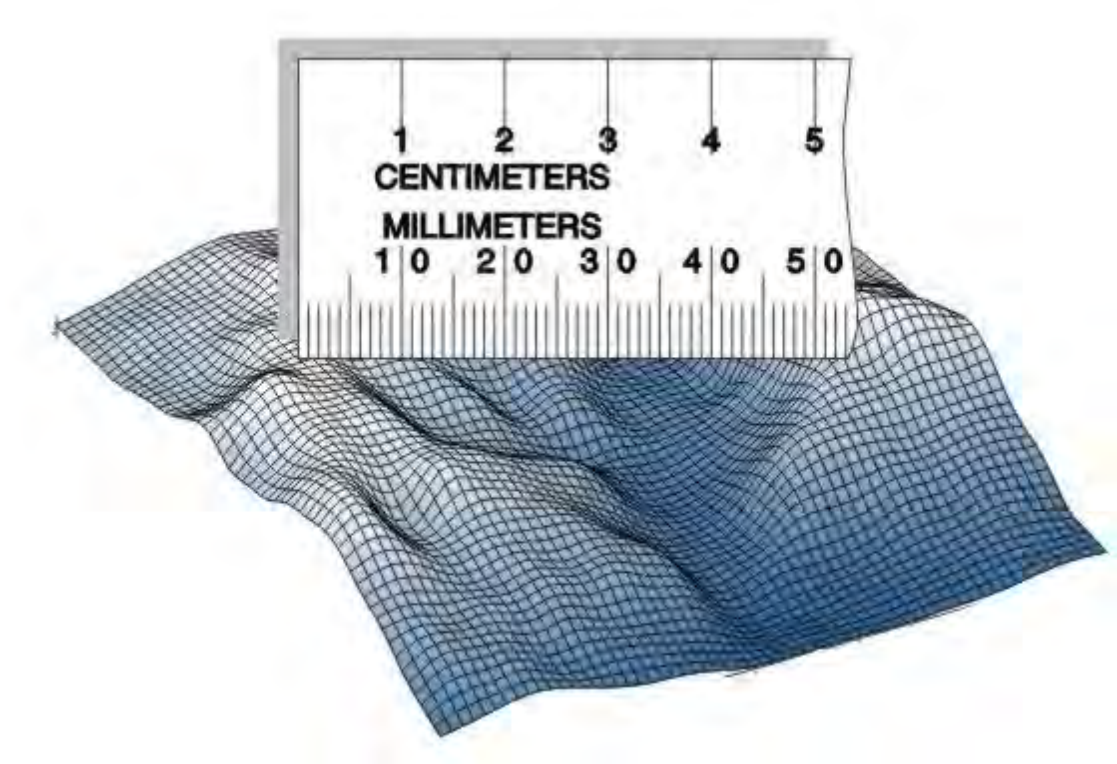
VTI rapport 475 · 2002

Mätning av vägytans longitudinella jämnhet – metoder och nödvändig noggrannhet

Georg Magnusson
Sven Dahlstedt
Leif Sjögren



Väg- och transport-
forskningsinstitutet

VTI rapport 475 · 2002

Mätning av vägytans longitudinella jämnhet – metoder och nödvändig noggrannhet

Georg Magnusson
Sven Dahlstedt
Leif Sjögren

Väg- och transport-
forskningsinstitutet

Omslag: Leif Sjögren, VTI

Utgivare:

Väg- och transportforskningsinstitutet
581 95 Linköping

Publikation:
Rapport 475

Utgivningsår: 2002

Projektnummer: 80250

Projektnamn:
Vägytemätning, metoder och nödvändig noggrannhet

Författare:
Georg Magnusson, Sven Dahlstedt och Leif Sjögren

Uppdragsgivare:
KFB/VINNOVA och VV

Titel:
Mätning av vägytans longitudinella jämnhet – metoder och nödvändig noggrannhet

Referat

Upphandling av vägbyggnadsuppdrag förskjuts alltmer mot s.k. entreprenader med funktionsåtaganden. Det innebär bl.a. att kraven på vägytans jämnhet bör återspegla vägytans förmåga att, med minsta möjliga inverkan på den miljö som omger vägen, på godtagbart sätt tjäna trafikanten och minimera väghållarens underhållskostnader. Jämnhetsmätetal som beskriver vägytans tjänlighet i dessa avseenden saknas i stort sett. Det är sannolikt att kopplingen mellan vägojämnheten och olika sådana mätetal är av varierande styrka, vilket betyder att noggrannhetskraven vid vägytemätning beror av ändamålet med mätningen. Tidigare forskning om olika trafikant-, väghållar- och miljöeffekter av vägytans egenskaper har emellertid, så vitt bekant, aldrig uppmärksammat frågan om vilken mätnoggrannhet som i det enskilda fallet erfordras för att få kännedom om vägytans egenskaper, baserade på prediktioner av sådana effekter.

Överväganden rörande erforderlig noggrannhet vid mätning av vägprofiler fordrar tillgång till ett relativt stort urval av realistiska vägprofiler med olika jämnhetsnivå och olika våglängdssammansättning. Det var därför nödvändigt att inom projektet tillskapa en databas innehållande sådana vägprofiler uppmätta med känd och hög noggrannhet. Redan etablerade samband mellan vägojämnhet och olika därtill relaterade effekter är i stor utsträckning baserade på mätresultat från existerande vägprofilmätare av höghastighetstyp. För att kunna bedöma värdet av dessa samband måste sålunda undersökas om existerande profilmätare besitter, för dessa olika mätningsändamål, erforderlig mätnoggrannhet. Mätdata från sådan mätare vid mätning på dessa kända vägprofiler måste därför insamlas.

ISSN:	**Språk:**	**Antal sidor:**
0347-6030	Svenska	80 + 4 Bilagor

Publisher:

Swedish National Road and Transport Research Institute
SE-581 95 Linköping Sweden

Publication:
Rapport 475

Published:
2002

Project code:
80250

Project:
Measurement of the longitudinal unevenness of a road surface: methods and requirements on accuracy

Author:
Georg Magnusson, Sven Dahlstedt and Leif Sjögren

Sponsor:
KFB/VINNOVA och VV

Title:
Measurements of the road surface longitudinal unevenness – methods and necessary accuracy

Abstract

Road Administration's procurement for road building projects is shifting increasingly towards function-based contracts. This means that the requirements on the evenness of a road surface must reflect the capacity of the surface to serve the road user satisfactorily and with minimal impact on the local environment, while minimising costs for the road authority. In general, there are virtually no evenness indexes describing the serviceability of a road surface in these respects. It is probable that the connection between road evenness and such indexes is of varying strength, which means that the requirements on accuracy in road surface measurement are dependent on the purpose of the measurements. However, earlier research into road user, road authority and environmental effects of road surface characteristics has paid no attention to the issue of what accuracy is required in each case in order to study road surface characteristics and enable the prediction of such effects.

Decisions regarding the accuracy required in measuring road profiles demand access to a relatively large sample of realistic road profiles with different evenness levels and spectral composition. Therefore, it was necessary to create a database within the project containing road profiles that had been measured with a known high level of accuracy. Established relations between road evenness and various related factors are largely based on measurements from existing road profilometers of the high-speed type. In order to estimate the value of these relations, it was therefore necessary to investigate whether existing profilometers offer the measuring accuracy required for these purposes. Data obtained from known road profiles with the aid of such equipment were thus collected.

