

# Korrelation av däck-väg friktion för att möjliggöra autonom körning vid alla väder och väglag

## Publik rapport



Författare: **Mattias Hjort, Fredrik Bruzelius, Sogol Kharrazi, Derong Yang**

Datum: **2024-06-28**

Projekt inom **Elektronik, mjukvara och kommunikation**

**FFI** Fordonsstrategisk  
Forskning och  
Innovation

VINNOVA

Energimyndigheten

TRAFIKVERKET

FKG

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>5</b>
<b>3 Bakgrund.....</b>	<b>8</b>
<b>4 Syfte, forskningsfrågor och metod .....</b>	<b>10</b>
<b>5 Mål .....</b>	<b>12</b>
<b>6 Resultat och måluppfyllelse .....</b>	<b>12</b>
<b>7 Spridning och publicering .....</b>	<b>17</b>
7.1 Kunskaps- och resultatspridning .....	17
7.2 Publikationer.....	17
<b>8 Slutsatser och fortsatt forskning .....</b>	<b>17</b>
<b>9 Deltagande parter och kontaktpersoner.....</b>	<b>17</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.

Läs mer på [www.vinnova.se/ffi](http://www.vinnova.se/ffi).

# 1 Sammanfattning

Datadriven utveckling av algoritmer är en teknik på frammarsch som potentiellt kan hantera komplexa problem där klassiska modellbaserade metoder misslyckas. Ett sådant område är däckvägbane-friktion, och behovet av ett korrekt estimat av denna friktion är nödvändig för t.ex. autonoma bilar. Datadrivna metoder beror helt på den data som de tränas och valideras på. I nuläget finns det inga källor eller tillvägagångssätt att skaffa sig den data som behövs för dessa metoder. Detta projekt har utvecklat en metod för att använda vägfriktionsutrustning för att mäta däck-vägbane-friktion och tillhandahålla data för datadriven utveckling. Metoden har uteslutande fokuserat på vinterväglagen snö och is, men kan direkt tillämpas också för väglag med hög friktion, som torr och våt asfalt, om vägfriktionsmätaren kan hantera det.

Metodutvecklingen har utgått från den kommersiella vägfriktionsmätare som VCC har införskaffat och via testbanemätningar fastställa korrelationen mellan longitudinella friktionsvärden från denna enhet och en personbil, målfordonet (MF), utrustad med olika vinterdäck på olika vägfriktionsförhållanden vid vinterväglag. Utöver själva mappningen, vilken kommer att vara användbar för VCC i kommande utveckling av fordonsegen friktionsestimator, så har ett annat syfte varit att utveckla en kostnadseffektiv öppen metod för att utföra framtida mappningar av detta slag. Mappningen är tänkt att användas vid körning på vanlig väg, där MF och vägfriktionsmätaren kör i kolonn och de kontinuerligt uppmätta vägfriktionsvärdena omvandlas via mappningen till referensfriktionsvärden som är representativa för MF. En trådlös kommunikation mellan vägfriktionsenheten och MF har installerats så att referensfriktionen kan loggas synkront tillsammans med andra sensordata i bilen. Mappningsfunktionen kommer att möjliggöra insamling av stora datamängder från mätningar på verkliga vägar som kan användas för datadriven utveckling som maskininläring, vilket är den avsedda användningen av enheten av VCC.

Den använda vägfriktionsmätaren (Road Friction Detector - RFD) är en släpvagn från den norska tillverkaren ViaFriction, och just denna modell används ofta för rutinmässig friktionsbedömning av vintervägar i Sverige. Den kan mäta vägfriktion upp till 0,5, vilket utesluter rena asfaltvägar. Tre olika vinterdäck valdes ut för målfordonet, en Volvo XC60: ett europeiskt vinterdäck, ett nordiskt vinterdäck och ett dubbat vinterdäck. Tester utfördes i två separata veckolånga kampanjer på snö- och isbanor i norra Sverige. Testbanorna förbereddes så att friktionsnivåerna med RFD låg inom 0,05 - 0,45. Mätningar utfördes för att möjliggöra mappningar vid olika fordonshastigheter, hjullaster och däcktryck. En optisk sensor från Teconer användes också för att skilja mellan is- och snöyta om denna information skulle behövas för mappningen.

Ytterligare information om den tillgängliga friktionen för de olika däcken erhöles genom parallella tester med VTIs mobila däckprovningssutrustning BV12. Från dessa mätningar kunde friktionens lastberoende bestämmas, vilket innebär att de framtagna mappningarna kan tillämpas på olika målfordon som använder samma däck, vilket skulle utöka användningsfallen för en specifik däckmappning. Till skillnad från bromstester så utförs dessa mätningar vid en konstant hastighet, vilket ger förbättrade möjligheter att uppskatta friktionens hastighetsberoende.

Sammanfattningsvis visar resultaten av de omfattande fälttesterna på is och snö att en dedikerad vägfriktionsmätare kan vara ett användbart verktyg för att kontinuerligt mäta tillgänglig bromsfriktion på vintervägar för ett specifikt fordon och däck, men den uppmätta friktionsnivån med RFD bör justeras för olika däcktyper. Data indikerar att en modell med bitvisa linjära avbildningar skulle kunna användas, men ytterligare information om vägytan för att särskilja is- och snöbelagda vägar vid RFD-friktionsnivåer över 0,3 skulle behövas. En viktig erfarenhet från projektet är också att en RFD med fast mekanisk styrning av slipet är att föredra framför motorstyrda på grund av den högre slipstabiliteten och därmed en högre andel godkända mätdata. Inverkan av hastighet, hjullast och däcktryck visade sig vara liten, vilket förenklar mappnings-modellen, och kraftigt reducerar antalet tester som måste utföras för att genomföra en mappning.

Resultaten indikerar att en mappning går att genomföra utan dedikerad däckfriktionsutrustning genom att utföra bromstester med normallastad MF, vilket gör metoden praktiskt genomförbar för ett större antal utvecklare av friktionsesterimeringsmetoder. Den stora utmaningen är att skapa testbanor med olika nivåer av friktion, från lägsta till högsta. Testerna utförda i projektet visar att det är möjligt att täcka in ett adekvat friktionsområde med banpreparering utförd av erfaren personal, samt specialutvecklad friktionshöjande utrustning för att rugga is.

## 2 Executive summary in English

Available friction between the vehicle's tyres and the road surface is an entity that, if it could be measured accurately during real world driving, would be of great benefit to both the driver, as well as input for the vehicle's ADAS system. Even experienced drivers find it difficult to understand the relation between weather/road surface conditions and the tyre road adhesion. Research has shown that drivers to a large extent fail to estimate the slippery road conditions and adapt their speed accordingly [1]. For automated driving of different levels, an accurate estimation of the available friction is crucial in order to determine a safe vehicle speed and for deciding safe distances to other vehicles, bicyclists or pedestrians. Friction estimation is however a very difficult problem, and despite decades of research no satisfactory solution has been found (see e.g. [2] and references therein). The current state-of-the-art friction estimation approaches use physical models. These approaches give correct estimates point-wise, and require special conditions to operate, leading to low data availability. One of the obstacles is the problem of finding a true reference value for the friction level that can be used for validation. On test tracks, with large surfaces of uniform friction, a full ABS brake test can be used for determining the friction. On real roads however, where the surface conditions may be rapidly changing, such a measurement is in most cases impossible due to road curvature, and even more importantly, traffic safety.

