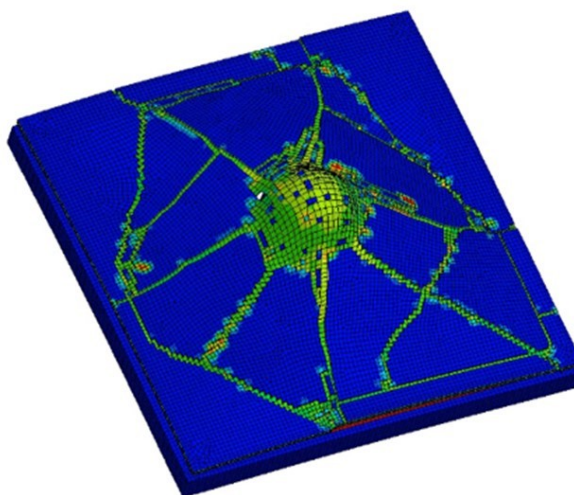
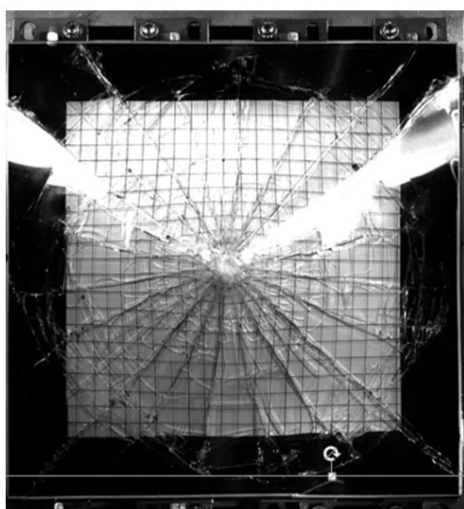


# CompMethGlass-II

Beräkningsmetoder för laminerat glas i krocksituationer: Speciellt materialmodellering för PVB-skiktet, samt brottmodellering av glas i anslutning till limfogar



Författare: Kjell Mattiasson  
Datum: 2019-04-25  
Projekt inom Trafiksäkerhet och automatiserade fordon

**FFI** Fordonsstrategisk  
Forskning och  
Innovation

VINNOVA

Energimyndigheten

TRAFIKVERKET

FKG

VOLVO

SCANIA

VOLVO

SCANIA

VOLVO

SCANIA

VOLVO

SCANIA

VOLVO

SCANIA

VOLVO

SCANIA

VOLVO

SCANIA

VOLVO

# Innehållsförteckning

|   |          |
|---|----------|
| <b>1 Sammanfattning .....</b>                       | <b>3</b> |
| <b>2 Executive summary in English.....</b>          | <b>3</b> |
| <b>3 Bakgrund.....</b>                              | <b>5</b> |
| <b>4 Syfte, forskningsfrågor och metod .....</b>    | <b>6</b> |
| <b>5 Mål .....</b>                                  | <b>8</b> |
| <b>6 Resultat och måluppfyllelse .....</b>          | <b>8</b> |
| <b>7 Spridning och publicering .....</b>            | <b>9</b> |
| 7.1 Kunskaps- och resultatspridning .....           | 9        |
| 7.2 Publikationer.....                              | 9        |
| <b>8 Slutsatser och fortsatt forskning .....</b>    | <b>9</b> |
| <b>9 Deltagande parter och kontaktpersoner.....</b> | <b>9</b> |

## Kort om FFI

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

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

# 1 Sammanfattning

Betydelsen av hållfastheten hos vindrutor och glastak för bilens krockegenskaper ökar allt eftersom dessa glasytor tenderar att bli större och större i nya bilmodeller. Det är därför av högsta vikt att responsen hos laminerat glas kan simuleras med hög noggrannhet i samband med krockanalyser. De modeller, som har använts inom bilindustrin fram till nu har varit mycket rudimentära och uppfyller inte dagens krav på noggrannhet.

Förutom inverkan av vindrutans hållfasthetsegenskaper på karossens totala respons vid krock, har också vindrutans egenskaper stor inverkan på kraftnivåerna vid huvudislag. Dessa kan ske utifrån, som vid påkörning av fotgängare, eller inifrån, då förare eller passagerare får närkontakt med vindrutan vid krock. Det är därför av lika stor vikt att även dessa lastfall kan simuleras med hög noggrannhet.

