Relative fatality risk curve to describe the effect of change in the impact speed on fatality risk of pedestrians struck by a motor vehicle



Höskuldur R.G. Kröyer<sup>a,\*</sup>, Thomas Jonsson<sup>b</sup>, András Várhelyi<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Department of Technology and Society, Lund University, Sweden

<sup>b</sup> Department of Civil and Transport Engineering, Norwegian University of Science and Technology, NTNU, Sweden

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 12 September 2012

Received in revised form 4 September 2013

Accepted 15 September 2013

### Keywords:

Fatality risk  
Relative fatality risk  
Pedestrian  
Impact speed

## ABSTRACT

Models describing the relation between impact speed and fatality risk for pedestrians struck by a motor vehicle have frequently been used by practitioners and scientists in applying an S curve to visualize the importance of speed for the chance of survival. Recent studies have suggested that these risk curves are biased and do not give representative risk values. These studies present new fatality risk curves that show much lower risks of fatality than before, which has caused confusion and misconceptions about how these new curves should be interpreted, and how this should affect speed management policy.

The aim here is to deepen the understanding of the implications this new knowledge has for urban speed policies by analyzing (1) what the most reliable knowledge is for this relation today and what limitations it has, (2) how these risk curves are interpreted today, and what limitations this interpretation has and (3) what the risk curves say about the importance of speed and speed changes. This paper proposes an additional tool, the relative fatality risk curve, to help prevent misconceptions.

The proposed relative risk ratios and curves show that, even though the most recent results indicate that the risk is lower than assumed by the older models, the fatality risk is still as sensitive to speed changes as before.

© 2013 Elsevier Ltd. All rights reserved.

## 1. Introduction

The probability of fatality for a pedestrian struck by a motorized vehicle is dependent on a complex relation of several factors such as impact speed (Davis, 2001; Kong and Yang, 2010; Richards, 2010; Rosén et al., 2009; Rosén and Sander, 2009; Tefft, 2011; Yaksich, 1964; Zhao et al., 2010), age of the pedestrian (Davis, 2001; Henary et al., 2006; Kim et al., 2010; Peng and Bongard, 1999; Rosén and Sander, 2009; Tay et al., 2011; Tefft, 2011) and vehicle type (Desapriya et al., 2010; Kim et al., 2010; Lefler and Gabler, 2004; Roudsari et al., 2004; Tay et al., 2011; Tefft, 2011). Several studies have presented the fatality risk as a function of impact speed, often presented as fatality risk curves (Anderson et al., 1997; Davis, 2001; Kong and Yang, 2010; Oh et al., 2008a,b; Pasanen, 1992; Richards, 2010; Rosén et al., 2009; Rosén and Sander, 2009; Tefft, 2011; Teichgräber, 1983). Three of these (Anderson et al., 1997; Pasanen, 1992; Teichgräber, 1983) are often cited by practitioners. The curves are often used to draw conclusions about what speeds are 'safe' in urban environments. Newer studies (Davis, 2001; Richards, 2010; Rosén and Sander, 2009; Rosén et al., 2011) have pointed out that the curves have

not been corrected for bias in the data material, resulting in over-estimation of the fatality risk. Simultaneously, new fatality risk curves have been presented (for example Davis, 2001; Richards, 2010; Rosén et al., 2009; Rosén and Sander, 2009; Tefft, 2011) that show lower fatality risk. This has led to a lot of confusion about the importance of speed for safety. The old interpretation was that this 'safe' speed, according to the older curves, was around 30 km/h, but according to the newer curves it is now higher, around 50 km/h (Rosén et al., 2011). Clearly an impact speed of 50 km/h is not a 'safe' speed for areas with pedestrians, and this is merely a misconception created by the manner in which the risk curve is presented. This misconception is so widespread, especially among practitioners, that it demands further explanation.

The aim of this paper is to deepen the understanding of the implications this new knowledge has for speed policies in urban settings by analyzing (1) what the most reliable knowledge is for this relation today and what limitations it has, (2) how the risk curves are interpreted today, and what limitations the interpretation has and (3) what the risk curves say about the importance of speed and speed changes. To visualize the importance of speed changes, an additional tool, the relative fatality risk curve, based on two of the most recent fatality risk curves (Rosén and Sander, 2009; Tefft, 2011), is proposed to prevent misconceptions and clarify what information the risk curves hold. This paper will only focus

\* Corresponding author. Tel.: +46 46 222 9198; fax: +46 46 222 9100.  
E-mail address: [hoskuldur.gudjonsson@tft.lth.se](mailto:hoskuldur.gudjonsson@tft.lth.se) (H.R.G. Kröyer).

on the safety perspective of the speed dilemma for urban speeds and mainly on the consequences when an accident has occurred; the accident risk is also related to speed (Nilsson, 2004; Elvik, 2009).

## 2. Method and data

### 2.1. Literature study

A literature search was performed to identify articles that created fatality risk curves for pedestrians struck by vehicles or presented raw data or risk values. The search was performed at TRID using the terms 'speed' and 'pedestrian'. If the title seemed relevant, then the abstract was viewed and relevant articles retrieved. The reference lists of the articles were checked for interesting articles and complementary searches were made in databases and Google for more specific topics. Each article was investigated with the focus on whether the results or data were biased, and/or if there were any factors that would cause representativity problems, their limitations and results. The details of the articles will not be presented here, since the goal was to identify which of them could be regarded as reflecting the best available current knowledge.

### 2.2. The mathematics behind the fatality risk curve and the relative fatality risk curve

Logistic regression is often applied to accident data material to estimate a fatality risk curve. The accident data material includes estimation of the impact speed, and the data is weighted (in the best cases) if the material is biased. This gives the fatality risk as a function of impact speed as shown in Eq. (1):

$$P_i(v) = \frac{1}{1 + \exp(-a - bv)} \quad (1)$$

where  $P_i(v)$  is the probability of fatality if struck at impact speed  $v$  and  $a$  and  $b$  are constants (Washington et al., 2011). This gives an S shaped risk curve, which can be used for estimating the relative risk ratio,  $R_i$ , as the fatality risk for two impact speeds, one base scenario (base speed) and one comparison scenario (comparison speed), and relating the risk of the comparison scenario to the risk of the base scenario, see Eq. (2) where  $R_i(v, dv)$  is the relative risk ratio. This ratio shows how the fatality risk will change from base speed  $v$  to comparison speed  $v + dv$ , and allows the creation of a relative fatality risk curve for all other speed values compared to a given base speed.

$$R_i(v, dv) = \frac{P_i(v + dv)}{P_i(v)} \quad (2)$$

The shape of the relative fatality risk curve is controlled by the shape of the fatality risk curve it builds on. It is therefore necessary to ascertain if the S shape of the fatality risk curve is a reasonable choice. In addition, the robustness of this relative curve has to be tested (i.e. how sensitive it is to changes in the fatality risk curve). Raw data material presented in Rosén and Sander (2009) is used as the basis for this test.

### 2.3. Data for the relative fatality risk curve

Two fatality risk curves are used as the base for constructing the relative fatality risk curve. They have been chosen because they are based on relatively recent accident data material with relatively high quality, collected by an investigation team sent to the accident location to collect the information necessary for accident reconstruction (Isenberg et al., 1998; Rosén and Sander, 2009). Both studies apply logistic regression, and weight the data against the bias created by outcome based sampling, to give representative results for the country.