ISSN:	**Language:**	**No. of pages:**
0347-6030	Swedish	80 + 4 Appendices

Förord

Projektet *Vägytemätning, metoder och nödvändig noggrannhet* initierades av Georg Magnusson som hos Kommunikationsforskningsberedningen (KFB) ansökte om medel till detta projekt. Samtidigt ansökte Jon Erlingsson om projekt för *Matematisk beskrivning av vägprofiler respektive vägytor*. KFB ansåg att dessa skulle genomföras i ett och samma projekt. Diskussioner fördes mellan KFB och Vägverket om samfinansiering. KFB, VV och VTI möttes i maj 1997 för att slutligt fastställa fördelningen mellan finansiärerna. Projektet planerades pågå under fyra år.

Georg Magnusson har varit projektledare fram till sin pension sista februari, 2001. Gudrun Öberg tog då över det administrativa projektledarskapet medan Leif Sjögren var den tekniske projektledaren. Sven Dahlstedt har lett delprojektet *Bedömd vägojämnhet på vägar med låga IRI-värden.* Eftersom Jon Erlingsson slutade vid VTI strax efter beviljandet av projektet har den *matematiska beskrivningen* genomförts av Georg Magnusson och Peter Andrén. De fyra nämnda personerna med projektledaren i spetsen har svarat för de största insatserna i projektet. Många övriga personer har medverkat. Några har då gjort större insatser och där kan ytterligare nämnas Björn Björnsson, Stig Englund, Inger Forsberg och Thomas Lundberg vid inmätning av vägsträckor och vid bedömning av vägytor. De två sistnämnda har även medverkat vid analys av data. En stor del av projektet är genomfört i samband med det av FEHRL arrangerade Filterprojektet. VTI deltog där och ansvarade för referensmätningarna. Gunilla Sjöberg har svarat för slutredigeringen av rapporten.

Projektet har resulterat i fyra publikationer varav denna är huvudrapporten. De övriga rapporterna är:

VTI rapport 474, 2001 *Bedömd vägojämnhet på vägar med låga IRI-värden* av Sven Dahlstedt

VTI Notat 39-2001 *An Explanation to the VTI Filter* documents av Peter Andrén och Leif Sjögren

VTI Notat 41-2001 *Matematisk beskrivning av vägytor och longitudinella vägprofiler* av Georg Magnusson och Peter Andrén.

Ett stort tack riktas till samtliga som bidragit till att projektet har gått att genomföra.

Linköping i februari 2002

Gudrun Öberg

Innehållsförteckning Sid

Sammanfattning **11**

Summary **15**

1 Bakgrund **18**
1.1 En bakgrundsbeskrivning om vägojämnheter – mätning och upplevelse 19
1.2 Avvägningen kvalitet–kostnad 21
1.3 Definitioner 22

2 Metod **25**
2.1 Litteraturstudier 25
2.2 Egna fältmätningar 25
2.3 FILTER-experimentet 26

3 Tillgänglig noggrannhet **28**
3.1 Litteraturstudie 28
3.2 EVEN/FILTER-experimentet 42
3.2.1 Referensprofilmätningar 42
3.2.2 Höghastighetsprofilometri 43
3.3 Resultat från FILTER projektet 49
3.3.1 Bakgrund 49
3.3.2 Slutsats 50

4 Erforderlig noggrannhet **54**
4.1 Bedömd vägojämnhet på vägar med låga IRI-värden 54
4.1.1 Undersökningsmetod 54
4.1.2 Resultat 58
4.1.3 Sammanfattande kommentarer 67
4.2 Fordonsslitage 68
4.3 Vägpåkänning 72

5 Rekommendationer för fortsatt forskning **76**
5.1 Upplevelse av vägojämnhet (åkkomfort) 76
5.2 Fordonsslitage 76
5.3 Vägpåkänning 77
5.4 Ytterligare analys av data insamlade i detta projekt 77

6 Referenser **78**

Bilagor

Bilaga 1: Mätsträckor vid de egna fältmätningarna

Bilaga 2: IRI

Bilaga 3: Utrustning för referensprofilmätning

Bilaga 4: Höghastighetsprofilometri

Figurförteckning Sid

Figur 1 Inverkan av accelerometerlutning på utsignalen. **34**
Figur 2 Förväntat fel i IRI som funktion av samplingsintervallets längd (Karamihas et al. 1999). **40**
Figur 3 Inverkan av lagringsintervallets längd på IRI vid profilmätning med samplingsintervallet 25 mm (Karamihas et al. 1999). **41**
Figur 4 Fel i IRI förorsakat av fel i distansmätning (Karamihas et al. 1999). **41**
Figur 5 Vägprofilspektrum (ISO Standard 8608). **44**
Figur 6 Jämnhetsklassificering enligt ISO 8608. **45**
Figur 7 95-percentilvärdet av det absoluta procentuella felet hos IRI för olika samplingsintervall i område 1, 0 till 512,0 mm. Vägar med jämnhetsklass A enligt ISO 8608. **46**
Figur 8 95-percentilvärdet av det absoluta procentuella felet hos IRI medelvärdesbildat över 100 mm. Vägar med jämnhetsklass A enligt ISO 8608. **47**
Figur 9 95-percentilvärdet av det absoluta procentuella felet hos IRI för olika medelvärdessträckor. Vägar med jämnhetsklass A enligt ISO 8608. **48**
Figur 10 95-percentilvärdet av det absoluta procentuella felet hos IRI för olika jämnhetsklasser och brusnivåer. **49**
Figur 11 IRI per mätare (1–33) och sträcka (0–2). **50**
Figur 12 IRI per sträcka inklusive konfidensintervall och referens. **51**
Figur 13 IRI per sträcka inklusive konfidensintervall och referens ( ), för GM-profilometrar. **51**
Figur 14 IRI per sträcka inklusive konfidensintervall och referens ( ), för rätskenemetoden. **52**
Figur 15 Bedömningssträckorna fördelade efter jämnhet. **55**
Figur 16 Vägojämnhet i **personbil** bedömd av 22 personer för 45 olika teststräckor i förhållande till en referenssträcka med IRI=6,24 (r=0,735). **58**
Figur 17 Vägojämnhet i **lastbil** bedömd av 22 personer för 45 olika test-sträckor i förhållande till en referenssträcka med IRI=6,24 (r=0,773). **59**
Figur 18 Genomsnittsbedömningar beräknat över 22 personer för upplevd ojämnhet hos 45 olika vägsträckor i personbil. (r=0,961). **59**
Figur 19 Genomsnittsbedömningar beräknat över 22 personer för upplevd ojämnhet hos45 olika vägsträckor i **lastbil**. (r=0,968). **60**
Figur 20 Medelbedömningar och 95 % konfidensintervall för klassindelade delsträckor med IRI-värden under 2,5. Resultat från **personbil**, 22 bedömningar per delsträcka, antal delsträckor i varje klass enligt siffran över stapeln. **61**
Figur 21 Medelbedömningar och 95 % konfidensintervall för klassin-delade delsträckor med IRI-värden under 2,5. Resultat från **lastbil**, 22 bedömningar per delsträcka, antal delsträckor i varje klass enligt siffran över stapeln. **62**