Ett projekt med ovanstående målsättning har nyligen genomförts (finansiering genom bl a Vinnova-SAFER) och avslutades i november 2016. Projektet innefattade hela 14 partners, både Svenska och utländska. Bland andra deltog både Chalmers och Volvo Cars. Projektet var i många avseenden framgångsrikt och resultaten håller nu på att implementeras hos de deltagande industriföretagen.

På grund av resursbrist återstår emellertid framför allt två problemområden att lösa. Det första gäller materialmodellering för det ingående PVB-skiktet, vilket har stor betydelse för laminatets egenskaper. Detta material har ur modelleringssynpunkt ett antal mycket obehagliga egenskaper. Bland annat är materialets egenskaper extremt beroende av töjningshastigheten. Från det tidigare projektet kunde slutsatsen dras att ingen existerande materialmodell klarar av att simulera PVB-materialets respons på ett tillfredsställande sätt. Det andra problemområdet gäller simulering av den komplexa brottmod, som i vissa fall kan observeras i anslutning mellan vindrutan och limfogen och som kan uppstå i samband med stora krafter i vindrutans plan.

Det tilltänkta projektet avser att fokusera på ovan nämnda två problemområden.

## 2 Executive summary in English

The current trend in upper structure automotive design goes towards a larger portion of glass: larger windscreens, slimmer pillars and roof glazing. This is caused by increasing demands and requirements from the customers, both aesthetic (appearance and design) and practical (e.g. improved vision around the car). In current (and future) design, the importance of the properties of laminated safety glass – the glass used in cars – and of the way it is attached (glued) to the car body has increased significantly since it has a large impact on the overall deformation behaviour of the upper body structure. Furthermore, there are direct legal and rating requirements on e.g. windscreen retention (minimum requirement on how much of the windscreen must remain attached to the car after a crash) and on performance under pedestrian head impact.

Although much progress has been seen in the area of material modelling for crash Computer Aided Engineering (CAE) in the last decades, the efforts have mainly been concentrated on steel and other metals. Due to the increasing importance of glass properties for the overall behaviour of a car in a crash, it is at this stage crucial for the automotive industry to develop improved models for laminated safety glass and the windscreen adhesive. To be more specific, having accurate models to handle the laminated safety glass and the adhesive utilised for its attachment has become an absolute necessity to enable accurate predictions of the behaviour of future car concepts in virtual finite element simulations of a crash.

The glass of a windshield is a brittle material, which is basically linear elastic up to the point of failure. Usually, a simple failure criterion in the form of a critical stress or a critical strain is used. It has, however, been found that all phenomena observed in connection to impact on a windshield cannot be captured with such a simple model. Because of the behaviour of glass, the windscreen will inevitably fracture if being subjected to large deformations. When this happens the properties will more or less instantaneously change, having a significant influence on the entire car body deformation. It is therefore crucial that the numerical models can handle fracture and crack propagation in a realistic way.

The behaviour of the PVB material is very complex, including a strong dependency on strain rate and temperature. The same is valid for the PU adhesives used for attaching the windshield to the vehicle, further complicating the development of a complete numerical model. In this project the focus will be on developing a material model that correctly describes the behavior for both small and large strains.

In a previous project, here denoted CMG-I, with the aim of developing methods and models for simulating the response of laminated glass in impact situations, the following six research questions were identified:

- FE-modelling of a lamina
- Modelling of the response of a lamina after the glass has broken
- Modelling of the PVB material
- FE-modelling of an adhesive connection between the windshield and the car body
- Modelling of the adhesive material
- Modelling of failure in the windshield in the vicinity of the adhesive connection

Due to lack of time and resources, all the research questions above could not be solved within the CMG-I project. The remaining questions were "Modelling of the PVB material" and "Modelling of failure in the windshield in the vicinity of the adhesive connection". The purpose of the current project (CMG-II) was therefore to find solutions for these issues.