Both studies include only accidents where the pedestrian was struck by the front of the vehicle and exclude cases where the pedestrian was sitting or lying on the ground prior to the impact. More detailed description of inclusion criteria is given separately for each study (for more detailed description of the data, see the referenced articles). The studies used are:

1. Rosén and Sander (2009): The accident material comes from the German in-Depth Accident Study (GIDAS) that was conducted in and near Dresden and Hannover. The data material includes accidents for the years 1999–2007, where pedestrians, excluding children aged 14 or younger, were struck by a passenger vehicle. It consists of 490 accidents, thereof 36 fatalities. The data material is weighted to be representative for the national accident statistics for Germany for the period 2003–2007.
2. Tefft (2011): The accident material comes from the Pedestrian Crash Data Study (PCDS) in the USA (Buffalo NY, Fort Lauderdale FL, Dallas TX, Chicago IL, Seattle WA, San Antonio TX) for the years 1994–1998. The data material concerns accidents involving pedestrians struck by passenger vehicles, pickups, vans and SUVs with a model year between 1989 and 1999; vehicles with any prior damage or modification of the frontal area of the vehicle were excluded. In addition, the material excludes all children 14 years or younger. It contains data on 422 accidents, thereof 66 fatalities. In 67 cases the impact speed is unknown and estimated through multiple imputations. The data material is weighted against the Fatality Analysis Reporting System (FARS) and General Estimates System (GES) 1994–1998 to be representative for the USA.

The two studies have somewhat different criteria for the vehicles to be included, which affects their results. Furthermore, the fatality rate from the national statistics varies. Rosén and Sander (2009) weight against the national fatality rate of 2.2%, while Tefft (2011) weights against the national fatality rate of 8.3%. This difference in fatality rate between the countries can be a result of different degrees of underreporting of non-fatal accidents, and different vehicle fleets or age distribution in the countries. It can also be consequences of accidents that occur in different speed environments, i.e. if a greater proportion of the accidents occur at higher speeds, then that would lead to a higher overall fatality rate even though the fatality risk curves would not necessarily differ. Rosén and Sander (2009) present a straightforward fatality risk function in their article. Tefft (2011), however, adjusts the risk for several confounding factors when estimating the fatality risk curve for the pedestrian accidents that occurred in the USA between 2007 and 2009 and presented it as a fatality risk curve. To get higher accuracy then, Tefft (2012) provided us with the values from his risk curve for different impact speeds in personal communication.

## 3. Results

The results section is divided into four parts: (1) the current risk curves available and their limitations (i.e. results from the literature review), (2) how the old curves were interpreted and why that is misleading, and what conclusions can be drawn from the change from the old to the new risk curves regarding the relation between impact speed and fatality risk, (3) the proposal of the relative risk curve based on the two datasets (Rosén and Sander, 2009; Tefft, 2011), and (4) the shape of the risk curve and the robustness of the relative risk curve.

### 3.1. The current available knowledge

Twenty-two fatality risk curves (or risk values for speed categories) based on 17 data materials were identified. Several of the



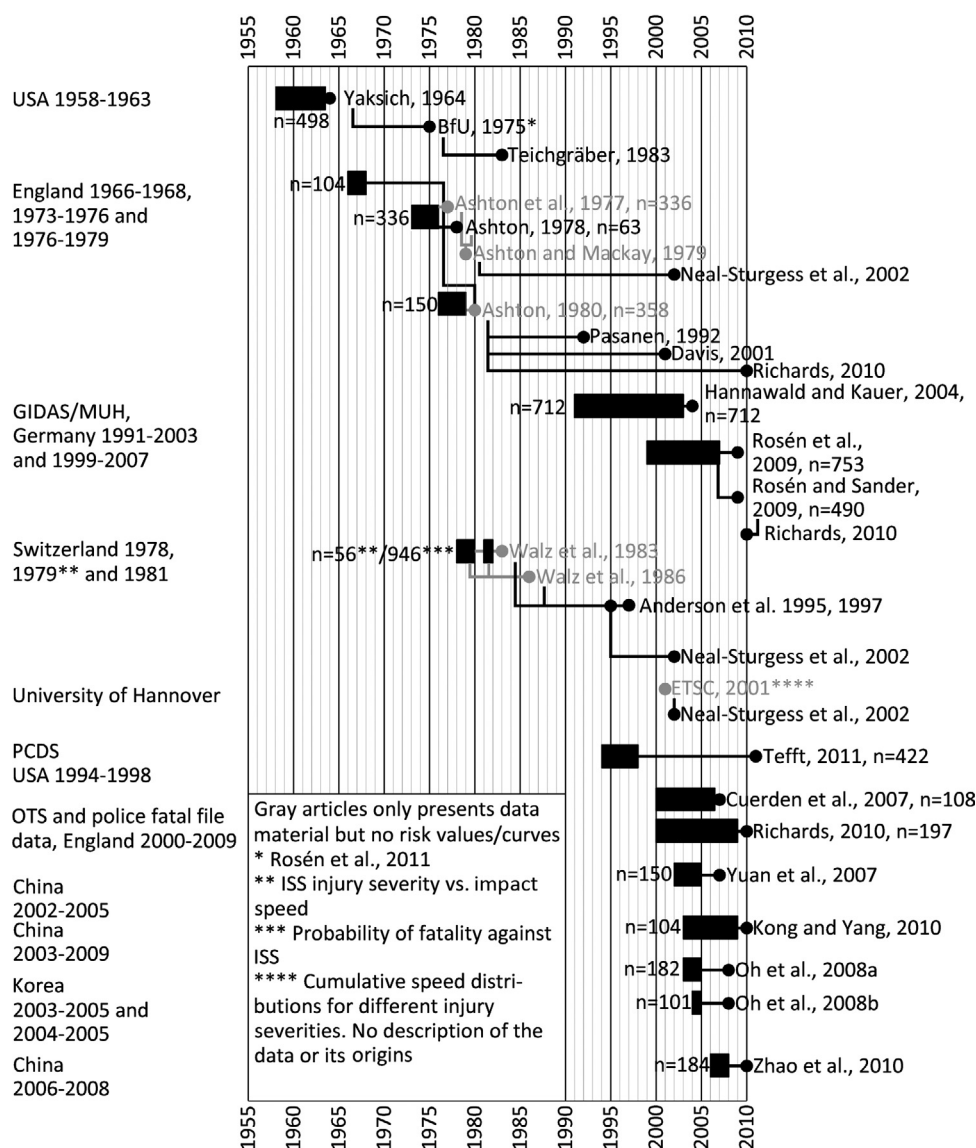


Fig. 1. Overview of the literature study.

studies only presented data material that was later used by others (Ashton and Mackay, 1979; Ashton et al., 1977; Walz et al., 1983, 1986). Fig. 1 gives an overview of the risk curves and the data material they were based on. Nine of those curves/studies were based on data that was not weighted against national accident statistics (Anderson et al., 1995, 1997; Cuerden et al., 2007; Neal-Sturgess et al., 2002; Oh et al., 2008a,b; Pasanen, 1992; Yuan et al., 2007; Zhao et al., 2010). Two were excluded due to that the data material was more than a 50 years old (Teichgräber, 1983; Yaksich, 1964). Two studies had to be excluded because the risk values were presented in speed or age categories (Ashton, 1978; Davis, 2001) and not as a continuous function for all ages combined. One risk curve was excluded for using AIS5-6, instead of survival, to estimate the curve (Hannawald and Kauer, 2004). Another was excluded due to the fact that there was no description of the data it was based on (Neal-Sturgess et al., 2002; ETSC, 2001). This left 5 studies with 6 fatality risk curves that had been weighted to be representative for their national statistics for that time period and based on on-scene collection of accident data (Richards, 2010; Rosén and Sander, 2009; Rosén et al., 2009; Tefft, 2011; Kong and Yang, 2010, the curve based on data from Rosén and Sander, 2009, presented by Richards (2010) was excluded due to similarities). All those curves are based

on sound methodology; however they have different strengths and weaknesses. Rosén and Sander (2009) have an extensive data material and does a thorough analyze of outliers and possible quality problems with the accident reports, they also include estimation of the confidence interval for the fatality risk curve. Their weaknesses (what is a weakness depends on how we plan to use these curves, this can also be considered strength in other conditions) are however that they exclude children, SVU and larger vehicles. Rosén et al. (2009) applies similar methodology however includes children and several types of larger vehicles and is thereby more descriptive for the whole accident population. That study is also based on larger data sample. Richards (2010, Ashton, 1980) includes all ages, however excludes several vehicle types. It has the weakness that it is based on old data material that can be suspected to influence the survival rate, furthermore Richards (2010, Ashton, 1980) is limited by that the impact speed of the data is divided into 10 km/h speed intervals (i.e. the 'precise' impact speed is not given). Richards (2010, On The Spot) includes all ages, and even though the data material is smaller than Rosén and Sander (2009) it includes higher number of fatal accidents. Richards (2010, On The Spot) also estimates a confidence interval for the risk curves. Kong and Yang includes several types of larger vehicles, however excludes