Figur 22 IRI och RMS-värden för teststräckorna **14** och **23** samt sammanfattning av de närmast föregående teststräckorna med IRI mellan 2,0 och 2,5.
RMS1 = 10–20 Hz,
RMS2= 4–10 Hz, RMS3 = 1–4 Hz. **64**
Figur 23 Framhjulsaccelerationer uppmätta i personbil Volvo 245 och i lastbil Scania 94 som funktion av vägojämnheten uttryckt i IRI. **70**
Figur 24 Framhjulsaccelerationer uppmätta i personbil Volvo 245 och i lastbil Scania 94 som funktion av vägojämnheten i våglängdområdet 1–2 m motsvarande frekvensområdet 10–20 Hz vid färdhastigheten 70 km/h. **70**
Figur 25 Framhjulsaccelerationer uppmätta i personbil Volvo 245 och i lastbil Scania 94 som funktion av vägojämnheten i våglängdområdet 2–5 m motsvarande frekvensområdet 4–10 Hz vid färdhastigheten 70 km/h. **71**
Figur 26 Framhjulsaccelerationer uppmätta i personbil Volvo 245 och i lastbil Scania 94 som funktion av vägojämnheten i våglängdområdet 5–20 m motsvarande frekvensområdet 1–4 Hz vid färdhastigheten 70 km/h. **71**
Figur 27 Framhjulsaccelerationer uppmätta i personbil Volvo 245 och i lastbil Scania 94 som funktion av vägojämnheten i våglängdområdet 20–50 m motsvarande frekvensområdet 0,4–1 Hz vid färdhastigheten 70 km/h. **72**
Figur 28 DLC som funktion av vägytans jämnhet uttryckt i IRI. **73**
Figur 29 DLC och som funktion av vägojämnheten i våglängdområdet 1–2 m motsvarande frekvensområdet 10–20 Hz vid färdhastigheten 70 km/h. **74**
Figur 30 DLC och som funktion av vägojämnheten i våglängdområdet 2–5 m motsvarande frekvensområdet 4–10 Hz vid färdhastigheten 70 km/h. **75**

Tabellförteckning Sid

Tabell 1	Studerade våglängdsområden.	**26**
Tabell 2	Upplösningskrav för höjdmätare i höghastighetsprofilometrar.	**28**
Tabell 3	Precisionskrav (noggrannhetskrav?) för vägprofiler uppmätta med höghastighetsprofilometrar.	**28**
Tabell 4	Gränsvärden för systematiska fel vid mätning med höghastighetsprofilometrar.	**28**
Tabell 5	Klassindelning baserad på samplingsintervall.	**29**
Tabell 6	Kvoten mellan medel-IRI för fyra höghastighetsprofilometrar och IRI uppmätt med Dipstick.	**32**
Tabell 7	Medelvärden över höger och vänster hjulspår resp. över asfalt- och betongsträckor av i tabell 6 visade kvoter.	**32**
Tabell 8	Inverkan på IRI av slumpmässiga fel i profilmätningen.	**33**
Tabell 9	Exempel på sinusvågor med tillhörande IRI-värden.	**35**
Tabell 10	Faktorer som påverkar vägprofilmätningens resultat.	**38**
Tabell 11	Effektiva baslängder.	**39**
Tabell 12	PSD-värde motsvarande vågtalet 0,1 cykler/m (våglängd 10 m) för de fyra jämnhetsklasserna och motsvarande ungefärliga IRI-värden.	**45**
Tabell 13	Avvikelser för GM-profilometrar.	**52**
Tabell 14	Avvikelse för rätskenemetoden.	**53**
Tabell 15	Data för de båda fordonen som användes för bedömning av vägojämnheter.	**56**
Tabell 16	Storleken på regressionskonstanter för 22 personers bedömning av vägojämnhet som funktion av ojämnhet enligt IRI i personbil respektive lastbil.	**63**
Tabell 17	Storleksordning på korrelationskoefficienter mellan resp. försökspersons.	**63**
Tabell 18	Antal personer med högsta korrelation mellan upplevd ojämnhet och ojämnhet enligt IRI eller olika RMS-intervall i personbil respektive lastbil, samt medelvärden av de högsta korrelationerna.	**65**
Tabell 19	Fordonsdata.	**69**

Mätning av vägytans longitudinella jämnhet – metoder och nödvändig noggrannhet

av Georg Magnusson, Sven Dahlstedt och Leif Sjögren
Statens väg- och transportforskningsinstitut (VTI)
581 95 Linköping

Sammanfattning

Upphandling av vägbyggnadsuppdrag förskjuts alltmer mot s.k. entreprenader med funktionsåtaganden. Det innebär bl.a. att kraven på vägytans jämnhet bör återspegla vägytans förmåga att, med minsta möjliga inverkan på den miljö som omger vägen, på godtagbart sätt tjäna trafikanten och minimera väghållarens underhållskostnader. Jämnhetsmätetal som beskriver vägytans tjänlighet i dessa avseenden saknas i stort sett. Det är sannolikt att kopplingen mellan vägojämnheten och olika sådana mätetal är av varierande styrka, vilket betyder att noggrannhetskraven vid vägytemätning beror av ändamålet med mätningen. Tidigare forskning om olika trafikant-, väghållar- och miljöeffekter av vägytans egenskaper har emellertid, så vitt bekant, aldrig uppmärksammat frågan om vilken mätnoggrannhet som i det enskilda fallet erfordras för att få kännedom om vägytans egenskaper, baserade på prediktioner av sådana effekter.

För att kunna göra överväganden om vilken noggrannhet som krävs vid mätning av vägprofiler fordras tillgång till ett relativt stort urval av realistiska vägprofiler med olika jämnhetsnivå och olika våglängdssammansättning. Det var därför nödvändigt att inom projektet tillskapa en databas innehållande sådana vägprofiler som uppmätts med känd och hög noggrannhet. Redan etablerade samband mellan vägojämnhet och relaterade effekter är i stor utsträckning baserade på mätresultat från existerande vägprofilmätare av höghastighetstyp. För att kunna bedöma värdet av dessa samband måste undersökas om existerande profilmätare har erforderlig mätnoggrannhet för dessa olika mätningsändamål. Mätdata från sådana mätare vid mätning på dessa kända vägprofiler måste därför insamlas.

Under 1998 genomfördes ett stort upplagt internationellt experiment syftande till att undersöka mätnoggrannheten hos existerande längs- och tvärprofilmätare av höghastighetstyp. Detta experiment genomfördes av PIARC, tidigare ”Permanent International Association of Road Congresses”, numera ”World Road Association”, genom dess tekniska kommitté för vägyteegenskaper, PIARC/TC1 ”Surface Characteristics” i samarbete med en arbetsgrupp inom FEHRL (Forum of European National Highway Research Laboratories). (B. De WIT, E. Kempkens, L. Sjögren and D.-M.Ducros, 1999). VTI deltog aktivt i detta experiment för att till lägsta möjliga kostnad etablera och få del av ovannämnda databas.

Sambandet vägojämnhet – funktionellt mätetal – erforderlig mätnoggrannhet har i här aktuellt forskningsprojekt studerats genom fältmätningar vad avser upplevelse av vägojämnhet (åkkomfort) och fordons- respektive vägpåkänning.