As mentioned above, the behaviour of the PVB material is quite complicated, including strong dependency on strain rate and temperature. The role and action of the PVB layer changes as soon as one or more glass layers crack. As long as cracks have not formed in the glass, the strains are rather small and the PVB layer acts mainly in shear. After the glass layers have failed, the PVB layer acts as a membrane and the local strains can be very large. A sophisticated material model is required as both effects shall be taken into consideration. Currently, we plan to use a hyperelastic material law to simultaneously account for the large strain and the viscoelastic effects.

The thickness of the adhesive joint is considerably larger than for a common structural adhesive joint and the static stiffness of the adhesive is very low. Further, since the width of the joint is not much greater than its thickness, the stress state is largely influenced by the free edge of the adhesive. The stiffness and material character of the adherents are also very different, which renders a high grade of mixed mode loading. To assess the post-crash structural integrity of the windshield bond line, it is necessary to model the adhesive during fracture of the windshield itself. The discontinuous behaviour during fracture of the glass is another parameter affecting the size of the process zone. It has been found that the adhesive line can be modelled with three solid elements in the thickness direction. It has also been noted in material tests that the properties of the PVB- and adhesive materials are very similar. It has therefore been assumed that the same material model can be used for both materials.

Rubber-like materials are normally modelled by various, analytical, hyperelastic material laws, possibly complemented by some viscous terms to account for time dependent effects. This type of models assume normally that the material is incompressible. It has, however, been observed in the CMG-I study, that none of the current materials (PVB and glue) are incompressible. In the literature, numerous attempts have been reported, where people have been trying to model the current materials with various analytical, hyperelastic material laws. These attempts have all failed.

In the current project we have therefore tested a new idea for modelling of PVB- and glue materials. To be able account for the large strains, the new model is still based on a hyperelastic law, but in his case the simplest, existing one. This model is named the *Saint Venant – Kirchhoff* law, and corresponds to Hooke's law for small strains. Nonlinearities are accounted for by letting the secant stiffness  $E$  being a function of "effective" values of strain and strain-rates. These "effective" strain variables are associated to an "effective" stress. The success of the model depends of course very much on the definition of these "effective" variables. Due to space limitations we have to skip the derivations of these variables.

As has been noted in the literature that it is very difficult to model the strong nonlinearities resulting from large strains and strain-rates with analytical, hyperelastic material models. In the current project we have therefore tested a new approach, where material nonlinearities are described by numerical tables, relating stress, strain, and strain-rates. Stresses are thus obtained by simple interpolations in these tables. The numerical tables are obtained from simple uniaxial tension tests, performed at different strain rates. This means that the current model can represent uniaxial tension in an almost exact way. The model has also been applied to the simulation of bi-axial tension tests at different strain rates, with surprisingly high success. This indicates that the defined "effective" variables works fine, not only in the uniaxial case. It should also be emphasized that the volume change of the material is accounted for in a correct way.

Unfortunately, the success of the model is not complete. It has been observed that the model can give rise to numerical instabilities in certain situations. Normally the PVB layer is loaded in bi-axial tension, and in such load cases the model works fine. It can, however, happen that one or more elements are subjected to loading/unloading load cases. In such situations numerical instabilities can occur. We have spent a big part of the project time to overcome these problems, by modifying the numerical algorithms and rewriting the code. So far these attempts have not been successful. During the last months we have made a major revision of the model, and the implementation in LS-DYNA. We are just in the process of starting to evaluate this last version of the model.

Due to the problems we have had with the PVB/glue material model, we have never had time to start the work with the failure modelling in the connexion between glue and car body.

### 3 Bakgrund

Betydelsen av hållfastheten hos vindrutor och glastak för bilens krockegenskaper ökar allt eftersom dessa glasytor tenderar att bli större och större i nya bilmodeller. Det är därför av högsta vikt att responsen hos laminerat glas kan simuleras med hög noggrannhet i samband med krockanalyser. De modeller, som har använts inom bilindustrin fram till nu har varit mycket rudimentära och uppfyller inte dagens krav på noggrannhet.

Förutom inverkan av vindrutans hållfasthetsegenskaper på karossens totala respons vid krock, har också vindrutans egenskaper stor inverkan på kraftnivåerna vid huvudslag. Dessa kan ske utifrån, som vid påkörning av fotgängare, eller inifrån, då förare eller passagerare får närkontakt med vindrutan vid krock. Det är därför av lika stor vikt att även dessa lastfall kan simuleras med hög noggrannhet.