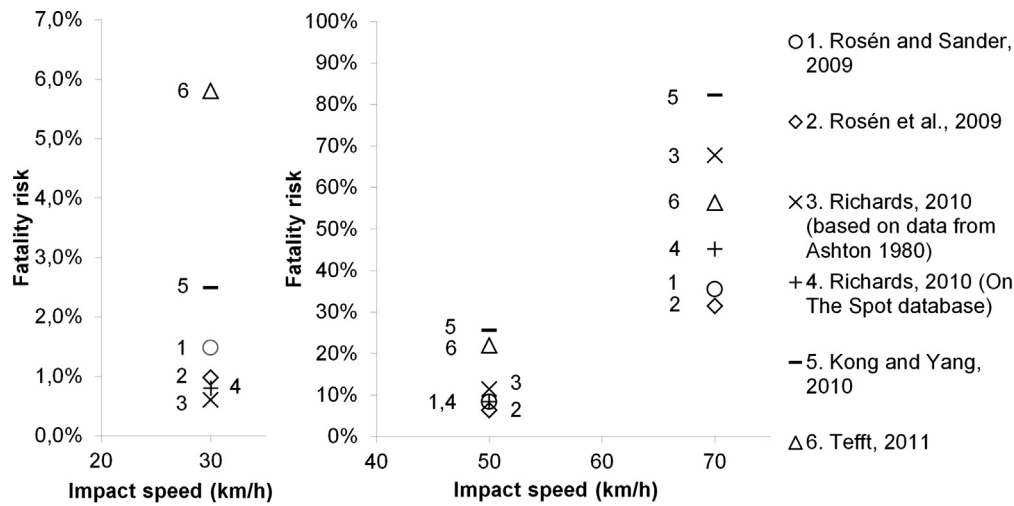


Fig. 2. The fatality risk estimation from the studies that fulfilled the criteria for the literature study.

children. They however suffer from low number of fatal accidents and very high fatality rate in the weighting process. Tefft (2011) has the strengths that he includes SUV and some larger vehicles. Further the study has a large number of fatal accidents, controls for confounding variables and estimates confidence intervals for the risk curve. The study however has the weakness that it excludes children, that the impact speed was missing in part of the accidents (estimated by multiple imputation) and that the data material is relatively old (he however partly corrects for that by standardizing the results with the accident population from 2007 to 2009).

Fig. 2 shows a comparison of the risk values of those 6 curves for three speeds, 30, 50 and 70 km/h. The fatality risk estimation of the fatality risk curves varies extensively. At 30 km/h the curves estimate the fatality risk to be between 0.6% (Richards, 2010, risk value estimated from figure) and 5.8% (Tefft, 2011). At 50 km/h the risk is estimated to be between 6.3% (Rosén et al., 2009) and 25.6% (Kong and Yang, 2010) and at 70 km/h between 31.4% (Rosén et al., 2009) and 82% (Kong and Yang, 2010). These differences might not seem to be great: at 30 km/h, 3 of the 6 studies show 'similar' risk values (0.6–1.0%); even though these 3 risk values are close to each other, they differ by 67%.

There are four aspects that affect the risk estimation (and therefore partly explain this variation in the fatality risk) and need to be acknowledged. First, the risk of fatality is strongly dependent on several factors, for example the age of the pedestrian (Davis, 2001) and the vehicle type (Lefler and Gabler, 2004). Since the fatality risk curves are estimated based on accident data from certain areas, the age distribution of the population and the dominating vehicle type within the study area will affect the outcome of the accidents included in the data material, thereby affecting the fatality risk based on that data material. This means that the fatality risk curve may vary considerably between countries and between locations due to different populations, i.e. the resulting fatality risk values are not wrong but rather valid for different populations. This can clearly be seen from the national fatality risks that were used as the basis for the weighting process. The four European data materials were weighted against 2.2% (Rosén and Sander, 2009; Rosén et al., 2009), 2.4% (Richards, 2010, On The Spot) and 3.5% (Richards, 2010; Ashton, 1980), while Tefft (2011) weights against 8.3%. Kong and Yang (2010) weights against 24.1% overall fatality risk, which is extremely high (Kong and Yang also present another curve that weights against the accident statistics for the region, i.e. 19.2%). This high overall fatality in the Chinese national statistics might be due to a high degree of underreporting of minor injuries (Kong and

Yang, 2010), or to generally higher impact speeds; vehicle designs are more 'un-friendly' to the pedestrian or the emergency service or hospital care is not as efficient in saving those who are injured.

Second, the inclusion strategy can and will affect the results. If certain vehicle types or age groups are excluded, this will have an effect on the risk curve, for example Rosén et al. (2009), by including children and SUV, minibus and vans in the data material, present a slightly less severe fatality risk curve compared to Rosén and Sander (2009). Davis (2001) also demonstrates how different the fatality risk curves are for adults and seniors. This will partly explain the differences of the 6 curves in Fig. 2, but Rosén et al. (2009), Richards (2010, on-the-spot database) and Richards (2010, Ashton, 1980) include children, while the others exclude children. Rosén et al. (2009), Richards (2010, on-the-spot), Kong and Yang (2010) and Tefft (2011) include SUV and/or some types of larger vehicles while Richards (2010, Ashton, 1980) and Rosén and Sander (2009) exclude some types of larger vehicles. Tefft's (2011) curve differs considerably from the other 5 curves at 30 km/h. Part of the explanation might be the vehicle types, but taking that into consideration reduces the risk to around 4.5% (Tefft, 2011), i.e. still 1.8 times higher compared to the highest of the other curves. These two issues and this difference should not be considered as problems, but rather explanations for why the risk estimation varies, and why a risk curve from one country cannot be blindly expected to be valid for other countries.

Third, the data quality (measurement error) and underreporting can lead to inaccurate estimation of the fatality risk. Kullgren and Lie (1998) and Rosén and Sander (2010) show that measurement error of the impact speed can have an effect on the fatality risk, especially resulting in underestimation of the fatality risk at higher speeds. Underreporting is also of concern. To make a correct estimation of the fatality risk, it is necessary to have knowledge of all fatal and all non-fatal accidents, otherwise the risk estimation will be inaccurate (usually resulting in overestimation of the fatality risk). It is well known that accident databases underrepresent non-fatal accidents (Ashton, 1978; Pfeiffer and Schmidt, 2006), which is partly corrected for by weighting the fatality risk curve against national statistics. However, the national accident statistics also suffer from underreporting of non-fatal accidents (Elvik and Mysen, 1999). This underreporting can be expected to result in overestimation of the fatality risk when the risk is low, but the extent of this overestimation diminishes as the fatality risk increases (the same principle applies for fatality risk curves based on data materials that overrepresented fatal accidents for other reasons). There is no



**Table 1**

The proportion of accidents at speeds below and above 60 and 65 km/h respectively in the two data bases analyzed.