I projektansökan ingick två litteraturstudier. Den ena avsåg matematiska beskrivningar av vägytans längsprofil, dvs. vägprofilen betraktad som en tvådimensionell statistisk process. Den andra behandlande matematiska beskrivningar av vägytor, vilket sålunda innebär en tredimensionell beskrivning. Eftersom vissa rapporter kunde förväntas uppmärksamma båda dessa aspekter bedrevs dessa båda studier parallellt och av såväl praktiska som pedagogiska skäl presenterades

resultatet av båda dessa studier i en och samma rapport (Magnusson och Andrén, 2001).

Parallellt med dessa litteraturstudier genomfördes en tredje sådan, syftande till att finna tillgängliga överväganden rörande erforderlig mätnoggrannhet för olika användningsområden för vägprofildata. Resultatet av denna studie redovisas nedan i kapitlet "Tillgänglig noggrannhet".

De egna fältmätningarna innefattade studier av människors känslighet för olika nivåer av vägojämnhet, sambandet mellan vägojämnhet och fordonspåkänning samt samband mellan vägojämnhet och dynamisk hjullastvariation. Försökspersoner har uppmanats att bedöma upplevd vägojämnhet vid färd i personbil respektive lastbil på vägar med olika grad av ojämnhet. Huvuddelen av provsträckorna valdes så att de var mycket jämna och med mycket liten variation i jämnhet dem emellan. Därigenom kunde resultatet förväntas ge en indikation av hur noggrant längsprofilen behöver kunna mätas för att kunna användas som komfortkriterium vid vägunderhållsplanering. Bedömningarna jämfördes såväl med IRI- som med RMS-värden för olika våglängdsområden. Syftet med detta är att finna ett alternativt jämnhetsmått till IRI med eventuellt bättre koppling till trafikanternas upplevelse av en mer eller mindre ojämn väg.

Undersökningen genomfördes som ett skattningsförsök där ett tjugotal bedömare fick åka med som passagerare i dels personbil, dels lastbil. Bedömningar av ojämnhet gjordes på 45 delsträckor längs en rutt på ca 6 mil. De flesta av delsträckorna hade IRI-värden mellan 0,5 och 3, medan ett tiotal sträckor hade högre IRI-värden. En referenssträcka, som vid instruktionen till bedömarna gavs det godtyckliga indexvärdet 100 hade ett IRI-värde på 6,24.

De viktigare resultaten av undersökningen var att den upplevda ojämnheten verkar vara en linjär funktion av IRI-värdena inom det studerade ojämnhetsintervallet. Känsligheten hos bedömarna, eller deras överensstämmelse sinsemellan, verkar vara större i personbil än i lastbil, eftersom osäkerheten i medelbedömningarna är märkbart större i lastbil. För helt jämna vägar (IRI≈0) finns indikationer i data som tyder på att i lastbil är det inte längre väggenererade vibrationer som är huvudorsaken till ojämnhetsupplevelsen. För några delsträckor med kanske något annorlunda frekvenssammansättning av ojämnheterna visade sig IRI korrelera ganska dåligt med den upplevda ojämnheten. Trots den **mycket goda överensstämmelsen mellan IRI och upplevd ojämnhet, räknat över hela bedömargruppen, uppvisade många enskilda bedömningar ännu starkare samband mellan bedömningar och vägprofilbeskrivning i RMS-värden.**

Med utgångspunkt från tillgängliga data studerades även effekten av slumpmässiga mätfel i IRI-mätningarna på det beräknade sambandet med upplevd ojämnhet. Simuleringarna av slumpmässiga mätfel i IRI-värdena visade att inom det studerade intervallet, och med det relativt stora antalet värden (45), kan slumpfel åtminstone inom ± 0,2 IRI-enheter betraktas som betydelselösa.

I syfte att studera sambandet mellan vägojämnhet och fordonspåkänning försågs de bilar som används vid ovan nämnda experiment med utrustning för mätning av accelerationer i framhjulsupphängningen. Det var ursprungligen avsikten att också mäta krafter i sådana fordonskomponenter, där påkänningen kunde antas vara direkt relaterad till vägojämnheten, t.ex. framhjulsupphängningen. Vid kontakt med Volvo Personvagnar i syfte att få råd avseende lämpliga placeringar för kraftgivarna avråddes emellertid från dessa mätningar, som bedömdes mycket svåra att genomföra och bl.a. krävde viss ombyggnad av fordonens hjulupphäng-

ningar för att mätresultaten skulle kunna bli tolkningsbara. Det var likaledes avsikten att mätningarna, för att få en större datamängd, skulle genomföras samtidigt som ojämnhetsbedömningarna. Det visade sig emellertid snart att repeterbarheten hos mätningarna var så stor att upprepade mätningar i från början avsedd omfattning var tämligen meningslös. Även i detta fall jämfördes mätdata med IRI-värdet för mätsträckorna och RMS-värdet för olika våglängdsområden.

Det konstaterades att accelerationsnivåerna över samtliga provsträckor är ungefär desamma i båda fordonen, vilket inte var att förvänta. I vissa fall har t.o.m. högre accelerationer noterats i personbilen än i lastbilen. Regressionslinjerna är också i stort sett lika. **RMS-värdet för något väl valt våglängdsområde i vägprofilen förefaller att vara en bättre prediktor på fordonsslitaget än IRI-värdet.**

Provsträckorna utnyttjades också för mätning av dynamisk hjullastvariation med hjälp av VTI:s mätfordon för mätning av vägytans deflektion, Laser RDT. Detta fordon är utrustat med givare för kontinuerlig hjullastmätning och kan sålunda utnyttjas för mätning av sambandet mellan vägojämnhet och den till vägens livslängd relaterade dynamiska hjullastvariationen. En ojämn väg ger upphov till stora hjullastvariationer, som innebär att av två vägar med samma bärighet men olika grad av jämnhet kommer den ojämnare vägen att kräva underhållsåtgärder tidigare än den jämna. Dessa mätningar kunde av olika skäl inte genomföras under hösten 2000 utan först i mitten av januari år 2001, dvs. på frusen väg. Detta ledde till mindre deflektioner än vad som annars hade varit fallet**. IRI-värdet och RMS-värdet för våglängdsområdet 5–20 m visade sig vara lika goda prediktorer på dynamisk axellast (vägpåkänning),** åtminstone för vägar där tunga fordon håller en hastighet av cirka 70 km/h.