Data driven algorithm development is an emerging technique to tackle complex problems where classical model-based approaches fail. Tyre to road friction estimation is an example of such a field, and the need for an accurate estimation of the coefficient of friction is vital for autonomously driven cars. Data driven methods rely on accurate training and validation data. There is currently no such source and method to obtain data for friction estimation required for such methods. The aim of the current project has been to develop a method where a road measurement device is used for measuring continuous tyre to road friction and provide data for data driven development. The method was derived using an empirical approach supported by reference measurements and investigations. The method and the data provided could be used in a larger context to validate other approaches to friction estimation as well as to provide useful insight to road administrators on e.g. real braking distances on the road network.

Friction depends on both the tyre and the road surface, and the concept "friction level" usually means the maximum available friction during braking or steering. Most often the maximum longitudinal friction force during braking and the maximum lateral friction force during steering correlates, and a lot of information can be obtained from measuring in just one direction. From a practical point of view the longitudinal friction is easier to measure. It can be represented in form of a so-called slip curve which describes the friction as a function of wheel slip, from free rolling (0 % slip) to locked wheel (100 % slip). Slip curves can be measured using dedicated tyre friction measurement equipment. Although longitudinal and lateral friction curves often are very similar, the longitudinal and lateral friction available for a vehicle does not have to be the same in practice. Longitudinally, the vehicle's ABS and anti-skid systems help control the wheel slip so that a large part of the peak friction can be used. For lateral friction, peak friction occurs at a specific so-called slip angle (the angle between the tyre's rolling direction and direction of movement). Especially on icy surfaces, friction drops quickly if the slip angle becomes too large, and for a non-trained driver, it can be difficult to steer the vehicle so that maximum lateral friction is utilized. Still, longitudinal friction has been the primary interest for in-vehicle friction estimators and is also the focus of this work.

Measuring the road surface is an ongoing activity for most road administrators. The main objective of such measurements is to monitor the conditions of road segments and to use this information for decision-making of road maintenance. Recently, the use of vehicles in a fleet as probes to a centralized cloud for this purpose has been investigated. However, the established method for these types of measurements is through dedicated devices attached to a vehicle. An example of such devices can be an extra tyre with a fixed slip ratio and a force sensor. A common aim with all these measurement techniques, including the cloud-based ones, is to monitor the road conditions. Hence, standard methods with special tyres are typically used.

As stated above, the aim of the current project has been to develop a measuring method for the vehicle industry that can provide them with the required reference friction data using the devices used typically by road administrators. The use of standardized methods with measurement devices cannot be applied directly to the problem that the vehicle industry is facing. The friction measurements need to reflect the friction level and conditions a car would experience to be relevant. Hence, translations between the readings from the device and the car friction level need to be developed through measurement campaigns. The purpose of this project has been to develop a method to derive this translation with a focus on minimizing the required measurements and additional sensors required

The method development has been based on the commercial road friction meter that VCC has acquired and via test track measurements determine the correlation between longitudinal friction values from this unit and a passenger car, the target vehicle (MF), equipped with different winter tires under different road friction conditions in winter road conditions. In addition to the mapping itself, which will be useful for VCC in the future development of its own friction estimator, another purpose has been to develop a cost-effective open method for performing future mappings of this kind. The mapping is intended to be used when driving on ordinary roads, where the MF and the road friction meter drive in column and the continuously measured road friction values are converted via the mapping into reference friction values that are representative of MF. A wireless communication between the road friction unit and MF has been installed so that the reference friction can be logged synchronously together with other sensor data in the car. The mapping feature will enable the collection of large data sets from real-world measurements that can be used for data-driven development such as machine learning, which is the intended use of the device by VCC.

The Road Friction Detector (RFD) used is a trailer from the Norwegian manufacturer ViaFriction, and this particular model is often used for routine friction assessment of winter roads in Sweden. It can measure road friction up to 0.5, which excludes pure asphalt roads. Three different winter tyres were selected for the target vehicle, a Volvo XC60: a European winter tyre, a Nordic winter tyre and a studded winter tyre. Tests were carried out in two separate week-long campaigns on snow and ice tracks in northern Sweden. The test tracks were prepared so that the friction levels with RFD were within 0.05 - 0.45. Measurements were performed to enable mappings at different vehicle speeds, wheel loads and tire pressures. An optical sensor from Teconer [5] was also used to distinguish between the ice and snow surface if this information turns out to be crucial for the mapping.

Further information on the available friction for the different tires was obtained through parallel tests with VTI's BV12 mobile tire testing equipment. From these measurements, the load dependency of the friction could be determined, meaning that the resulting mappings could be applied to different target vehicles using the same tires, which would expand the use cases of a specific tire mapping. Unlike brake tests, these measurements are performed at a constant speed, which provides improved opportunities to estimate the speed dependency of friction.

The test tracks were rectangular, typically 20 m wide with a length of 600 – 1000 meters. The Snow tracks were made available by the tyre manufacturer Pirelli, and were prepared according to the expertise of their personnel to allow for repeatable tests. Tracks with different hardness of snow were used in the purpose of covering a range of available friction. Still, snow on these types of test tracks is generally much harder than conditions often found on the roads, and consequently exhibit quite high friction levels. The snow hardness was in the range of 82 – 90 CTI units (see ref [6] for a definition of snow hardness), and the ambient temperature ranged from +2 to -6 °C, with the snow temperature being a few degrees colder. The RFD measured friction values varied between 0.28 – 0.44.

The ice tracks were divided into parallel corridors, 3 m wide and 300 meter long, which could be prepared differently to allow for different preparation. A special ice-rugging trailer with 10 studded tyres rolling with large slip angles was constructed in order to transform a smooth ice with low friction to rugged ice with different friction levels. Making use of large weather variations, ice surfaces with RFD friction levels in the range of 0.05 – 0.45 were obtained.

Initial measurements were carried out at both 30 and 50 km/h, but since no clear difference was observed at these speeds, most of the measurements were then performed at 50 km/h. Most data were collected for the Nordic winter tyre, for which both BV12 and XC60 show a similar picture. The RFD underestimates the available friction at very slippery ice as well as for packed snow, while it provides a good estimate at intermediate ice friction levels. The European winter tyre data shows a similar behavior but exhibits a lower performance on slippery ice compared to the Nordic tyre, leading to a good correspondence with the RFD also at low friction.