	<60 km/h	≥60 km/h
Rosén and Sander (2009)	456 (93%)	34 (7%)
	<65 km/h	≥65 km/h
Tefft (2011)	392 (93%)	30 (7%)

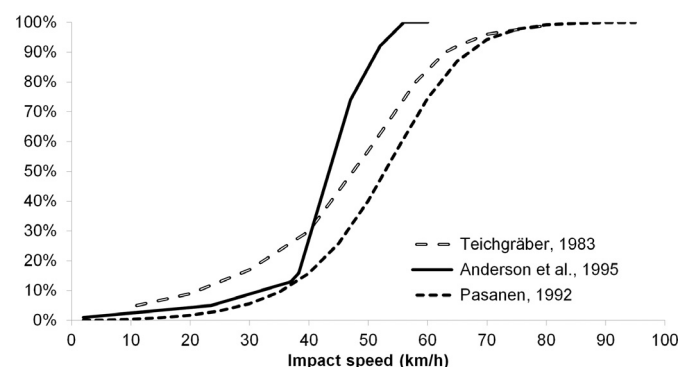
simple solution to this issue. Most important is to be aware of the limitations and take them into consideration when applying this tool, i.e. not assuming that the estimation of the fatality risk is the 'absolute truth', but rather an indication of how important speed is for survivability. This is especially important now that new risk curves with a lower degree of underreporting are emerging.

Fourth, the data on which the curves are based is sparse at higher impact speeds. The number of fatalities is influenced by three factors: exposure (the amount of travel or interaction), accident risk (risk per exposure of being involved in an accident) and consequence (if in an accident, what is the probability of fatality) (Nilsson, 2004). The fatality risk curve is meant to describe consequence while disregarding the other two factors. When analyzing accident data material for struck pedestrians, exposure is of great importance. There is usually little exposure (interaction) between pedestrians and cars at speeds above urban speed levels, resulting in relatively few accidents in those speed zones, i.e. most detailed accident data material suffers from including very few accidents at higher impact speeds, see Table 1. This means it is the lowest part of the fatality risk curve (usually well before the fatality risk curve reaches the steepest slope) that is based on the most extensive data, while at higher impact speeds it is only based on a 'handful' of accidents and this leads to higher uncertainty there. These issues should be kept in mind when interpreting and applying a fatality risk curve, which should be mainly used for urban speeds where it builds on extensive data.

### 3.2. Interpretation, misconceptions and changes in estimated fatality risk

Commonly, practitioners have applied three fatality risk curves, see Fig. 3 (Anderson et al., 1995, 1997; Pasanen, 1992, Teichgräber, 1983). They are presented as S curves that demonstrate the risk from 0 to 100% for the whole speed spectrum. The shape gives the visual impression that the curve can be divided into three zones. The first is a 'low' risk zone where the risk increases 'slowly' up till around 30 km/h. In the second zone, the risk seems to increase very rapidly until fatality is almost certain (at around 50–60 km/h). In the third zone, the risk increase levels off and reaches nearly 100%, see Fig. 3.

This has led to the common interpretation by practitioners that the second zone, with the steepest slope, is the most 'critical speed

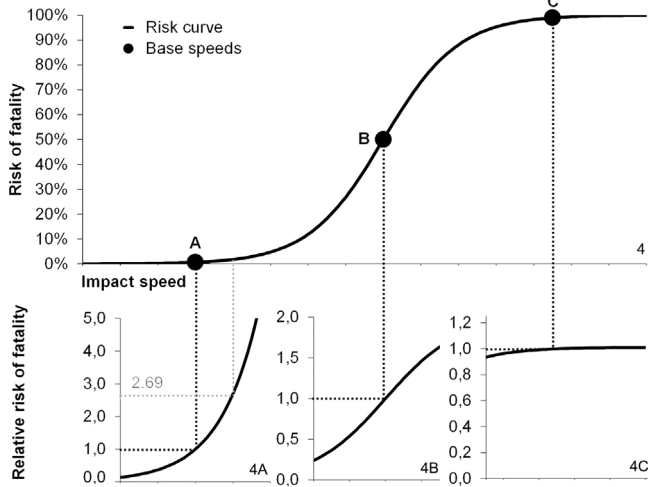


**Fig. 3.** Three fatality risk curves frequently applied by practitioners.

interval', i.e. it is in this speed interval that speed changes have the greatest effects on the fatality risk, while at lower speeds the effect of speed changes on the fatality risk is 'marginal'. This often leads to the conclusion that the 'optimum speed' for pedestrian environments is before this second zone starts, and that it can be used as a basis for supporting the introduction of certain speed limits. However, newer studies have criticized these three curves for using biased data material (for example Davis, 2001; Rosén and Sander, 2009), and instead presented new curves where this 'critical speed interval' starts at a much higher speed, around 50 km/h. If this older interpretation, with the 'critical speed interval', is valid for the new curves, it would suggest that there is little or nothing to be gained from lower speeds in urban areas. Since this is clearly not the case, it has caused a lot of confusion regarding how to interpret the new curves. This problem is in fact caused by naive interpretation of the information found in those curves. By simply zooming in on the first part of the curve (Rosén and Sander, 2009), zone one, it can be seen that the fatality risk increases exponentially even at low speeds, i.e. increased impact speed will result in an exponential increase in fatality risk.

Furthermore, there is a more fundamental issue at stake. If we say that changes in the curve, where zone 2 moves to higher speeds, should affect the accepted speeds, it implies that the goal is to maintain 'unchanged' fatality risk and number of fatalities and not to try and make traffic safer, and that safer traffic environments or better cars could be used to increase speeds instead of reducing the number of accidents. This way of thinking could lead to a new scenario (that is currently happening with the introduction of the new curves); where we have a curve A with optimum speed near 30 km/h, a new curve is now presented with much lower fatality risk than before, partly due to improvements but mostly because underreporting has been decreased (by weighting the older results). This shifts the optimum speed to 50 km/h and could therefore 'justify' higher speed limits according to this interpretation. This would both increase the number of accidents (Nilsson, 2004) and cause exponential increase in the risk of fatality for those who are involved in an accident. Is it acceptable to use what seem to be gains in safety, and the fact that we now know there are more minor injuries in relation to fatalities (the diminished underreporting means that there is the same number of fatalities, but that more non-fatal accidents are known), to increase the number of fatalities, just because the risk of fatality if struck is lower than previously believed? This aspect should be considered when interpreting recent fatality risk curves (for example Richards, 2010; Rosén et al., 2009; Rosén and Sander, 2009 or Tefft, 2011) and comparing them to older fatality risk curves (for example Anderson et al., 1997; Pasanen, 1992).

Even if we apply the best curves available, there is variation among these. If we consider the 6 curves presented in Fig. 2 and if there were 100 accidents at 30 km/h, then the most optimistic model would predict 1 fatality while the most pessimistic would predict 6 fatalities. For 50 km/h the numbers are 6 and 26 fatalities and for 70 km/h 31 and 82 fatalities. Even though this difference has a logical explanation, and does not prevent the use of information found in those curves, it creates difficulties if the goal is to determine some 'acceptable' risk level. How can we determine whether the fatality risk is 'acceptable' if the models suggest it is between 6.3% and 25.6% at 50 km/h? Therefore, it is questionable to try to determine certain speed limits based solely on absolute risk values derived from those curves. In fact, it is more interesting to analyze how changes in impact speed will affect the risk (according to the curves). If we now assume, to simplify, that the fatality risk is 70% at 80 km/h, 35% at 70 km/h, 4% at 40 km/h and 2% at 30 km/h (similar values from Rosén and Sander, 2009, are 57%, 35%, 3.6% and 1.5%), then speed reduction from 80 km/h to 70 km/h would result in a fatality risk reduction from 70% to 35%. A speed reduction from



**Fig. 4.** Relative fatality risk curves at different locations on the absolute fatality risk curve. (A), (B) and (C) represent different base speeds and (A)–(C) show the form of the respective relative fatality risk curves.

40 km/h to 30 km/h would result in a fatality risk reduction from 4% to 2%. If this curve was used as a visual tool (as before), then this would give the illusion that the prior speed change is more important, thereby leading to the common interpretation of the ‘critical speed interval’. However, if there were 100 fatal accidents (and several more non-fatal) that occurred at 80 km/h and if the speed had been 70 km/h instead of 80 km/h, then, according to the model, half of those who were killed would have survived, i.e. 50 lives would have been saved. If there were 100 fatal accidents (and several more non-fatal accidents) that occurred at 40 km/h and the speed was reduced to 30 km/h, it would give the same result: 50% of those who died would have survived resulting in 50 lives being saved. Hence, even though the fatality risk curve gives the illusion that the prior speed change is the more critical one, the speed changes are equally important for the number of fatalities. This is because it is the relative fatality risk ratio that determines how the number of fatal accidents will be affected by changes in impact speeds, and both scenarios have the same relative fatality risk ratio.