VTI:s del i FILTER-projektet var att ansvara för den referensmätning som behövdes. Mätningar har genomförts på teststräckor av varierande ojämnhet (IRI) från 0,5 mm/m till 6,5 mm/m. Varje mätbil har genomfört mätningar upprepade gånger på samma teststräcka och i olika hastigheter. Totalt genomfördes minst nio upprepade mätningar per mätbil och teststräcka. Teststräckornas längd var 400–500 m. IRI-värdet för respektive utrustning har beräknats efter mätningen från mätbilens insamlade längsprofil. Samma programvara har använts för att beräkna IRI för alla mätbilar. I FILTER-försöken har de flesta mätarna samtidigt med leverans av längsprofil också lämnat beräknade IRI-värden. Dessa har inte använts här. Det finns risk att ”fel” introduceras som åstadkommer skillnader i IRI beroende på hur man beräknar IRI. För att undvika detta valdes att beräkna IRI i efterhand med samma metod för alla mätare. Analysen är genomförd på så sätt att först har en noggrannhetsbedömning gjorts av hela materialet och sedan med en särskiljning på typ av mätprincip. **Profilometrar av GM typ uppvisade en mycket god överensstämmelse med referensen och hade en medelavvikelse på 0,03 mm/m medan profilometrar av typen rätskenor hade en medelavvikelse på 0,16 mm/m. En slutsats blir att för upplevd ojämnhet hamnar kravet på omkring ± 0,2 IRI och detta kan uppfyllas av de flesta typer av profilometrar.**

Measurements of the road surface longitudinal unevenness – methods and necessary accuracy

by Georg Magnusson, Sven Dahlstedt and Leif Sjögren
Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI)
SE-581 95 Linköping, Sweden

Summary

Road Administration's procurement for road building projects is shifting increasingly towards function-based contracts. This means that the requirements on the evenness of a road surface must reflect the capacity of the surface to serve the road user satisfactorily and with minimal impact on the local environment, while minimising costs for the road authority. In general, there are virtually no evenness indexes describing the serviceability of a road surface in these respects. It is probable that the connection between road evenness and such indexes is of varying strength, which means that the requirements on accuracy in road surface measurement are dependent on the purpose of the measurements. However, earlier research into road user, road authority and environmental effects of road surface characteristics has paid no attention to the issue of what accuracy is required in each case in order to study road surface characteristics and enable the prediction of such effects.

Decisions regarding the accuracy required in measuring road profiles demand access to a relatively large sample of realistic road profiles with different evenness levels and spectral composition. Therefore, it was necessary to create a database within the project containing road profiles that had been measured with a known high level of accuracy. Established relations between road evenness and various related factors are largely based on measurements from existing road profilometers of the high-speed type. In order to estimate the value of these relations, it was therefore necessary to investigate whether existing profilometers offer the measuring accuracy required for these purposes. Data obtained from known road profiles with the aid of such equipment were thus collected.

During 1998, a large international experiment took place with the aim of investigating the measuring accuracy of existing longitudinal and transverse profilometers of the high-speed type. The experiment was conducted by PIARC, earlier the "Permanent International Association of Road Congresses", now the "World Road Association", or more exactly its technical committee for road surface characteristics, PIARC/TC1 "Surface Characteristics" in collaboration with a working group within FEHRL (Forum of European National Highway Research Laboratories". (B. De Wit, E. Kempkens, L. Sjögren and D.M.- Ducros, 1999). VTI played an active part in the experiment with the aim of establishing and utilising the abovementioned database at the lowest possible cost.

In this project, the relation between road evenness, function index and necessary measuring accuracy has been studied in terms of subjective road evenness (ride comfort) and vehicle and road influence respectively.

The project application included two literature studies, one concerning mathematical descriptions of the longitudinal profile of the road surface, i.e. the road surface treated as a two-dimensional statistical process, and the other dealing with mathematical descriptions of road surfaces, which entails a three-

dimensional description. Since certain reports were expected to pay attention to both these aspects, the two studies were carried out in parallel. For practical and pedagogical reasons, the results from both studies are presented in the same report (Magnusson and Andrén, 2001).

Parallel to the abovementioned literature studies, a third study was carried out on considerations regarding the accuracy required for various applications of road profile data. The results are reported below under the heading "Necessary accuracy".

The field-test measurements included studies of the human response to different levels of road evenness, the relation between road evenness and vehicle influence, and finally the correlation between road evenness and dynamic wheel load variations. In the study reported here, which was aimed at investigating human response to different levels of road evenness, the observers were asked to estimate the road evenness they experienced when travelling in a car or lorry respectively on roads with different degrees of evenness. Since the majority of the test sections were chosen so that they were very even, with very little variation in evenness between them, the results were expected to provide an indication of comfort criteria in road maintenance planning. The estimates were compared not only with IRI, but also with RMS values for different wavelengths in order to find an alternative measure of evenness to IRI that possibly better reflected road users' experience of a more or less uneven road.

The investigation was carried out as an estimation experiment, in which about 20 observers made their estimates while travelling as passengers first in a car and later in a lorry. The evenness estimates were made on 45 sections along a 60-km route. Most of the sections had IRI values between 0.5 and 3.0 mm/m, while about 10 sections had higher values. A reference section, which was given an arbitrary value of 100 during instruction to the test subjects, had an IRI value of 6.24 mm/m. The more important results of the investigation were that the subjective evenness appears to be a linear function of the IRI values within the studied evenness interval. The sensitivity of the observers, or the agreement between them, appears to be greater in a car than in a lorry, since the uncertainty in the average estimates is noticeably greater in a lorry. For completely smooth surfaces (IRI close to 0), the data indicate that in a lorry it is no longer road-generated vibrations that are the main cause of subjectively experienced evenness and that on some sections with somewhat different spectral composition of the evenness, the IRI correlated rather poorly with the experienced evenness. Despite the **very good agreement between estimates (experienced evenness) and road profile description, seen over the whole group of observers, it was found that many individual estimates showed even stronger relations between estimates and road profile description in RMS values.** On the basis of available data, a study was made of the effect of random measuring errors in the IRI measurements on the calculated relation with subjective evenness. The simulations of random measuring errors in the IRI values showed that within the studied interval and with the relatively large number of values (45), random errors at least within ± 0.2 IRI units can be regarded as insignificant.

In order to study the interaction between road evenness and vehicle influence, the vehicles used in the abovementioned experiment were equipped with accelerometers in the front suspension. The original idea was to measure the forces in those parts of the vehicle that are affected by road evenness, the front

suspension being among these. To obtain advice on where to place the sensors, the car manufacturer Volvo was contacted. However, the advice received was that this is a very difficult task and requires certain rebuilding of the front suspension to obtain worthwhile results. In order to obtain a larger quantity of data, a further aim was to perform the vehicle measurements at the same time as the evenness measurements. However, it was found that the repeatability of the measurements was so great that repeating measurements to the extent originally intended was relatively pointless. Here again, measurements were compared with the IRI value for the road sections and the RMS value for the spectral intervals.

It was found that the acceleration levels over all test sections were approximately the same in both vehicles, which was unexpected. In certain cases, it was even the case that higher acceleration levels were observed in the car than in the lorry. The regression curves are also generally similar. **The RMS values for a well-chosen spectral interval in the road profile appear to be better predictors of vehicle wear than the IRI value.**

The test sections were also used to measure dynamic wheel load variation with the aid of the VTI's Laser RDT (Road Deflection Tester). This vehicle is equipped to measure continuous wheel load while driving and can thus be used to measure the relation between road evenness and the dynamic wheel load variation related to road life. An uneven road thus gives rise to large wheel load variations, whereby the more uneven of two roads with different evenness will require maintenance earlier than the smooth road. For various reasons, these measurements were postponed from autumn 2000 to mid-January 2001, i.e. on a frozen road, which led to smaller deflections than would otherwise have been the case. **The IRI and RMS values for the spectral interval 5–20 m proved to be equally good predictors of dynamic wheel load (road deterioration),** at least on roads where heavy vehicles travel at a speed of about 70 km/h.