Ett projekt med ovanstående målsättning (CMG-I) har nyligen genomförts (finansiering genom bl a Vinnova-SAFER) och avslutades i november 2016. Projektet innefattade hela 14 partners, både Svenska och utländska. Bland andra deltog både Chalmers och Volvo Cars. Projektet var i många avseenden framgångsrikt och resultatet håller nu på att implementeras hos de deltagande industriföretagen

På grund av resursbrist återstår emellertid framför allt två problemområden att lösa. Det första gäller materialmodellering för det ingående PVB-skiktet, vilket har stor betydelse för laminatets egenskaper. Detta material har ur modelleringssynpunkt ett antal mycket obehagliga egenskaper. Bland annat är materialets egenskaper extremt beroende av töjningshastigheten. Från det tidigare projektet kunde slutsatsen dras att ingen existerande materialmodell klarar av att simulera PVB-materialets respons på ett tillfredsställande sätt.

Det andra problemområdet gäller den komplexa brottmod, som i vissa fall kan observeras i anslutning mellan vindrutan och limfogen och som kan uppstå i samband med stora krafter i vindrutans plan.

Det tilltänkta projektet avser att fokusera på ovan nämnda två problemområden.

## 4 Syfte, forskningsfrågor och metod

### *Syfte*

Det primära syftet med projektet var att ta fram en materialmodell för PVB-skiktet och limmet mellan vindrutan och karossen (samma modell). Det sekundära syftet var att utveckla en beräkningsmetodik för att prediktera brott i anslutning till fogen mellan vindrutan och karossen.

### *En materialmodell för PVB- och limmaterial*

Som tidigare nämnts är egenskaperna för PVB och lim tämligen lika och samma materialmodell bedöms kunna användas för bägge materialen. Egenskaperna för dessa material är emellertid mycket komplexa och svåra att fånga upp i en materialmodell. Det som ligger närmast till hands är att använda en hyperelastisk lag kompletterad med tidsberoende (viskösa) termer. Det finns dock en hel rad av tillkortakommanden hos denna typ av materialmodeller med tillämpning på de aktuella materialen. Några av dessa brister diskuteras nedan:

Existerande hyperelastiska materiallagar är vanligtvis analytiska. Spännings-töjningssamband vid olika töjningshastigheter erhålls normalt som en skalning av en statisk kurva. Experimentella spännings-töjningskurvor för ett PVB-material vid olika konstanta (nominella) töjnings-hastigheter uppvisar emellertid starkt varierande utseenden för olika töjningshastigheter. Ingen analytisk materiallag kan beskriva dessa kurvor på ett acceptabelt sätt.

Analytiska, hyperelastiska materiallagar förutsätter normalt att materialet är (nästan) inkompressibelt. PVB- och limmaterialen är emellertid inte inkompressibla. Volymförändringen varierar dessutom med töjningens storlek.

De viskösa termer, som ingår i vissa hyperelastiska materiallagar, är tillagda för att kunna simulera långsamma fenomen som krypning, spänningsrelaxation, o s v. I den aktuella tillämpningen söker vi emellertid en materiallag, som kan simulera beteendet vid relativt höga töjningshastigheter.

Som framgår av ovan har det i det tidigare projektet (CMG-I) utförts en inventering av tänkbara, existerande materialmodeller. Det har dock visat sig att det inte existerar någon modell, som uppfyller de noggrannhetskrav som kan ställas på en sådan materiallag. Analytiska, hyperelastiska-viskösa modeller har därför uteslutits som alternativ vid utvecklandet av en ny modell.

Istället har fokus riktats mot en rent numerisk beskrivning av materialets respons vid höga töjningshastigheter. En sådan modell skulle vara baserad på resultat från enaxliga dragprov vid olika hastigheter. Vidare skulle modellen vara baserad på hyperelasticitet för att kunna simulera stora töjningar på ett korrekt sätt.