In conclusion, the results of the extensive field tests on ice and snow show that a dedicated road friction meter can be a useful tool to continuously measure the available braking friction on winter roads for a specific vehicle and tires, but the measured level of friction with RFD should be adjusted for different tire types. The data indicate that a model with bitwise linear maps could be used, but additional road surface information to distinguish ice and snow-covered roads at RFD friction levels above 0.3 would be needed. An important experience from the project is also that an RFD with fixed mechanical control of the grind is preferable to motor-controlled ones due to the higher grinding stability and thus a higher percentage of approved measurement data. The impact of speed, wheel load and tire pressure was found to be small, which simplifies the mapping model, and greatly reduces the number of tests that must be performed to carry out a mapping.

Measurements at different wheel loads ( $\pm 50\%$ ) with the BV12 showed a very small effect of the wheel load on the brake friction on snow. Measurements on ice in VTI's stationary tire testing facility indicate that the impact of varying wheel loads is small also on ice. Changes in tire pressure  $\pm 0.4$  bar from the base pressure of 2.6 bar also had a marginal effect on friction on both snow and ice.

To investigate how measurement with RFD is affected by driving in a corner, a comparison was made with RFD when it is driven straight ahead and along a slalom pattern that results in a lateral acceleration of 0.1 g. This comparison was carried out on different ice surfaces and in general it was found that when cornering with a lateral acceleration of 0.1 g, the RFD friction value decreases by 10%. The lateral acceleration of 0.1 g was chosen as the Swedish roads are designed so that this lateral acceleration is achieved in the curves when driving according to the legal speed limit.

The results indicate that a mapping can be carried out without dedicated tire friction equipment by performing brake tests with normal-loaded MF, which makes the method practically feasible for a larger number of developers of friction estimation methods. The big challenge is to create test tracks with different levels of friction, from lowest to highest. The tests carried out in the project show that it is possible to cover an adequate friction area with track preparation carried out by experienced personnel, as well as specially developed friction-enhancing equipment for roughening ice. However, weather conditions have a very large impact and must be taken into account in the planning for this type of test.

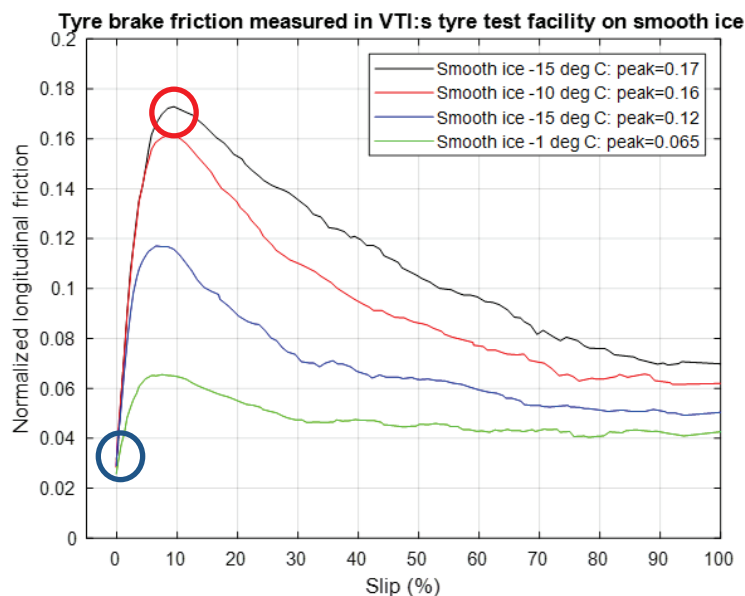
Further research will focus on improving the internal friction estimator based on reference friction data measured with the developed method. The developed mappings will be useful for obtaining large amount of data for machine learning methods. Relevant questions concern how cloud-based friction estimates can benefit from these mappings, as well as how to describe available lateral friction. The maximum available lateral friction may be in the same order of magnitude as the longitudinal ABS friction, but on icy roads it is in practice difficult to fully utilize the maximum friction as the friction quickly decreases with excessively large steering angles.

The project results will be presented at the 16th International Symposium on Advanced Vehicle Control, September 2-6, 2024, Milan, Italy [9].

### 3 Bakgrund

Den tillgängliga friktionen mellan fordonets däck och vägbanan är information som, om den kunde mätas noggrant under verklig körning, skulle vara till stor nytta för både föraren och indata till fordonets ADAS-system. Även erfarna förare har svårt att förstå sambandet mellan väder/väglag och däckens väggrepp. Forskning har visat att förare i stor utsträckning misslyckas med att bedöma det hala väglaget och anpassa sin hastighet därefter [1]. För automatiserad körning på olika nivåer är en korrekt uppskattning av den tillgängliga friktionen avgörande för att bestämma en säker fordonshastighet och för att hålla säkra avstånd till andra fordon, cyklister eller fotgängare. Friktionsestimering är dock ett mycket svårt problem, och trots årtionden av forskning har ingen tillfredsställande lösning hittats (se t.ex. [2] och referenser däri). Ett av hindren är problemet med att hitta ett verkligt referensvärde för friktionsnivån som kan användas för validering vid utveckling av metoder för friktionsestimering. På testbanor, med stora ytor med jämn friktion, kan ett fullständigt ABS-bromstest användas för att bestämma friktionen. På verkliga vägar, där ytförhållandena kan förändras snabbt, är en sådan mätning i de flesta fall omöjlig på grund av vägens krökning, och ännu viktigare, trafiksäkerheten. Syftet med detta projekt har därför varit att utveckla en metod för kontinuerlig mätning av referensfriktionsnivån för en viss fordons-/däckkombination längs verkliga vägar.

Friktionen beror både på däcket och vägbanan, och begreppet "friktionsnivå" brukar betyda den maximala tillgängliga friktionen vid inbromsning eller styrning. Oftast är den maximala friktionskraften i längsled vid inbromsning och den maximala friktionskraften i sidled vid styrning i samma storleksordning, och mycket information kan erhållas vid mätning av en av dessa. Ur praktisk synvinkel är den längsgående friktionen lättare att mäta. Den kan representeras i form av en så kallad slipkurva som beskriver friktionen som en funktion av hjulslip, från frirullning (0 % slip) till låst hjul (100 % slip). Slipkurvor kan mätas med hjälp av särskild utrustning för mätning av däckfriktion. Figuren nedan visar slip för ett däck på slät is vid olika istemperaturer, uppmätta i VTI:s däckprovingsanläggning.



Figur 1. Exempel på bromsslipkurvor på is.