The VTI's part in the FILTER project consisted of taking responsibility for the reference measurements required. Measurements were performed on test sections with varying evenness (IRI) from 0.5 mm/m to 6.5 mm/m. Each measuring vehicle performed measurements on repeated occasions on the same test section and at different speeds, giving a total of at least nine repeated measurements per measuring vehicle and test section. The length of the test sections was 400–500 m. The IRI value for the respective equipment has been calculated according to the measurements of the longitudinal profile acquired by the measuring vehicle. The same software has been used to calculate IRI for all measuring vehicles. In the FILTER experiments, most of the measuring sources have also supplied calculated IRI values at the same time as a longitudinal profile. These have not been used here. There is a risk of introducing "errors" that lead to differences in the IRI depending on the way in which the IRI is calculated. To avoid this, it was decided to calculate the IRI subsequently with the same method for all measuring sources. The analysis was performed in such a way that an accuracy estimate of the whole material was made first, followed by a classification according to the type of measuring principle. **The GM type of profilometers performed very well compared with the reference and had a mean deviation of 0,03 mm/m while the straightedge type of profilometers had a mean deviation of 0,16 mm/m. One conclusion is that for human response of different level of unevenness it is enough with an accuracy of ± 0,2 and this is fulfilled with both type of profilometers.**

1 Bakgrund

Upphandling av vägbyggnadsuppdrag förskjuts alltmer mot s.k. entreprenader med funktionsåtaganden. Det innebär att bl.a. kraven på vägytans jämnhet bör återspegla vägytans förmåga att med minsta möjliga inverkan på den vägen omgivande miljön på godtagbart sätt tjäna trafikanten och minimera väghållarens underhållskostnader. Jämnhetsmätetal som beskriver vägytans tjänlighet i dessa avseenden saknas i stort sett helt och hållet. Det är sannolikt att kopplingen mellan vägojämnheten och olika sådana mätetal är av varierande styrka, vilket betyder att noggrannhetskraven vid vägytemätning beror av ändamålet med mätningen. Tidigare forskning avseende olika trafikant-, väghållar- och miljöeffekter av vägytans egenskaper har emellertid så vitt bekant aldrig uppmärksammat frågan om vilken mätnoggrannhet som i det enskilda fallet erfordras för att möjliggöra och få kännedom om vägytans egenskaper baserade prediktioner av sådana effekter.

Ända sedan den första längsprofilmätaren som kunde mäta vid normala trafikhastigheter utvecklades i början av 1960-talet har utvecklingen gått mot ständigt högre mätnoggrannhet utan att någon så vitt bekant funderat över vilken mätnoggrannhet som i enskilda fall verkligen behövs. Det är möjligt att i dag existerande vägytemätare, och då inte bara längsprofilmätare, i vissa tillämpningar ger onödigt hög mätnoggrannhet och därmed onödigt höga tillverknings- och användarkostnader.

Överväganden rörande erforderlig noggrannhet vid mätning av vägprofiler fordrar tillgång till ett relativt stort urval av realistiska vägprofiler med olika jämnhetsnivå och olika våglängdssammansättning. Det var därför nödvändigt att inom projektet tillskapa en databas innehållande sådana vägprofiler uppmätta med känd och hög noggrannhet. Redan etablerade samband mellan vägojämnhet och olika därtill relaterade effekter är i stor utsträckning baserade på mätresultat från existerande vägprofilmätare av höghastighetstyp. För att kunna bedöma värdet av dessa samband måste sålunda undersökas om existerande profilmätare besitter för dessa olika mätningsändamål erforderlig mätnoggrannhet och mätdata från sådan mätare vid mätning på dessa kända vägprofiler måste därför insamlas.

Under 1998 genomfördes ett stort upplagt internationellt experiment syftande till att undersöka mätnoggrannheten hos existerande längs- och tvärprofilmätare av höghastighetstyp. Detta experiment genomfördes av PIARC, tidigare ”Permanent International Association of Road Congresses” numera ”World Road Association”, eller närmare bestämt dess tekniska kommitté för vägyteegenskaper, PIARC/TC1 ”Surface Characteristics” i samarbete med en arbetsgrupp inom FEHRL (Forum of European National Highway Research Laboratories). (B. De WIT, E. Kempkens, L. Sjögren and D.-M.Ducros, 1999). VTI deltog aktivt i detta experiment i syfte att till lägsta möjliga kostnad etablera och komma i åtnjutande av ovannämnda databas.

Sambandet vägojämnhet – funktionellt mätetal – erforderlig mätnoggrannhet har i här aktuellt forskningsprojekt genom fältmätningar studerats vad avser upplevelse av vägojämnhet (åkkomfort) och fordons- respektive vägpåkänning.

1.1 En bakgrundsbeskrivning om vägojämnheter – mätning och upplevelse

Redan de gamla grekerna kan misstänkas ha haft problem med sin vägstandard. God tillgång på sjöfartsleder kan ha bidragit till ett minskat intresse för landtransporter. Man kan ju fråga sig varför den förste maratonlöparen (490 f. Kr.) sprang fyra mil istället för att rida, eller åka med häst och vagn. Och man kan ju också undra om vägarnas och vägtrafikanternas skyddspatron Hermes hade vingar på fötterna för att inte riskera att vricka foten på de förmodligen ganska ojämna och steniga vägarna (Lay, 1992). I Sverige, många år senare, lär Linné under sina många och långa resor haft synpunkter på vägstandarden inom vissa delar av landet. Huruvida han också gjorde någon systematisering eller kvantifiering av vägens ojämnheter förtäljer dock inte historien.

Ytterligare några år senare hade man dock kommit så långt i den tekniska utvecklingen att man började att mäta upp mer eller mindre exakt hur jämn/ojämn en väg var. Med hjälp av allt mer sofistikerad mekanik utvecklades apparatur, först släpvagnsmonterad och senare fordonsmonterad, som mätte vägojämnheter genom att registrera ett hjuls rörelser i vertikalled. Några av exemplen från denna utveckling var den s.k. CHLOE-profilometern och PCA-mätaren, vilka båda har använts i Sverige.

Ju fler sådana mätanordningar som kom i bruk, desto svårare visade det sig vara att kunna jämföra mätresultat från en apparatur med andra resultat – ibland även att jämföra resultat från en dag till en annan erhållna med samma apparatur. Detta ledde till att man småningom satte igång omfattande försök för att jämföra och kalibrera olika mätutrustningar mot varandra, bl.a. inom det amerikanska NCHRP-programmet (Gillespie et al., 1980). Vid denna tid hade man också blivit allt mer medveten om de transport-, fordons- och samhällsekonomiska kostnaderna av alltför dåliga vägar. Detta gjorde att behovet av ett internationellt standardiserat och accepterat mätetal för vägkvalitet blev allt mer uttalat.

Världsbanken, som med biståndspengar finansierade många, och stora, vägbyggnadsprojekt, hade ett speciellt intresse att kunna mäta och jämföra vägkvaliteter både inom och mellan länder. Detta behov ledde till att ett stort projekt för att ta fram en ny vägojämnhetsnorm – *The International Road Roughness Experiment* – genomfördes i Brasilien i början av 1980-talet. Resultatet av detta arbete blev den allt mer allmänt accepterade standardbeskrivningen av vägojämnheter – *International Roughness Index* – eller i dagligt tal enbart IRI.