**3.3. Relative fatality risk curve**

Let us start by discussing the properties of the relative fatality risk curve, i.e. how it can be interpreted and its relation to the absolute fatality risk curve. Fig. 4 shows a fictional fatality risk curve where A, B and C represent three different base scenarios or base speeds. Fig. 4A–C contain the relative fatality risk curves for the

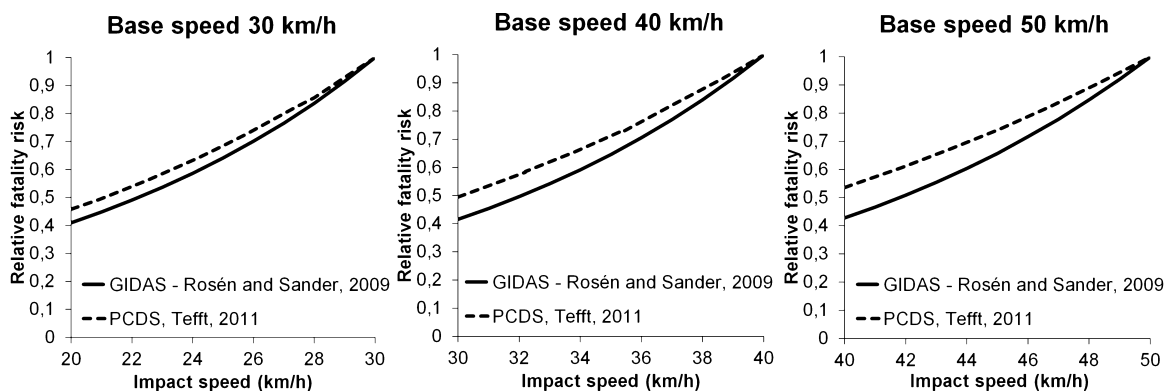
respective base speeds. To interpret the relative fatality risk curve, let’s say that at base speed A (30 km/h) the relative fatality risk is 1.0, and at 40 km/h the relative fatality risk is 2.69, which means that the risk of fatality would increase by 169% should the impact speed increase from 30 to 40 km/h. To give a numeric example, it means that if there are currently 10 fatal accidents that occur at 30 km/h, and if the speed in those accidents and in all non-fatal accidents that occurred at 30 km/h was 40 km/h, then the number of fatalities would be 27 (169% increase in the number of fatalities).

Fig. 4A–C demonstrate that both the size of the relative fatality risk value and the structure of the relative fatality risk function are dependent on the location of the base speed relative to the shape of the absolute fatality risk curve. At base speed A, the fatality risk is low, but the relative fatality risk ratios are high and increase exponentially (until the comparison speed reaches point B). Base speed B is located on the turning point of the relative fatality risk curve, see Fig. 4B; i.e. the rate of increase in the fatality risk will decrease as the comparison speed moves further away from the base speed. At base speed C, the fatality risk is already near 100% and there is no more space for the fatality risk to increase (if the fatality risk is 99% then it can only increase by 1%).

This means that the relative fatality risk will increase exponentially with small increases in speed when the base speed is located before the turning point of the fatality risk curve. According to the six fatality risk curves (Kong and Yang, 2010; Richards, 2010; Rosén et al., 2009; Rosén and Sander, 2009; Tefft, 2011) this turning point is located between 58 km/h (Kong and Yang, 2010) and 78 km/h (Rosén et al., 2009). The models suggest that an increase in urban speed levels will result in an exponential increase in the relative fatality risk and thereby in the fatality numbers; therefore, the shape of the upper part of the curve is not necessary for this study.

The relative fatality risk curves (based on real data) in Fig. 5 show that, for the base speed 30 km/h, a 10 km/h speed reduction results in a relative fatality risk ratio of 0.41 (GIDAS) and 0.46 (PCDS) compared to 1.0 at 30 km/h. Similarly, for the base speed 40 km/h, a 10 km/h speed reduction results in a relative fatality risk ratio of 0.42 (GIDAS) and 0.49 (PCDS) and for the base speed 50 km/h the relative ratios are 0.43 (GIDAS) and 0.54 (PCDS). This shows that a modest reduction (10 km/h) in impact speed has considerable effects on the relative fatality risk. However, the results vary somewhat for the two data sets (GIDAS and PCDS).

The relative fatality risk curves in Fig. 6 show that, for the base speed 30 km/h, a 10 km/h speed increase results in a relative fatality risk ratio of 2.02 (PCDS) and 2.41 (GIDAS) compared to 1.0 at 30 km/h. Similarly, for the base speed 40 km/h, a 10 km/h speed increase results in a relative fatality risk ratio of 1.87 (PCDS) and 2.34 (GIDAS). For base speed 50 km/h, the relative fatality risk ratio is 1.70 (PCDS) and 2.19 (GIDAS). This shows that a 10 km/h speed



**Fig. 5.** The lower part of the relative fatality risk curves for base speeds 30 km/h, 40 km/h and 50 km/h.

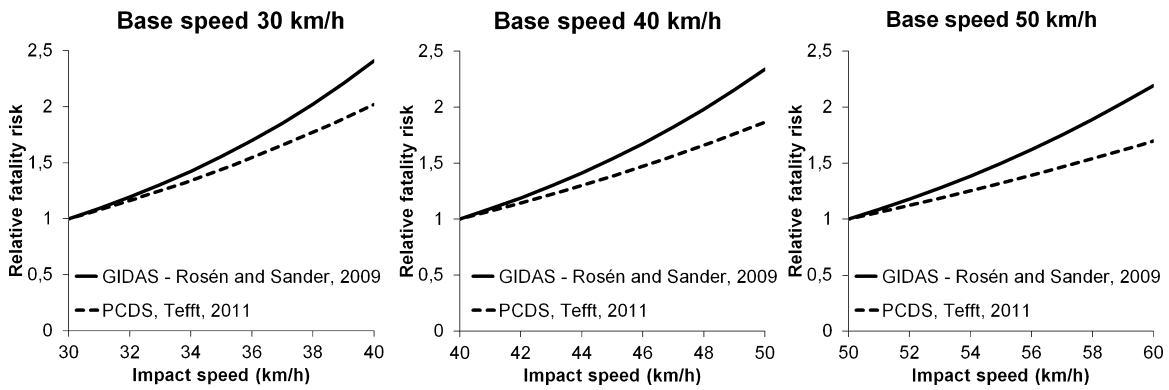


Fig. 6. The upper part of the relative fatality risk curves for base speeds 30 km/h, 40 km/h and 50 km/h.

increase will have a considerable effect on fatality risk. Furthermore, it shows that a 10 km/h speed increase has greater effect on the fatality risk than a 10 km/h decrease in speed. This is a consequence of the base speed being located before the turning point of the fatality risk curve (see point B in Fig. 4), i.e. the majority of the population will survive an accident at the base speed, but, as the speed increases, larger groups will surpass their tolerance speed for survival. Furthermore, even though the fatality risk curve in Tefft (2011) has higher estimation of fatality risk, it has lower relative fatality risk ratios, i.e. the relative fatality risk ratio and thereby the fatality risk is less affected by changes in impact speed.