Som synes finns det en betydande variation av den maximalt tillgängliga friktionen, peaken (röd cirkel), på grund av den varierande istemperaturen. I det här exemplet skulle bromssträckan på is vid  $-1^{\circ}\text{C}$  vara nästan 3 gånger längre än bromssträckan vid  $-15^{\circ}\text{C}$ . Eftersom bromssträckan är proportionell mot inversen av friktionskoefficienten ökar noggrannhetskraven på friktionsuppskattningen med minskande friktionsnivå. Befintliga friktions-estimatorer i fordon



baserade på longitudinell friktion mäter slipkurvan vid mycket låga slipvärden (blå cirkel) och försöker extrapolera peakfriktionsvärdet från denna information. Enligt befintliga däckfriktionsmodeller måste dock en hög nivå av excitation, vilket innebär större hjulslipvärden, uppnås för att exakt uppskatta peakfriktionen. Detta är dock i praktiken svårt att uppnå vid verklig körning på ett kontinuerligt sätt. Friktions-estimatorerna korrigerar sina estimat vid tillfällen med kraftigare broms- eller acceleration, vilket resulterar i punktvis bra uppskattning av maximal tillgänglig friktion.

Även om slipkurvor för friktion i längsled (longitudinellt) och sidled (lateralt) ofta är väldigt lika så behöver inte tillgänglig friktion longitudinellt och lateralt för ett fordon i praktiken vara lika. Longitudinellt så hjälper fordonets ABS- och antislirsystem till att kontrollera hjulslipet så att en stor del av peakfriktionen kan användas. För lateral friktion så inträffar peakfriktionen vid en specifik så kallad slipvinkel (vinkel mellan däckets rullriktning och rörelseriktning). Speciellt på isiga underlag så sjunker friktionen snabbt om slipvinkeln blir för stor, och för en icke-tränad förare kan det vara svårt att styra fordonet så att maximal lateral friktion utnyttjas.

Att mäta kontinuerligt varierande vägfriktion är ett annat problem, där VTI under lång tid varit en innovatör och har utvecklat vägfriktionsmätare sedan 1940-talet, och aktivt deltagit i det internationella standardiseringsarbetet sedan dess. Vägfriktion på torra vägbanor anses vanligtvis inte vara ett problem, så mätmetoderna har utvecklats för att bedöma friktionsnivån på en våt väg, normalt kallad skid resistance. Den specifika utrustning som tillverkas för sådana mätningar bygger på principen att använda ett specifikt referensdäck (med specificerade egenskaper) som antingen bromsas eller styrs för att generera friktionskrafter, vilka mäts kontinuerligt längs en vägbanan.

Även om vissa standarder föreskriver användning av ett låst mät hjul, eller ett hjul med mycket hög slipvinkel, är den vanligaste metoden att applicera ett bromsslip på mellan 15 - 20 procent. Detta kommer att generera en bromsfriktionskraft nära den maximalt tillgängliga friktionen för det specifika referensdäcket och leder till betydligt mindre däckslitage jämfört med mätning med låst hjul. Referensdäcken är ofta mindre än vanliga personbilsdäck och den applicerade hjullasten är också mycket lägre jämfört med hjullasten för en personbil. Således är friktionsnivån som erhålls från en standardiserad vägfriktionsmätning normalt inte direkt jämförbar med den friktion som kan uppnås för en personbil. VCC har förvärvat en toppmodern vägfriktionsmätare i syfte att använda den under utvecklingen av deras fordonsbaserade friktionsestimator. Den är gjord som en släpvagn för att dras av en personbil, se figur 2 nedan



*Figur 2. VCC:s vägfriktionsmätare.*

VTI och VCC har båda stor erfarenhet av däckfriktionsmätningar och har en lång historia av samarbete inom området. Bland annat i två IVSS-finansierade projekt med svensk fordonsindustri (Road Friction Estimation I och II, 2004 - 2010) som syftade till att utveckla fordonsbaserade metoder för friktionsuppskattning, se [3,4]. Nyligen deltog VTI i ett FFI-projekt (TyreSens) tillsammans med Chalmers och VCC för att använda sensorinformation i fordonen för att uppskatta friktionskoefficienten. För att möjliggöra en direkt uppskattning av friktionen extraherades däckkraften i kontaktytan genom att bromsa den ena axeln och driva den andra, se [2]. På så sätt kunde tillgänglig friktion uppskattas korrekt och den grundläggande begränsningen från lågt kraftutnyttjande löstes. Simultan bromsning och framdrivning leder dock till en ökning av däckslitage liksom bränsleförbrukningen, vilket innebär att denna typ av ingrepp bör användas med försiktighet. Således kommer friktionsuppskattning baserad på högt kraftutnyttjande endast att kunna ge friktionsinformation i enstaka punkter längs en vägsträcka. Försök att kombinera information mellan fordon i en molnbaserad tjänst har varit ett intensivt forskningsämne under de senaste 2 decennierna. Det skulle teoretiskt kunna öka antalet punkter i friktionsuppskattningen, vilket skulle vara värdefullt för ett flertal applikationer. Metoden lider dock av att informationen som delas över molnet är av varierande ålder, och representerar ett viktat genomsnitt av alla fordon som har bidragit till den. Detta gör tillvägagångssättet mindre gångbart som primär informationskälla i autonomt körande fordon. Ett möjligt sätt att förbättra de sensorbaserade metoderna för friktionsuppskattning i fordon skulle kunna vara att tillämpa maskininlärning på stora mängder uppmätta sensordata, förutsatt att referensfriktionsdata av hög kvalitet finns tillgängliga. Liknande datadriven algoritmutveckling tillämpas på andra aspekter av utveckling av autonoma fordon. Syftet med detta projekt har därför varit att utveckla en metod för att erhålla sådana högkvalitativa referensfriktionsdata och tillämpa den på ett fåtal utvalda däck.

## 4 Syfte, forskningsfrågor och metod

Syftet med detta projekt är att använda den kommersiella vägfriktionsmätare som VCC har införskaffat och via testbanemätningar fastställa korrelationen mellan friktionsvärden från denna enhet och en personbil, målfordonet (MF), utrustad med olika vinterdäck på olika vägfriktionsförhållanden. Utöver själva mappningen, vilken kommer att vara användbar för VCC i kommande utveckling av fordonsegen friktionsestimator, så var ett annat syfte att utveckla en kostnadseffektiv öppen metod för att utföra framtida mappningar av detta slag. Tillgänglig friktion kommer också att mätas med VTI:s mobila däckprovningstrustning BV12.

Mappningen är tänkt att användas vid körning på vanlig väg, där MF och vägfriktionsmätaren kör i kolonn och de kontinuerligt uppmätta vägfriktionsvärdena omvandlas via mappningen till referensfriktionsvärden som är representativa för MF. En trådlös kommunikation mellan vägfriktionsenheten och MF har installerats så att referensfriktionen kan loggas synkront tillsammans med andra sensordata i bilen. Dessutom har ett system för att underlätta målfordonets sidoposition efter vägfriktionsanordningen utvecklats och testats, för att säkerställa att hjulspåren på personbilen och vägfriktionsanordningen är desamma. Mappningsfunktionen kommer att möjliggöra insamling av stora datamängder från mätningar på verkliga vägar som kan användas för datadriven utveckling som maskininlärning, vilket är den avsedda användningen av enheten av VCC.