Den enklaste hyperelastiska materialmodellen är *Saint Venant – Kirchhoff* modellen, som definieras av en töjningsenergifunktion  $\psi$  enligt

$$\psi(\mathbf{E}) = \frac{1}{2} \lambda (\text{tr} \mathbf{E})^2 + \mu \mathbf{E} : \mathbf{E}$$

eller

$$\psi(E_{ij}) = \frac{1}{2} \lambda (E_{kk})^2 + \mu E_{ij} E_{ij}$$

där  $\mathbf{E}$  är Green-Lagrange (G-L) töjningstensor.

För ett hyperelastiskt material kan Piola-Kirchhoffs andra spänningstensor  $\mathbf{S}$  (PK2) erhållas som

$$\mathbf{S} = \frac{\partial \psi(\mathbf{E})}{\partial \mathbf{E}} ; \quad S_{ij} = \frac{\partial \psi(E_{ij})}{\partial E_{ij}} ;$$

För den aktuella töjningsenergifunktionen får man

$$\mathbf{S} = \lambda \text{tr}(\mathbf{E}) \mathbf{I} + 2\mu \mathbf{E}$$

$$S_{ij} = \lambda E_{kk} \delta_{ij} + 2\mu E_{ij}$$

Den resulterande konstitutiva lagen är ekvivalent med Hooke's lag för små töjningar, men med de vanliga spännings- och töjningsmått för små töjningar,  $\boldsymbol{\sigma}$  och  $\boldsymbol{\varepsilon}$ , utbytta mot PK2-spänning  $\mathbf{S}$  och G-L töjning  $\mathbf{E}$ . Den aktuella lagen beskriver således ett linjärt samband mellan  $\mathbf{S}$  och  $\mathbf{E}$ . Om vi emellertid låter styvheten  $E$ , vilken motsvarar elasticitetsmodulen i Hooke's lag, vara en funktion av en skalär, effektiv töjning  $\bar{E}$  kan även ett olinjärt material beskrivas med denna enkla materiallag. Även ett töjningshastighetsberoende kan simuleras om vi också låter styvheten  $E$  vara en funktion av en effektiv töjningshastighet  $\dot{\bar{E}}$ . Styvheten kan alltså skrivas

$$E = E(\bar{E}, \dot{\bar{E}})$$

Tvärkontraktionstalet  $\nu$  har också visat sig vara töjningsberoende, men inte beroende av töjningshastighet. Tvärkontraktionstalet kan då uttryckas som

$$\nu = \nu(\bar{E})$$

Om spännings-töjningskurvorna transformeras till PK2-spänningar och G-L töjningar, kan dessa sparas i tabellform som indata till materialmodellen. På samma sätt kan  $\nu$  sparas i tabellform. I materialmodellen erhålls sedan  $E$  och  $\nu$  genom interpolation i tabeller.

Under förutsättningen att den nya materialmodellen fungerade väl, var avsikten att modellen skulle implementeras som en standardmodell i LS-DYNA av projektpartnern Dynamore Nordic.

#### *Simulering av brott i glaset i anslutning till limfogen*

För att göra en detaljerad analys av vad som händer i området kring laminat/limfog skulle det krävas en elementstorlek i storleksordningen en bråkdel av en millimeter. Ett sådant fint elementnät är naturligtvis helt otänkbart att använda i dagliga produktionssimuleringar. Vi har emellertid en idé om en förenklad beräkningsmetodik.

Brott i glaset i anslutning till limfogen uppstår antagligen på grund av att skjuvspänningen i glaset överskrider ett visst kritiskt värde. De tjocka skalelement, som vi använder i vår beräkningsmodell (Typ 2), förutsätter dock ett plant spänningstillstånd, d v s den sökta skjuvspänningen kan inte beräknas. Det finns emellertid en annan typ av tjocka skal, som använder den totala, tredimensionella spänningstensorn (Typ 5). I ett sådant element skulle den maximala skjuvspänningen kunna beräknas. Nackdelen med den senare typen av tjocka skal är att de är betydligt mer tidskrävande att använda. En lösning på det problemet skulle kunna vara att man ersätter elementen på undersidan (mot limfogen), längs randen på vindrutan med element av Typ 5. När maximal skjuvspänning i något av dessa element överskrider ett visst kritiskt värde tas det bort.