Fig. 7 shows a comparison of the relative fatality risk ratios of the three base speeds. The base speed has only minor effects on the relative fatality risk, and changes in impact speed at low speeds have just as much effect on the fatality risk as changes in impact speed at higher speeds, contrary to the interpretation of the 'critical speed interval' of the absolute risk curve. In fact, the relative fatality risk is more sensitive to speed changes at lower base speeds compared to changes at higher base speeds. This further supports the notion that the fatality risk curve should be supplemented with the relative fatality risk curve to understand how fatality risk is dependent on impact speed. Nonetheless, it should be acknowledged that, from

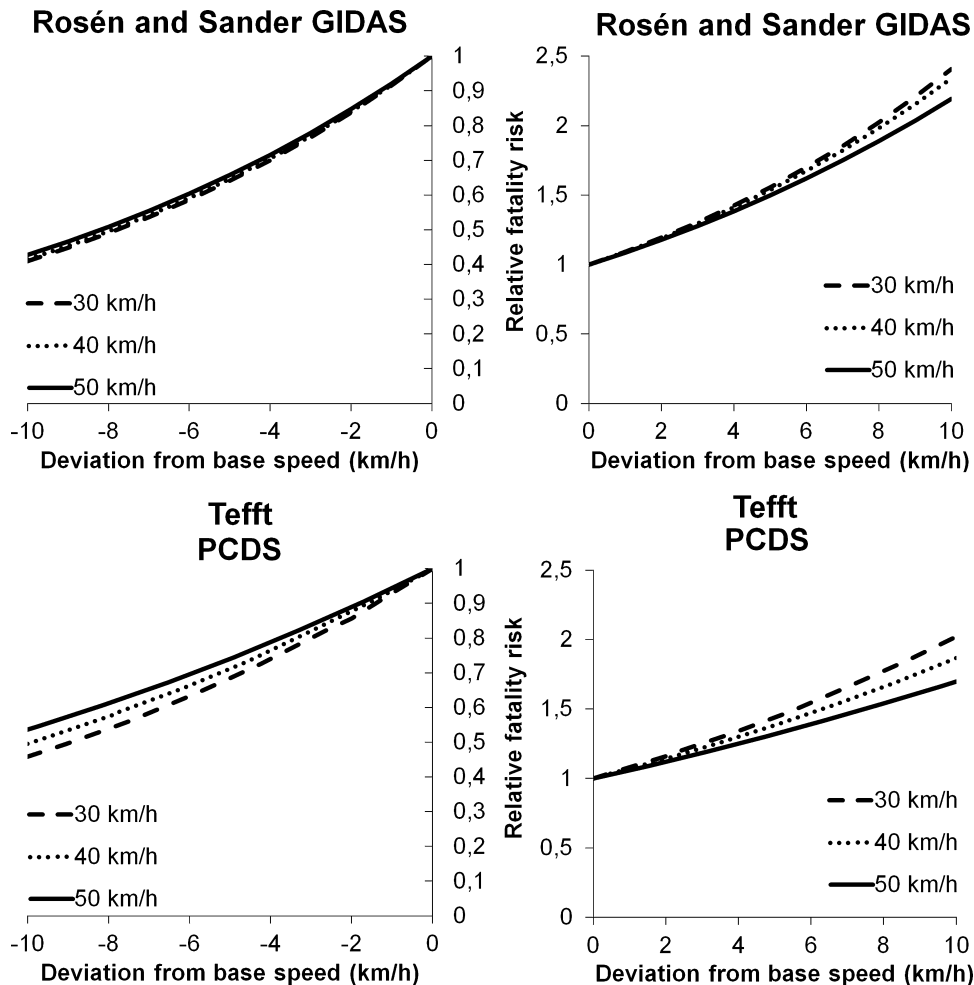


Fig. 7. Comparison of relative fatality risk curves for different base speeds.

**Table 2**  
Comparison of the relative fatality risk for different regression types (changes from logistic regression are within parentheses).

Base speed (km/h)	Relative risk ratios			
	Logistic regression model (LR)	Probit regression model (PR)	Exponential model	Power function model
30 → 20	0.451	0.367 (−19% <sup>a</sup> )	0.560 (+24%)	0.494 (+10%)
30 → 40	2.178	2.365 (+9%)	1.786 (−18%)	1.649 (−24%)
50 → 40	0.476	0.485 (+2%)	0.560 (+18%)	0.678 (+42%)
50 → 60	1.959	1.810 (−8%)	1.786 (−9%)	1.373 (−30%)

<sup>a</sup> (PR-LR)/LR.

a traffic safety perspective of speed management, it is also vital to consider what effect the speed will have on the crash risk.

### 3.4. Robustness and mathematical properties

The model is based on a fatality risk curve with an S shape, and the relative risk curve is heavily dependent on the form of the risk curve; therefore, the first question is whether that is a logical shape for these functions (or a linear or power function is more appropriate). Rosén and Sander (2009) present the raw data material in 10 km/h speed intervals, which allows the computation of the risk for each speed group. This data indicates that the lower part of the risk curve, at urban speeds ( $\leq 50$  km/h), might be linear (weighted  $R^2 = 0.761$ ), a power model ( $R^2 = 0.375$ ) or exponential ( $R^2 = 0.492$ , to estimate  $R^2$  for the power model and exponential, then the first and last speed group have to be excluded as the risk is null). Adding the risk values for higher speeds indicates that the shape is exponential ( $R^2 = 0.769$ ) rather than linear ( $R^2 = 0.54$ ) or power model ( $R^2 = 0.593$ ). Even though this study focuses on the lower part of the curve (i.e. urban speeds), and is therefore not so dependent on the upper part, the latter deserves some discussion. Let us set aside the fact that there are several factors that control whether an accident is fatal or not, and instead, for simplification, assume that the fatality risk is only dependent on the impact speed. Then each individual has his/her own impact speed threshold. If the speed is lower than this threshold, he/she will survive; if higher, he/she will die. If we now take a population with  $n$  persons and create a histogram of this survival threshold, the most logical form would be normal distribution, i.e. most individuals will have a threshold near the average threshold speed, while fewer would have a lower or higher threshold. Only a few exceptions would not survive a collision at very low speeds, or survive a collision at high speed. This would result in a fatality risk curve that is S-shaped. For the fatality risk curve to be linear, the group that has an exceptionally low threshold would have to be equal in size to the group that has an average threshold, for a power model or exponential models (without the S shape); then, as the threshold becomes higher, the groups will get bigger; i.e. the largest group will have the highest threshold and then no one would survive a higher speed than that. It must be considered likely that those who have the highest threshold are exceptions, and therefore some form of S curve is the logical choice. However, there is no sufficient data at high speeds to support or dismiss this theory or to determine if the S curve should be symmetrical. The upper turn might show different characteristics than the lower turn, or there might be locations on the fatality risk curve where the form is affected by different tolerance levels on different parts of the body, for example if the probability of severe chest injuries at impact speed differs from the probability of severe head injuries (Fredriksson et al., 2010 presents estimated injury risk curves for different body parts). This could lead to the fact that the actual form of the fatality risk curve is in fact not an S curve, but rather a curve with various speed zones where the fatality risk rises rapidly. This will have extensive effects on the relative fatality risk curve. For these reasons, both the absolute fatality risk curve and the relative fatality risk curve should be used with caution.

**Table 3**  
Comparison of the relative fatality risk for different risk curves.

Base speed (km/h)	Relative risk ratio (min/max)	Deviation from original model <sup>a</sup> (min/max)
30 → 20	0.303/0.556	−26%/+36%
30 → 40	1.779/3.264	−26%/+36%
50 → 40	0.318/0.572	−26%/+34%
50 → 60	1.302/2.823	−41%/+29%

<sup>a</sup> Original model based on Rosén and Sander (2009).

The second part of the robustness testing is how sensitive the relative fatality risk curve is to different regression types. Raw data from Rosén and Sander (2009) is used to perform binary logistic regression, binary probit regression and to estimate exponential and power function curves. Since we are working with relative risk ratios and are only using the results to compare the influence of different regression types then the regression does not need to be weighted for national accident statistics. From these, a relative fatality risk model is created for base speeds 30 and 50 km/h, and the relative ratios 10 km/h from the base speeds are compared to the logistic regression model. The results are that the relative ratios are fairly stable, especially for the first three models. There are, however, considerable differences (up to 42%) for the power function model, see Table 2. It ought to be added that Richards (2010) compared logistic regression to Bayesian regression, and found that there were only minor differences between them and that both showed an exponential increase in fatality risk at urban speeds.