Den tillgängliga friktionen för ett målfordon som är utrustat med specifika däck skulle lättast kunna bestämmas genom direkta bromstester på en provningsbana med homogen yta. Ytterligare information om den tillgängliga friktionen för ett specifikt däck kan erhållas med hjälp av mobil däckprovningstrustning såsom VTI:s BV12. BV12 (se Figur 3) är en mobil utrustning för däckfriktionskaraktisering, som kan mäta både längsgående och laterala friktionsslipkurvor för däcken för att bestämma maximal tillgänglig friktion vid olika driftförhållanden. I teorin skulle friktionsmodeller baserade på slipkurvor uppmätta vid olika hjullaster kunna tillämpas på olika målfordon som använder samma däck, vilket skulle utöka användningsfallen för en specifik

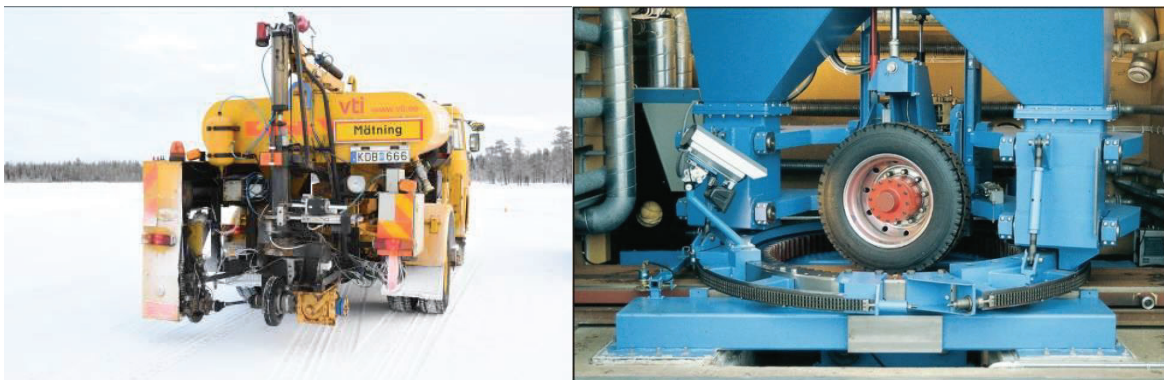
däckmappning. Till skillnad från bromstester så utförs mätningar av slipkurvor vid en konstant hastighet, vilket ger förbättrade möjligheter att uppskatta friktionens hastighetsberoende.

En central del av projektet utgörs därför av mätkampanjer på testbanor. För att begränsa antalet mätningar beslutades att endast fokusera på längsgående bromsfriktion. Två veckolånga mätkampanjer var tänkta att utföras på snö- och isbanor i norra Sverige. De tre mätutrustningarna (vägfriktion, målfordon samt BV12) kördes i följd på testbanorna, något förskjutna i sidled för att undvika varandras hjulspår. Utomhusmätningar på is är vanligtvis problematiska på grund av snabba förändringar av isfriktionen som svar på väderförändringar. Mätningar utförda inom en tidsram på 5 minuter kan dock anses vara parvis jämförbara, vilket var en utgångspunkt vid planering av testerna.

En utmaning är att åstadkomma testbanor med olika typer av väglag för att täcka upp olika förekommande vinterväglag i Sverige, från de halaste till de med högst friktion. Lösa underlag som snömodd och slask är dock väldigt svåra att åstadkomma på ett homogent och repeterbart sätt på en större testbana. I praktiken är man begränsad till isytor (släta eller ruggade) samt packade snöbanor. Professionella testbanor i Norra Sverige och Finland har ofta stor erfarenhet av hur man preparerar banor på bästa sätt, men saknar verktygen för att göra mindre förändringar av friktionen för exempelvis en isbana. Det stod därför klart från början att vi behövde få tillverkat specifik utrustning för detta, vars funktion var baserad på mångårig erfarenhet från däcktillverkare. I slutändan har dock aktuella väderförhållanden en väldigt stor inverkan på testbanornas egenskaper, vilket måste tas hänsyn i planeringsfasen. Speciellt viktigt är det att inte lägga alla mätningar i en och samma tidperiod, samt att planera för dagar med dåligt väder då mätningar inte kan utföras. I detta projekt fanns också möjligheten att utföra vissa mätningar på is i VTI:s stationära däckprovsningsanläggning (se Figur 3). Här kan isens kvalitet hållas jämn under lång tid och lämpar sig därför för studier av inverkan av hjullast och lufttryck i däcken, där parallella mätningar med vägfriktionsmätaren inte behöver utföras.

Huvudsakliga forskningsfrågor var:

- Mappning på is respektive snö
- Är det en fundamental skillnad mellan mappningar på snö jämfört med is, så att utöver ett uppmätt vägfriktionsvärde så behövs ytterligare väglagsinformation för att kunna genomföra mappningen?
- Uppvisar mappningen fundamentala skillnader mellan olika typer av vinterdäck (dubbdäck, dubbfria vinterdäck av nordisk, respektive centraleuropeisk typ)?
- Inverkan av hastighet på mappningen
- Inverkan av hjullast och däcktryck för målfordonets friktion
- Hur väl går mappningen att utföra med enbart bromstester, utan tillgång till däckprovsningsutrustning?
- Hur påverkas vägfriktionsmätningen vid kurvkörning?



*Figur 3. VTI:s mobila och stationära däckprovsningsutrustningar.*

## 5 Mål

Ett uttalat mål med projektet var att främja samarbete med ett forskningsinstitut inom ett etablerat område och en ny industrigren som arbetar inom ett framväxande område. Det nya samarbetet var tänkt att gynna båda organisationerna med nya insikter och arbetssätt. Dessutom skulle projektet påskynda den datadrivna utvecklingen inom detta område och därmed öka konkurrenskraften. Detta genom att tillhandahålla en metod och för insamling av relevant referensfriktionsdata som kan användas för träning och validering av datadriven algoritmutveckling, såväl som traditionella algoritmbaserade friktionsestimater. Projektet skulle på ett direkt sätt angripa ett huvudproblem inom ett område som är en deal-breaker för autonoma fordon, nämligen att bestämma friktionen mellan däck och väg.

Ursprungligen var det tänkt att metoden skulle omfatta både vinterväglag och sommarväglag, där friktionsmappningar skulle tas fram för tre utvalda däck. Det stod dock tidigt klart att VCC:s vägfriktionsmätare var begränsad till att mäta friktionsnivåer upp till 0,5. Projektet valde då att enbart fokusera på vinterväglag, men att försöka omfatta väglag med friktionsnivåer som i så hög grad som möjligt täckte vägfriktionsmätarens mätområde. Dessa mappningar kan sedan användas av VCC för kontinuerlig datainsamling på verkliga vägar, med för olika personbilar med gemensamma däckdimensioner. Mappningarna kommer att vara applicerbara på de specifika däckmodeller som har använts i projektet (tre olika vinterdäck – ett dubbat och två dubbria), men med en etablerad, öppen offentlig metod kan kartläggning av ytterligare däckmodeller genomföras senare vid behov. Nya däckkartläggningar kan utföras av flera andra organisationer och företag utöver VTI och VCC, eftersom utrustningen som används inte är unik. Det bör dock betonas att mappningen av de tre däck som genomfördes i detta projekt gör det möjligt för VCC att utföra en stor mängd tester och utveckling av sina friktionsuppskattnings-algoritmer för de fordonsmodeller som använder däck i dessa dimensioner.