Det krävs naturligtvis en hel del provning för att bestämma ett sådant kritiskt värde för skjuvspänningen. Vi anser det emellertid fördelaktigt att först ta fram en beräkningsmetodik. Om denna visar kunna fungera tillfredsställande, får man sedan utföra nödvändig provning i ett separat projekt.

## 5 Mål

Det primära målet för projektet var att utveckla en teoretisk modell för PVB- och limmaterialet, att testa denna modell i enkla och mer komplexa exempel, samt, om resultaten var positiva, implementera denna modell som en standardmodell i FE-programmet LS-DYNA.

Det sekundära målet var att utveckla en beräkningsmetodik för att kunna prediktera brott i fogen mellan laminat och kaross.

Som beskrivs i avsnittet nedan, tycks idén med att beskriva PVB-materialets egenskaper rent numeriskt i form av ett antal tabeller, relaterande spänningar, töjningar och töjningshastigheter, fungera väl. I vissa exempel har metoden dock givet upphov till numerisk instabilitet. Större delen av projektiden har därför ägnats åt att finna metoder för att kunna göra modellen mer robust.

På grund av de problem som vi ställdes inför i samband med uttestningen av PVB-modellen, hann vi aldrig påbörja arbetet med en metodik för brottprediktering i området limfog/kaross.

## 6 Resultat och måluppfyllelse

PVB-materialet i en vindruta verkar huvudsakligen under påverkan av en- eller bi-axiella dragspänningar. Den utvecklade materialmodellen har i simuleringar av bi-axiella tester av PVB-material givet mycket bra resultat. I mer komplexa lastfall, t ex när PVB-skiktet ingår i ett laminat med uppspruckna glasskikt, har vi dock haft problem med numerisk instabilitet. Dessa problem har kunnat härledas till områden där PVB-materialet utsätts för reverserad belastning, d v s spänningarna varierar från drag till tryck eller tvärtom. Sådana spänningsvariationer kan förekomma när laminatet påverkas av laster med hög hastighet.

En stor del av projektiden har ägnats åt att med olika varianter av det ursprungliga konceptet komma ifrån problemet med numerisk instabilitet. Dessa försök har hittills inte resulterat i en tillräckligt robust modell. De senaste månaderna har vi jobbat med en tämligen radikal förändring av modellen. Vi står just nu i begrepp att börja testa denna version, som vi har stora förhoppningar på.

På grund av ovan beskrivna problem har vi således inte haft möjlighet att utveckla beräkningsmetodiken för brott i fogen mellan laminat och kaross.



## 7 Spridning och publicering

### 7.1 Kunskaps- och resultatspridning

| Hur har/planeras projektresultatet att användas och spridas?         | Markera med X | Kommentar |
|--|---------------|-----------|
| Öka kunskapen inom området   | x             |           |
| Föras vidare till andra avancerade tekniska utvecklingsprojekt       | x             |           |
| Föras vidare till produktutvecklingsprojekt                          | x             |           |
| Introduceras på marknaden  |               |           |
| Användas i utredningar/regelverk/tillståndsärenden/ politiska beslut |               |           |

### 7.2 Publikationer

På grund av de problem, som vi har stött på under utvecklingsarbetet, har inga publikationer producerats i projektet.

## 8 Slutsatser och fortsatt forskning

Vi tror att den metod och modell med numeriskt beskrivna materialegenskaper, som presenterats här, är framtiden för modellering av PVB- och limmaterial. Samtidigt måste man vara ödmjuk inför uppgiften att utveckla en robust och tillförlitlig modell. Materialets höga töjningshastighets-beroende har visat sig ha en negativ inverkan på robustheten hos en numerisk lösningsmetodik.

Som nämnts ovan har vi under den senare delen av projektet utvecklat och implementerat en ny lösningsmetodik. Denna kommer fortsatt att testas efter projektets slut.

## 9 Deltagande parter och kontaktpersoner

Projektledare:

Kjell Mattiasson  
Chalmers Tekniska Högskola  
+46 (0) 31-772 2178  
[kjell.mattiasson@chalmers.se](mailto:kjell.mattiasson@chalmers.se)

Representant för Volvo Cars:

Johan Jergeus  
Volvo Cars  
+46 (0)31-3250942  
[Johan.jergeus@volvocars.com](mailto:Johan.jergeus@volvocars.com)