The third part of the robustness testing is for how sensitive the relative fatality risk curve is to changes in the curve, and what studies they are based on (i.e. the fatality risk curve will vary between studies, time periods, different populations, etc.). To test this, all combinations of the logistic regression model of the intercept ( $-8.5$  to  $-5.3$ ) and  $B_1$  ( $0.06$ – $0.12$ ) (constant for speed) within the 95% confidence interval from Rosén and Sander (2009) are tested for the four scenarios as before. This gives the greatest relative difference of the relative risk curves compared to the original curve shown in Table 3. It is to be noted that those parameters can include very high or very low fatality risk, for 30 km/h from 0.1% to 15.4%, and for 50 km/h from 0.4% up to 66.8%, explaining why the difference in the relative risk can be up to around 41% for the worst scenario. The relative fatality risk curve is fairly robust despite the fact that the risk curves vary extensively.

## 4. Discussion

This article argues that the use of a fatality risk curve alone can lead to misconceptions regarding how speed changes affect the risk of fatality. It is hard to use the absolute fatality risk values or the shape of the fatality risk curve (as usually presented) as the sole basis for a good speed policy, first because the risk will vary between countries and between populations (Rosén and Sander, 2009; Tefft, 2011), and second because the ultimate goal should not be to maintain a steady fatality risk level. Reduced fatality risk or reduced underreporting of minor injuries should not be taken as an argument for increasing the speed, which in turn will result



in increased number of fatal accidents, just because the absolute risk for each individual seems to have decreased. Another issue is how changes in the fatality risk curve should be interpreted. It is important to consider that the more recent curves best describe the current situation, and that comparison between the absolute risk values of the new and old is irrelevant for the effects speed changes have on safety. If the new risk curve is to be used to change speed policy, then we will have to apply the relative risk curve proposed here on that risk curve to see (partly) what effects changes in speeds will have on the fatality risk. If we want to compare the importance of speed changes for the fatality risk between the older studies (Anderson et al., 1995, 1997, the most pessimistic risk curve of the three older ones) and the more recent studies (Rosén and Sander, 2009) then we can compare the relative risk ratios, it reveals that the relative risk ratio of a speed change from 30 to 40 km/h 'only' decreases from 3.2 to 2.4, i.e. not so extensive difference, which speaks against the importance of small speed changes for traffic safety. They both show that a small increase in speed has considerable effects on the fatality risk.

The relative fatality risk curve, combined with the fatality risk curve, clarifies the information found in both curves and partly helps to relax the misconception that speed changes are more important in the second zone of the curve (the steepest slope). In fact, it shows that the base speed chosen is not so relevant, and that the effect of speed change is very high at all speeds below the turning point of the risk curve, i.e., in urban settings, increased speed will result in an exponential increase in the number of fatality accidents. This also means that the speed environments that have the greatest number of fatal accidents will result in the greatest number of reduced fatal accidents when the speed is lowered. Lowering speed from 30 km/h to 22 km/h will result in a relative risk ratio of 0.5, while a speed reduction from 50 to 42 will result in a similar relative risk ratio (Rosén and Sander, 2009). In any case, there are so many fatal accidents at 50, that speed change downwards from 50 will save more lives than changes from 30.

The relative fatality risk curve is based on the fatality risk curve and is therefore susceptible to the same limitations as the fatality risk curve. (1) The risk is highly dependent on other factors, but it is not as extensively affected, due to its relative nature and the fact that it focuses solely on the changes in risk. (2) The same applies to the problem that the data is based on different populations. Both problems (1 and 2) will not lead to a wrong conclusion, but the curve will only apply to a certain population. (3) If the underreporting is similar for both the base speed and the comparison speed, it will not cause serious problems. The difference between the base speed and comparison speed should not be too great, though, because in that case the underreporting could differ, resulting in biased estimation (injury to pedestrians varies with impact speed, and therefore the underreporting will probably also vary with speed). The measurement error can have substantial effects on both the absolute and relative fatality risk curves. The same applies to uncertainty at higher speeds, where only a handful of accidents exist in this data material (this can be avoided by only focusing on urban speeds). These limitations will continue to exist and should not discourage us from using the information provided in the two types of curves. Furthermore, robustness testing has shown that the relative fatality risk curve is not so sensitive to either the regression type or to changes in the curve. This means that we may not know the actual fatality risk so precisely (and can expect it to change with more extensive and more detailed data). However, as shown here, the relative risk curve gives us a good idea of how important changes in impact speed are for the chance of survival.

This article is limited to the effects of the impact speed on the fatality risk of an accident. There are, however, several other aspects that are important when discussion appropriate speeds. The number of accidents and thereby the number of fatalities are highly

influenced by speed (Nilsson, 2004). The speed also influences the risk of severe injuries, travel time, sustainability, mobility, accessibility, subjective safety, exposure and social equity and justice. A speed policy (and changes of it) will therefore have fundamental consequences for the society, and all the factors need to be considered. Furthermore, the population is constantly changing and so are vehicle types and age of the population. The elderly are more likely to die in collisions at low speeds (Davis, 2001). Therefore, the absolute risk curve will change in the coming years, but the relative risk should remain fairly robust even in the event of such changes.

## 5. Concluding remarks

The main conclusions are:

1. The shapes of absolute fatality risk curves vary considerably from study to study, because they are based on different populations and for methodological reasons.
2. The absolute fatality risk curve as a visual tool (from 0 to 100% fatality risk) can lead to misconceptions regarding how speed changes at low speeds affect the fatality risk. They should therefore be complemented with relative fatality risk curves. Combined, they give a better impression of how impact speed affects fatality risk.
3. The absolute fatality risk curve does not allow for determination of a 'safe speed zone' that can be used for speed management policy. The relative fatality risk model demonstrates that the effects of speed changes on the fatality risk are similar for different base speeds at urban speed levels.
4. If an absolute fatality risk curve shows lower absolute fatality risk compared to another (older) absolute risk curve, it does not necessarily mean that the relative fatality risk is less sensitive to changes in impact speed.
5. The relative fatality risk model shows that a modest speed reduction/increase will have a considerable effect on the probability of fatality, and thereby on the number of fatal accidents at all urban speeds. The model indicates that, at urban speed levels, an increased impact speed will result in a significant increase of fatality risk, and therefore great caution should be exercised when considering speed increase.
6. Since the relative risk ratio is fairly stable at different base speeds, the greatest potential to reduce fatal accidents through speed reduction should be at those speeds where most of the fatal accidents occur.
7. To determine appropriate speeds, there are several other aspects that need to be considered, i.e. exposure, risk of accidents occurring, risk of severe injuries, travel time, sustainability, accessibility, subjective safety, mobility, social equity, etc.

## Acknowledgements

The authors would like to thank Erik Rosén and Brian Tefft for comments regarding their models, and for providing results from their models. The authors would also like to acknowledge the financial support of the Swedish Transport Administration, VINNOVA – The Swedish Governmental Agency for Innovation Systems and the Swedish Association of Local Authorities and Regions.

## References

- Anderson, R.W.G., McLean, A.J., Farmer, M.J.B., Lee, B.H., Brooks, C.G., 1995. Vehicle travel speeds and the incidence of fatal pedestrian crashes. In: 1995 International IRCOBI Conference on the Biomechanics of Impacts, Brunnen, Switzerland.
- Anderson, R.W.G., McLean, A.J., Farmer, M.J.B., Lee, B.H., Brooks, C.G., 1997. Vehicle travel speeds and the incidence of fatal pedestrian crashes. *Accident Analysis and Prevention* 29 (5), 667–674.