## 6 Resultat och måluppfyllelse

Den använda vägfriktionsmätaren (Road Friction Detector - RFD) är en släpvagn från den norska tillverkaren ViaFriction, och just denna modell används ofta för rutinemässig friktionsbedömning av vintervägar i Sverige. Den är utrustad med två mätjul, ett i varje hjulspår. Testdäck av typen Trelleborg Unitester 520 användes, vilket är det standardtestdäck som ska användas för friktionsmätningar på vinterväg enligt den metodbeskrivning som Transportstyrelsen föreskriver. Hjullasten är inställd på 1000 N och mätningen ska utföras vid ett fast bromsslip på 20 %. Vanligtvis använder vägfriktionsutrustning av denna typ, som mäter den längsgående friktionen för ett bromsat hjul, ett mekaniskt växelsystem för att ge ett mycket stabilt hjulslip oavsett vägfriktion. Just denna RFD använder dock istället en elmotor för varje testhjul som kontinuerligt reglerar hjulslipet. Det visade sig att hjulslipet i många fall inte var helt stabilt och det var därför nödvändigt att se till att erhållna mätdata uppfyllde kraven på hjulslip.

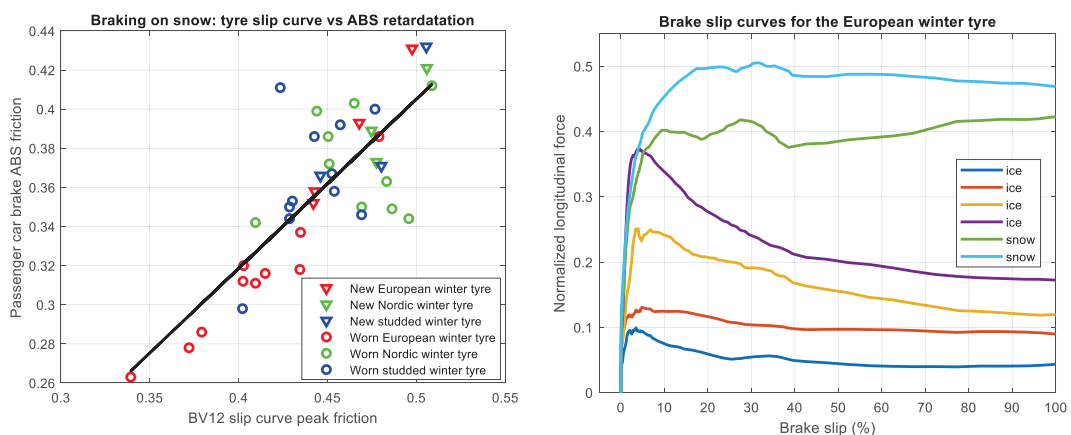
Tre olika vinterdäck valdes ut för målfordonet, en Volvo XC60: ett europeiskt vinterdäck, ett nordiskt vinterdäck och ett dubbat vinterdäck. Testbanorna förbereddes så att friktionsnivåerna med RFD låg inom 0,05 - 0,45. Mätningar utfördes för att möjliggöra mappningar vid olika fordonshastigheter, hjullaster och däcktryck. En optisk sensor från Teconer [5] användes också för att skilja mellan is- och snöyta om denna information skulle behövas för mappningen.

Testbanorna var rektangulära, vanligtvis 20 m breda med en längd på 600 – 1000 meter. Banor med packad snö gjordes tillgängliga av däcktillverkaren Pirelli och förbereddes enligt deras expertis för att möjliggöra repeterbara tester. Banor med olika hårdhet på snön användes i syfte

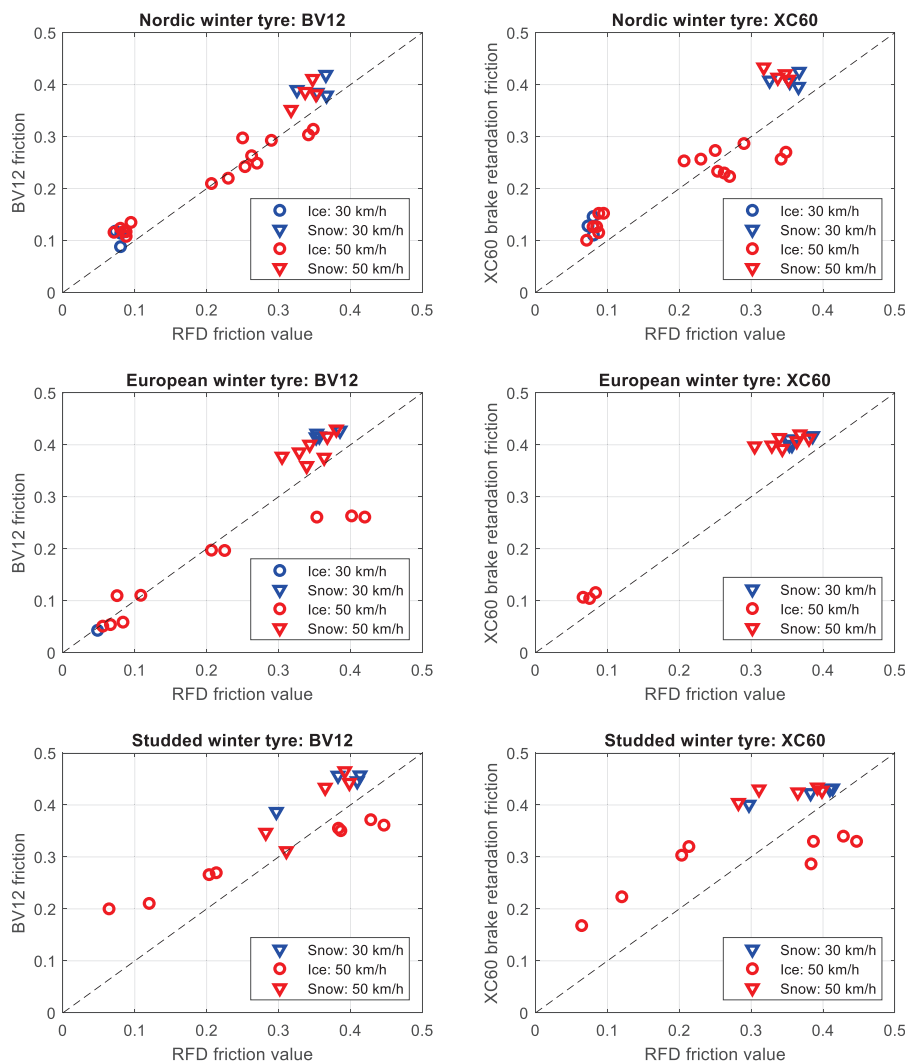
att täcka en rad tillgängliga friktioner. Snö på den här typen av testbanor är i allmänhet mycket hårdare än de förhållanden som ofta finns på vägarna, och uppvisar följaktligen ganska höga friktionsnivåer. Snöhårdheten låg i intervallet 82 – 90 CTI-enheter (se ref [6] för en definition av snöhårdhet), och lufttemperaturen varierade från +2 till -6 °C, med snötemperaturen några grader kallare. De RFD-uppmätta friktionsvärdena varierade mellan 0,28 – 0,44. Isbanorna delades in i parallella korridorer, 3 m breda och 300 meter långa, som kunde prepareras på olika sätt för att möjliggöra olika preparering. En speciell isruggande slävagn med 10 dubbdäck som rullar med stora slipvinklar konstruerades för att omvandla en slät is med låg friktion till grov is med olika friktionsnivåer. I kombination med stora vädervariationer erhöles isytter med RFD-friktionsnivåer i intervallet 0,05 – 0,45.