Detta index anger hur mycket en fjärdedels bil (ett hjul med vidhängande massa) rör sig i vertikalled pga. vägens ojämnheter vid en färd i längsled över en given sträcka. Den relativt enkla fjädringsmodellen innehåller så få parametrar att den ger en förståelig och beräkningsbar, och samtidigt tillförlitlig, beskrivning av hur en vägs ojämnheter fortplantas in i en sådan "idealbil" uttryckt som summerad vertikalrörelse (uttryckt i lämplig enhet, m eller mm) per färdsträcka (i km eller m). I beräkningsmodellen finns dock inget utrymme för egenskaper hos de åkande eller de stolar dessa kan sitta i, varför IRI-värden inte direkt kan översättas till hur ojämn en väg faktiskt känns.

Måttet på en vägs ojämnhet har dock sällan ett värde i sig självt. I de allra flesta fall vill man utifrån denna typ av vägbeskrivning kunna dra slutsatser om hur vägen är att åka på – om den är framkomlig med enbart jeepar och terrängfordon, om det finns risk att skada bilen (eller de åkande), om det är aktuellt med reparationer eller underhåll, eller om vägen rent av kan anses som

bekväm att färdas på. Många undersökningar genomfördes också för att studera sambanden mellan vägens jämnhet/ojämnhet och den upplevda vägstandarden eller reskomforten. I Sverige studerades t.ex. samband mellan bedömd och uppmätt vägojämnhet i ett par försöksserier på 1970-talet, först för asfaltvägar (Magnusson och Arnberg, 1976) senare även på grusvägar (Magnusson, Arnberg och Pettersson, 1977).

I USA hade man redan på 1960-talet börjat att utifrån vägprofiler beräkna en vägs "körbarhet" (*serviceability*) uttryckt i PSI (*Present Serviceability Index*). De som verkar ha initierat ett mera systematiskt utvecklingsarbete för att relatera upplevd standard till fysikaliskt uppmätt vägkvalitet var Carey och Irick (1960) i samband med de amerikanska AASHO-försöken. Som första punkt i sin motivering för detta användarinriktade sätt att arbeta citerar de att *"highways are for the comfort and convenience of the travelling public"* (*Op. cit.*, sid. 41, rad 2) och konstaterar vidare att mått och beskrivningar av skador, hål och gropar i vägbanan kan vara intressanta i sig, men att det är trafikanternas upplevelse av dessa brister som borde vara viktigast.

Olika delstater fortsatte sedan att utveckla mått och metoder för att ange en vägs upplevda standard eller jämnhet/ojämnhet. Två av de mera ambitiösa följande försöken att konstruera psykofysiskt adekvata skalor för att beskriva sambanden mellan upplevelse och fysikalisk stimulering resulterade i vad som kom att kallas *The Weaver-AASHO Scale* (Weaver and Clark, 1977) respektive *The Holbrook Scale* (Holbrook, 1969). Dessa och andra metoder resulterade i antal olika mått och begrepp för att beskriva hur en väg upplevdes, som t.ex. MPR (*Mean Panel Rating*), PSR (*Pavement Serviceability Rating*), SI (*Serviceability Index*), RQI (*Ride Quality Index*) och NR (*Need Repairs*).

I en omfattande försökserie gjorde Janoff och medarbetare ett försök att utifrån tidigare metoder och erfarenheter utveckla en mera generell metod för att beskriva upplevd vägkvalitet (*rideability*, uttryckt som *ride number, RN*) som funktion av fysikaliskt uppmätt ojämnhet (Nick and Janoff, 1983; Janoff et al, 1985; Janoff, 1988). Efter en översikt över både skattningsmetoder och olika tekniker för ojämnhetsbestämning gjordes ett antal egna försök där både skattningsmetoder och mätmetoder jämfördes mot varandra. Slutsatserna var att, åtminstone för vissa våglängdsområden, gick det att få någorlunda samstämmiga bedömningar med flera av de studerade skattningsteknikerna med utgångspunkt från flera av de olika uppmätningsmetoderna. Avsikten verkar sedan ha varit att utveckla en generell algoritm för omräkning av profildata till subjektiv *rideability* eller till bedömt reparationsbehov.

Janoffs projekt pågick ungefär samtidigt som IRI höll på att etableras som norm för beskrivning av vägojämnheter, men IRI nämns aldrig i rapporteringen. Enligt Sayers och Karamihas (1996) hade inte Janoff publicerat någon färdig "ready-to-run" metod åtta år efter att försöksserien slutrapporterats. Möjligen kan den obefintliga knytningen till IRI vara en orsak till att Janoffs metod förlorade i aktualitet, medan utvecklingen av IRI-tillämpningar fortsatte vid UMTRI (Paterson, 1986; Sayers and Karamihas, 1996). Vid olika jämförelser mellan bedömningar och uppmätta vägprofiler konstaterade man att IRI-värden kan användas för att predicera upplevd vägojämnhet, men poängterade samtidigt att uppmätt och upplevd "körbarhet" (*rideability*) är skilda begrepp och även att vissa vägmätningstekniker kan ge avvikande värden.

Problemen att beskriva och bestämma vägkvalitet förefaller vara helt universella, varför det inte är särskilt förvånande att de har studerats även i

Australien. Cairney och medarbetare (1989) gjorde en översikt över tidigare arbeten hemma och utomlands och ägnade en viss uppmärksamhet åt bedömningsprocedurer, bedömaregenskaper och erforderliga stickprovsstorlekar. De rapporterar att väg- och trafiktekniker inte verkar ge bedömningar som skiljer sig från andra bilisters, men att man funnit signifikanta effekter av ålder och körerfarenhet – dvs. unga förare är mindre känsliga eller mer toleranta än äldre. De rapporterar också några tidigare resultat, som visar att det verkar krävas relativt små grupper (ca 15 personer) för att ge rimligt tillförlitliga medelbedömningar av *"serviceability"*. Men samtidigt påpekar de att det var tillräckligt mycket stora bedömargrupper för att fastställa en acceptansgräns med rimlig noggrannhet om bedömningarna endast görs binärt "godkänt/underkänt".

Enligt Cairney *et al.* (1989) är huvudfrågan "vägbanebedömningar" för bestämning av någon form av funktionalitetsmått. Det framgår aldrig explicit att bedömningarna skall avse endast ojämnhet, utan det verkar tas som självklart att (väg-)ojämnhet är den viktigaste komponenten men att även *"variables other than roughness"* kan vara betydelsefulla. En liknande oklarhet när det gäller nyckelbegreppen kan sägas gälla samtliga ovan refererade titlar, oavsett om nyckelbegreppet var *"rideability"*, *"serviceability"*, *"tolerability"*, komfort eller "dis-komfort". Hur mycket av dessa komplexa bedömningar som utgörs av själva den upplevda ojämnheten enbart, verkar ha rönt relativt litet intresse.

Länge verkade det som om det främsta motivet för vägmätningar och vägbedömningar var att fastställa kriterier för lägsta acceptabel standard eller behov av lagning. Med utvecklingen av dels massbilismen med dess krav på dräglig resestandard och dels väguppmätningstekniken med bättre sensorer, datalagrings- och databearbetningsresurser har dock alltmer intresse kommit att riktas mot den andra änden av detta kontinuum som omfattar hela skalan alltifrån vägar som är så ojämna att ingen åker där frivilligt till vägar som är så jämna att orundheter i hjulen blir en märkbar vibrationskälla. Med den nya inriktningen ändras frågorna från "Hur dålig är vägen?" till "Hur bra kan eller skall vägen vara?".