- Ashton, S.J., 1978. *Pedestrian Injuries and the Car Exterior*. Department of Transportation and Environmental Planning, University of Birmingham.
- Ashton, S.J., 1980. A preliminary assessment of the potential for pedestrian injury reduction through vehicle design. In: 24th Stapp Car Crash Conference Warrendale, Pennsylvania, pp. 607–635.
- Ashton, S.J., Mackay, G.M., 1979. Some characteristics of the population who suffer trauma as pedestrians when hit by cars and some resulting implications. In: 4th IRCOBI Conference, Gothenburg, Sweden.
- Ashton, S.J., Pedder, J.B., Mackay, G.M., 1977. *Pedestrian Injuries and the Car Exterior*. SAE Technical Paper 770092.
- Cuerden, R., Richards, D., Hill, J., 2007. Pedestrians and their survivability at different impact speeds. Paper number 07-0440. In: The 20th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV).
- Davis, G.A., 2001. Relating Severity of Pedestrian Injury to Impact Speed in Vehicle–Pedestrian Crashes, Simple Threshold Model. Transportation Research Record 1773, paper no. 01-0495.
- Desapriya, E., Subzwari, S., Sasges, D., Basic, A., Alidina, A., Turcotte, K., Pike, I., 2010. Do Light Truck Vehicles (LTV) impose greater risk of pedestrian injury than passenger cars? A Meta-analysis and systematic review. *Traffic Injury Prevention* 11 (1), 48–56.
- Elvik, R., 2009. The Power model of the relationship between speed and road safety. Update and new analyses. TØI report 1034/2009. Institute of Transport Economics, Oslo, Norway.
- Elvik, R., Mysen, A.B., 1999. Incomplete Accident Reporting, Meta-Analysis of Studies Made in 13 Countries. Transportation Research Record 1665, Paper No. 99-0047.
- ETSC, 2001. Priorities for EU motor vehicle safety design. European Transport Safety Council, Brussels.
- Fredriksson, R., Rosén, E., Kullgren, A., 2010. Priorities of pedestrian protection – a real-life study of severe injuries and car sources. *Accident Analysis and Prevention* 42, 1672–1681.
- Hannawald, L., Kauer, F., 2004. ACEA Equal Effectiveness Study. Technische Universität Dresden.
- Henary, B.Y., Ivarsson, J., Crandall, J.R., 2006. The influence of age on the morbidity and mortality of pedestrian victims. *Traffic Injury Prevention* 7 (2), 182–190.
- Isenberg, R.A., Chidester, A.B., Mavros, S., 1998. Update on the pedestrian crash data study. Paper number 98-S6-O-05. In: 16th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), Canada, May 31–June 4.
- Kim, J., Ulfarsson, G.F., Shankar, V.N., Mannering, F.L., 2010. A note on modeling pedestrian–injury severity in motor–vehicle crashes with the mixed logit model. *Accident Analysis and Prevention* 42, 1751–1758.
- Kong, C., Yang, J., 2010. Logistic regression analysis of pedestrian casualty risk in passenger vehicle collisions in China. *Accident Analysis and Prevention* 42, 987–993.
- Kullgren, A., Lie, A., 1998. Vehicle collision accident data – validity and reliability. *Journal of Traffic Medicine* 26 (3/4).
- Lefler, D.E., Gabler, H.C., 2004. The fatality and injury risk of light truck impacts with pedestrians in the United States. *Accident Analysis and Prevention* 36, 295–304.
- Neal-Sturgess, C.E., Coley, G., De Oliveira, P., 2002. Pedestrian injuries: effects of impact speed and contact stiffness. In: IMechE Vehicle Safety 2002, London.
- Nilsson, 2004. Traffic Safety Dimensions and the Power Model to Describe the Effect of Speed on Safety. Lund Institute of Technology and Society, Traffic Engineering.
- Oh, C., Kang, Y.S., Youn, Y., Konosu, A., 2008a. Development of probabilistic pedestrian fatality model for characterizing pedestrian–vehicle collisions. *International Journal of Automotive Technology* 9 (2), 191–196.
- Oh, C., Kang, Y.S., Wonkyu, K., 2008b. Assessing the safety benefits of an advanced vehicular technology for protecting pedestrians. *Accident Analysis and Prevention* 40, 935–942.
- Pasanen, E., 1992. *Driving Speeds and Pedestrian Safety: A mathematical Model*. Helsinki University of Technology, Transport Engineering, Publication 77, Finland.
- Peng, R.Y., Bongard, F.S., 1999. Pedestrian versus motor vehicle accidents: an analysis of 5000 patients. *Journal of the American College of Surgeons* 189 (4), 343–348.
- Pfeiffer, M., Schmidt, J., 2006. Statistical and methodological foundation of the GIDAS Accident Survey System. In: Reports on the ESAR-Conference on 1st/2nd September 2006 at Hannover Medical School, Germany.
- Richards, D.C., 2010. Road Safety Web Publication No. 16, Relationship between Speed and Risk of Fatal Injury: Pedestrians and Car Occupants. Transport Research Laboratory, Department for Transport, London.
- Rosén, E., Sander, U., 2009. Pedestrian fatality risk as a function of car impact speed. *Accident Analysis and Prevention* 41, 536–542.
- Rosén, E., Sander, U., 2010. Influence of impact speed estimation errors on pedestrian fatality risk curves. In: 4th International Conference ESAR Expert Symposium on Accident Research, Germany.
- Rosén, E., Källhammer, J.E., Eriksson, D., Nentwich, M., Fredriksson, R., Smith, K., 2009. Pedestrian injury mitigation by autonomous braking. In: Paper number 09-0132, 21st International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), Germany, June 15–18.
- Rosén, E., Stigson, H., Sander, U., 2011. Literature review of pedestrian fatality risk as a function of car impact speed. *Accident Analysis and Prevention* 43, 25–33.
- Roudsari, B.S., Mock, C.N., Kaufman, R., Grossman, D., Henary, B.Y., Crandall, J., 2004. Pedestrian crashes: higher injury severity and mortality rate for light truck vehicles compared with passenger vehicles. *Injury Prevention* 10, 154–158.
- Tay, R., Choi, J., Kattan, L., Khan, A., 2011. A Multinomial logit model of pedestrian–vehicle crash severity. *International Journal of Sustainable Transportation* 5 (4), 233–249.
- Tefft, B., 2011. Impact Speed and a Pedestrian's Risk of Severe Injury or Death. AAA Foundation for Traffic Safety, Washington, DC.
- Tefft, B., 2012. Personal communication.
- Teichgräber, W., 1983. Die Bedeutung der Geschwindigkeit für die Verkehrssicherheit. *Zeitschrift für Verkehrssicherheit* 29, 2.
- Walz, F.H., Hoeffliger, M., Fehlmann, W., 1983. Speed Limit Reduction from 60 to 50 km/h and Pedestrian Injuries. SAE Technical Paper 831625.
- Walz, F.H., Niederer, P., Kaeser, R., 1986. The car–pedestrian collision, injury reduction, accident reconstruction, mathematical and experimental simulation, head injuries in two wheeler collisions. In: Interdisciplinary Working Group for Accident Mechanics, University of Zurich and Swiss Federal Institute of Technology.
- Washington, S.P., Karlaftis, M.G., Mannering, F.L., 2011. *Statistical and Econometric Methods for Transportation Data Analysis*, 2nd ed. Chapman & Hall/CRC, USA.
- Yaksich, S., 1964. Pedestrians with Mileage, a Study of Elderly Pedestrian Accidents in St. Petersburg, Florida. American Automobile Association, Washington, DC.
- Yuan, Q., Li, Y., Zhou, Q., 2007. Statistical analysis of pedestrian–vehicle impact characteristics of passenger–car–to–pedestrian accidents in Beijing China. *International Journal of Vehicle Safety* 2 (3).
- Zhao, H., Yin, Z., Chen, R., Chen, H., Song, C., Yang, G., Wang, Z., 2010. Investigation of 184 passenger car–pedestrian accidents. *International Journal of Crashworthiness* 15 (3), 313–320.



Teknologi for et bedre samfunn

[www.sintef.no](http://www.sintef.no)