För att få en funktionell konvertering av en bromsslipkurva på snö till den genomsnittliga friktionen som erhålls vid full ABS-bromsning med en personbil, studerades icke-analyserad data från ett tidigare projekt [7]. Bromstester på snö utförda med både BV12 och en personbil för mer än 40 olika däck indikerar ett nära samband mellan slipkurvans peakfriktion och den genomsnittliga ABS-retardationen, vilket som visas i Figur 4. En lineupskattning tyder på att den erhållna ABS-friktionen är ca 85 % av bromsslipkurvans peakvärde på denna typ av hårt packad snöyta. Detta samband användes i analysen av det aktuella projektet, och en generellt god överensstämmelse mellan BV12 och XC60 resultat tyder på att det fungerar bra, trots en annan bil och olika testbanor. Eftersom slipkurvor på snö är ganska flacka, vilket framgår av Figur 4, är det inte förvånande att peakvärdet är en bra indikator på den uppnåeliga ABS-bromsfriktionen. Slipkurvor på is har i allmänhet en ganska tydlig peak vid låga bromsslipvärden, där friktionen minskar markant vid högre slip. För att uppskatta ABS-bromsfriktionen på is användes integralen av slipkurvan inom ett fast slipintervall. Som utgångspunkt användes intervallet 5 – 55 %, med möjlighet att justera intervallet efter jämförelser med XC60-resultaten.

Data från de två mätkampanjerna presenteras i Figur 4, där det genomsnittliga RFD-friktionsvärdet för båda hjulspåren jämförs med resultaten från BV12 och XC60. Initiala mätningar utfördes vid både 30 och 50 km/h, men eftersom ingen tydlig skillnad observerades vid dessa hastigheter gjordes majoriteten av mätningarna vid 50 km/h. Mest data samlades in för det nordiska vinterdäcket, där både BV12 och XC60 visar en liknande bild. RFD underskattar den tillgängliga friktionen vid mycket hal is såväl som för packad snö, medan den ger ett bra estimat vid mellanliggande isfriktionsnivåer. Data för det europeiska vinterdäcket visar ett liknande beteende, men det europeiska vinterdäcket har lägre prestanda på hal is jämfört med det nordiska däck, vilket leder till en god överensstämmelse med RFD även vid låg friktion.



Figur 4. Korrelation mellan slipkurvans peakfriktion och ABS-bromsfriktion på snö (vänster). Typiska bromsslipkurvor på is och snö för det Europeiska vinterdäcket (höger).



Figur 5. RFD-friktionsvärden jämfört med uppskattad bromsfriktion från BV12-mätningar och bromstester med XC60.

En intressant anomali för is med mycket hög friktion observerades för BV12-data: Denna speciella isbana var täckt av ett lager av frost vilket resulterade i extremt höga RFD-värden, vilket tydligt överskattade bromsfriktionen för det europeiska däck. Tyvärr var XC60 inte tillgänglig för mätningar med detta däck på denna isbana, men resultaten för dubbdäcken visar ett liknande beteende för både BV12 och XC60 på denna isyta med hög friktion. Som förväntat ger dubbdäcket i allmänhet ett bättre grepp på is jämfört med de andra däcken (liksom RFD) på alla andra isytor, samtidigt som det presterar i nivå med de dubbfria däcken på snö.

Slutsatsen är att två olika mappningar verkar behövas vid RFD-friktionsnivåer över 0,3 - en för snö och en för is. Således skulle information om vägförhållandena vara nödvändig. En teknik som använder en optisk sensor för att skilja mellan is och snö har testats i detta projekt, och även om resultaten på homogena testbanor är lovande, behövs ytterligare tester för att kunna avgöra om den är effektiv på riktiga vintervägar, där en blandning av is och snö är vanligt förekommande.

Mätningar vid olika hjulbelastningar ( $\pm 50\%$ ) med BV12 visade en mycket liten effekt av hjullasten på bromsfriktionen på snö. Mätningar på is i VTI:s stationära däckprovsningsanläggning indikerar att inverkan av varierande hjullast är liten även på is. Även förändringar i däcktrycket  $\pm 0,4$  bar från grundtrycket 2,6 bar hade en marginell effekt på friktionen på både snö och is.

För att undersöka hur mätning med RFD påverkas av att köra i kurva så gjordes en jämförelse med RFD när den körs rakt fram respektive längs ett slalommonster som resulterar i en sidoacceleration på 0,1 g. Denne jämförelse genomfördes på olika isunderlag och generellt så konstaterades att vid en kurvtagning med en sidoacceleration på 0,1 g så minskar RFD-friktionsvärdet med 10 %. Sidoaccelerationen 0,1 g valdes då de svenska vägarna är konstruerade så att denna sidoacceleration uppnås i kurvorna vid körning efter skyltad hastighet.

Resultaten indikerar att en mappning går att genomföra utan dedikerad däckfriktionsutrustning genom att utföra bromstester med normallastad MF, vilket gör metoden praktiskt genomförbar för ett större antal utvecklare av friktionsestimeringsmetoder. Vi fann att av praktiska skäl bör en enskild testbana vara uppemot 300 meter lång och minst 3 meter bred. En enskild mätning, vilken omfattar tre upprepade mätningar med RFD, och minst tre fullständiga bromstester med MF till stillastående, tar ca 5 minuter att utföra. Alternativt utförs kortare bromsningar med ABS-inverkan, där hastighetsintervallet är mindre. I gengäld så behövs ett större antal bromsningar för att få ett mätvärde med hög noggrannhet. Den stora utmaningen är att skapa testbanor med olika nivåer av friktion, från lägsta till högsta. Testerna utförda i projektet visar att det är möjligt att täcka in ett adekvat friktionsområde med banpreparering utförd av erfaren personal, samt specialutvecklad friktionshöjande utrustning för att rugga is. Väderförhållanden har dock väldigt stor påverkan och måste tas med i planeringen för denna typ av tester.

Sammanfattningsvis visar resultaten av de omfattande fälttesterna på is och snö att en dedikerad vägfriktionsmätare kan vara ett användbart verktyg för att kontinuerligt mäta tillgänglig bromsfriktion på vintervägar för ett specifikt fordon och däck, men den uppmätta friktionsnivån med RFD bör justeras för olika däcktyper. Data indikerar att en modell med bitvisa linjära avbildningar skulle kunna användas, men ytterligare information om vägytan för att särskilja is- och snöbelagda vägar vid RFD-friktnionsnivåer över 0,3 skulle behövas. En viktig erfarenhet från projektet är också att en RFD med fast mekanisk styrning av slipet är att föredra framför motorstyrda på grund av den högre slipstabiliteten och därmed en högre andel godkända mätdata.

Den utförda mappningen av de tre däck som genomfördes i detta projekt gör det nu möjligt för VCC att utföra en stor mängd referensmätningar av friktion på verklig väg att använda som grunddata vid utveckling av sina friktionsestimerings-algoritmer.

De mål som sattes upp för projektet har uppfyllts. Utveckling av metoder för att möjliggöra insamling av data genom kontinuerlig loggning av väglag och mappning till verkliga förhållanden för ett givet fordon är ett nödvändigt steg för vidareutveckling av vägavkänningsfunktioner, och möjliggör i slutändan autonomt körande fordon med högre SAE-nivå. Tillgängliggörandet av fordonsrelevant vägtillståndsdata kommer att öka den svenska kapaciteten för forskning och innovation och därmed säkerställa konkurrenskraft och arbetstillfällen inom fordonsindustrin genom att möjliggöra en konkret plattform för att testa och utveckla idéer. På grund av den globala bristen på denna typ av data kommer detta också att möjliggöra utveckling av internationellt sammanlänkade och konkurrenskraftiga forsknings- och innovationsmiljöer i Sverige. Mer specifikt identifieras loggning och datainsamling i stor skala (Big-Data) som en viktig komponent i trenden för att möjliggöra den förutspådda framtiden för datadrivna och maskininlärningsmetoder, se 4.1 i [8]. Massiv loggning av fältdata identifieras också i samband med intelligenta och tillförlitliga system.

## Referenser:

- [1] Gustafsson M. et al. (2006). *Effekter av vinterdäck – en kunskapsöversikt*. VTI rapport 543.
- [2] Albinsson A. (2018). *Online and Offline Identification of Tyre Model Parameters* Doktorsavhandlingar vid Chalmers tekniska högskola. Ny serie: 4401. ISBN 978-91-7597-720-1.
- [3] Olsson, G. et al. (2007). *Road friction estimation. Technical report*, IVSS project 2004: 17750, 2007.
- [4] Andersson, M. et al. (2010). *Road friction estimation part II. Technical report*, IVSS project 2004: 17750, 2010.
- [5] [Surface condition and friction measurements - Teconer Oy](#), accessed at 12 Jan, 2024
- [6] ASTM F-1805. "Standard Test Method for Single Wheel Driving Traction in a Straight Line on Snow- and Ice-Covered Surfaces"
- [7] M. Hjort, O. Eriksson, F. Bruzelius. "Comprehensive Study of the Performance of Winter tires on Ice, Snow and Asphalt Roads: The Influence of Tire Type and Wear". *Tire Science and Technology, TSTCA*, Vol. 45, No. 3, July-September 2017. Pp. 175-199
- [8] "Strategisk färdplan INOM SATSNINGEN FORDONSSTRATEGISK FORSKNING OCH INNOVATION (FFI) Elektronik, mjukvara och kommunikation", 2019-02-04. Vinnova
- [9] Hjort M., Bruzelius F., Kharrazi S., Yang D. *A method for obtaining reference friction values for validation of road friction estimation algorithms*. Proceeding at AVEC 2024, the 16th International Symposium on Advanced Vehicle Control, September 2-6, 2024, Milan, Italy.



## 7 Spridning och publicering

### 7.1 Kunskaps- och resultatsspridning

Hur har/planeras projektresultatet att användas och spridas?	Markera med X	Kommentar
Öka kunskapen inom området	X	Kunskap sprids dels internationellt genom presentation på en av de större vetenskapliga konferenserna inom området, samt nationellt genom denna publika rapport..
Föras vidare till andra avancerade tekniska utvecklingsprojekt	X	Projektresultaten har redan förts vidare till andra avancerade tekniska utvecklingsprojekt inom VCC.
Föras vidare till produktutvecklingsprojekt	X	Projektresultaten har redan förts vidare till produktutvecklingsprojekt inom VCC.
Introduceras på marknaden		Framtida VCC-produkter på marknaden kommer att kunna dra nytta av projektresultaten, men inte inom tidsramen för projektet.
Användas i utredningar/regelverk/ tillståndsärenden/ politiska beslut		

### 7.2 Publikationer

Hjort M., Bruzelius F., Kharrazi S., Yang D. *A method for obtaining reference friction values for validation of road friction estimation algorithms*. Proceeding at AVEC 2024, the 16<sup>th</sup> International Symposium on Advanced Vehicle Control, September 2-6, 2024, Milan, Italy.

## 8 Slutsatser och fortsatt forskning

Resultaten visar tydligt att en dedikerad vägfriktionsmätare kan vara ett användbart verktyg för att kontinuerligt mäta tillgänglig bromsfriktion på vintervägar för ett specifikt fordon och däck, men den uppmätta friktionsnivån med RFD bör justeras för olika däcktyper. Ett sådant referensfriktionsvärde är tidigare saknad viktig komponent för framtida utveckling av fordonsegna friktionsestimatorer med hjälp av datadrivna metoder. Fortsatt forskning kommer att fokusera på just förbättring av den interna friktionsestimatorn baserat på referensfriktionsdata uppmätt med den utvecklade metoden. Relevanta frågeställningar rör hur molnbaserade friktionsestimat kan dra nytta av dessa mappningar, samt hur man ska beskriva tillgänglig friktion i lateral led. Den maximalt tillgängliga friktionen i sidled må vara i samma storleksordning som den longitudinella ABS-friktionen, men på isiga vägar är det i praktiken svårt att fullt utnyttja maxfriktionen då friktionen snabbt minskar med allt för stora styrvinklar.

## 9 Deltagande parter och kontaktpersoner

### Statens väg och transportforskningsinstitut – VTI:

Mattias Hjort, forskningsledare, mattias.hjort@vti.se

Sogol Kharrazi, senior forskare, sogol.kharrazi@vti.se

### Volvo personvagnar AB:

Derong Yang, Technical Expert, Vehicle Motion and Control, derong.yang@volvocars.com