1.2 Avvägningen kvalitet–kostnad

Med modern teknik kan även ganska omfattande vägnät mätas upp, beskrivas och kvalitetsbestämmas relativt enkelt. För en person, eller myndighet, som är ansvarig för vägstandarden kan det därför vara lockande att bestämma att alla vägar ska ha en viss minimijämnhet, och sedan beställa en kontrollmätning för att se hur riktvärdena stämmer. Tyvärr är dock inte jämnhet gratis. Att bygga nya vägar så att de blir helt jämna blir dyrare än om vissa ojämnheter tillåts, och att reparera gamla vägar så fort skador och slitage börjar ge utslag i IRI-värden kan ge mycket stora utgifter i en underhållsbudget.

För Vägverket kan det handla om mycket stora belopp om gränserna för maximal eller acceptabel ojämnhet sätts allt för strikt. Men samtidigt, och trots en ansträngd budget, strävar varje väghållare med självaktning efter att erbjuda "sina" trafikanter så bra vägar som möjligt. Detta motsatsförhållande hade lett fram till frågor om t.ex. kraven på vägteknisk kravspecifikation och mätningsnoggrannhet i förhållande till bilisternas känslighet, eller vid vilka jämnhetsnivåer som bilister inte längre känner skillnad mellan en jämn väg och en som är ännu jämnare. För att bättre kunna avgöra hur (o-)jämnhetsbeskrivningar för relativt bra

vägar skall tolkas och vägas mot andra aspekter genomfördes undersökningar, vars syfte var att:

- beskriva sambandet mellan uppmätt vägojämnhet (i IRI-enheter) och upplevd ojämnhet (i subjektiva upplevelseenheter) för vägar med relativt bra standard (dvs. låga IRI-värden), och
- -belysa hur bristande noggrannhet i väguppmätningen kan påverka de beräknade sambanden med upplevd ojämnhet.

1.3 Definitioner

Dipstick: Långsamt profileringsinstrument, ofta använt som noggrann referens-profilmätare (se bilaga 3 för beskrivning av Swivelling Dipstick och Rolling Dipstick).

IRI: Mått på vägytans jämnhet i längsled uttryckt mm/m. (Se bilaga 2 för vidare beskrivning).

IRRE: International Road Roughness Experiment. (Genomfördes i Brasilien 1982).

Höjdprofil: Den geometriska vägprofilen, dvs. profilhöjd som funktion av longitudinell distans.

LTPP: En del i Strategic Highway Research Program SHRP-projektet Long-Term Pavement Performance. Uppföljning av tillståndet hos observationsobjekt där mätningarna utföres på utvalda teststräckor i Sverige enligt en speciell metod. Mätmetoden beskrivs i VTI-Notat 12-2000.

Lutningsprofil: Höjdprofilens förstaderivata, dvs. profilkurvans lutning som funktion av longitudinell distans.

PRIMAL: Långsamt profileringsinstrument, ofta använt som noggrann referens-profilmätare (se bilaga 3 för vidare beskrivning).

Profilometer: Anordning för mätning av vägytans profil. (I här aktuellt sammanhang avses dock specifikt endast anordning för mätning i trafikhastighet av vägytans profil i längsled och ännu mera specifikt endast profilometrar av s.k. GM-typ (se bilaga 4).

PSD (Power Spectral Density): Gränsvärdet för t.ex. en mätsignals kvadrerade medelvärde inom ett givet rektangulärt frekvens-/våglängdsband dividerat med bandbredden när bandbredden går mot noll.

FEHRL Forum of European national Highway Research Laboratories

FILTER Fehrl Investigation on Longitudinal and Transverse Evenness of Roads. Ett internationellt projekt för jämförelse av snabba profilmätare.

RMS (Root Mean Square): Kvadratroten ur t.ex. en mätsignals kvadrerade medelvärde.

RMS-fel: Det förväntade felet i t.ex. en viss profilmätning.

$$RMS\text{-}fel = \left\{E\left[(uppmätt\ värde - sant\ värde)^2\right]\right\}^{1/2};$$

Systematiskt fel: Medelvärdet av felet i många mätningar av t.ex. samma profil.

$$Systematiskt\ \ fel = E[uppmätt\ värde - sant\ värde];$$

Standardfel: Den del av det totala felet som beror av slumpmässiga fel.

$$Standardfel = \left\{E\left[(uppmätt\ värde - sant\ värde - systematiskt\ \ fel)^2\right]\right\}^{1/2};$$

RPUG: Road Profiler User Group. Ett amerikanskt forum för utbyte av information mellan användare, leverantörer, konstruktörer, forskare som har intresse av området vägprofiler, vägojämnheter och beläggningstillstånd.

Vågtal: Inverterade värdet av våglängden. (Höga vågtal → korta våglängder; låga vågtal → långa våglängder).

Följande definitioner är baserade på International Standard ISO 3534-1 "Statistics - Vocabulary and symbols - Part 1: Probability and general statistical terms". Översättningen är inte ordagrann utan i viss mån anpassad till här aktuell tillämpning.

Sant värde: Ett värde som perfekt karakteriserar en kvantitet under de förhållanden som existerade vid mättillfället.

Not: Det sanna värdet för en kvantitet är ett teoretiskt värde som generellt sett inte kan var känt exakt.

Noggrannhet: Överensstämmelsen mellan ett mätresultat och ett accepterat referensvärde.

Not: Termen noggrannhet, tillämpad på en uppsättning mätresultat, involverar en kombination av slumpmässiga (random) fel och systematiska (bias) fel.

Accepterat referensvärde: Ett värde som tjänar som en accepterad referens för jämförelse och som framtagits som:

a) ett teoretiskt eller etablerat värde baserat på tekniska principer (se "sant värde"),
b) ett tilldelat eller certifierat värde baserat på experimentellt arbete av någon nationell eller internationell organisation,
c) ett överenskommet eller certifierat värde baserat på ett samverkansexperiment under ledning av en vetenskaplig eller teknisk grupp,
d) i de fall a), b) och c) inte är tillgängligt utnyttjas det förväntade värdet av den (mätbara) kvantiteten, dvs. medelvärdet av en specificerad mätvärdespopulation.

Slumpmässiga fel: En komponent av det totala felet som i en serie mätresultat av en och samma egenskap varierar på ett oförutsägbart sätt.

Not: Det är inte möjligt att korrigera för slumpmässiga fel.

Systematiska fel: En komponent av det totala felet som i en serie mätresultat av en och samma egenskap förblir konstant eller varierar på ett förutsägbart sätt.

Not: Systematiska fel och dessas orsaker kan vara kända eller okända.

Precision: Överensstämmelsen mellan oberoende mätresultat erhållna under fastställda betingelser.

Noter:

Precisionen beror uteslutande på fördelningen av slumpmässiga fel och är inte relaterat till sant värde.

Graden av precision utrycks vanligen i form av oprecision och beräknas som standardavvikelsen hos mätresultatet. Mindre precision indikeras av större standardavvikelse.

Med "oberoende mätresultat" menas resultat som erhållits på ett sådant sätt att de inte har påverkats av resultatet av någon tidigare mätning på samma eller ett liknade provobjekt. Kvantitativa mått på precisionen är kritiskt beroende av de föreskrivna förhållandena. Repeterbarhets- och reproducerbarhetsförhållandena är speciella grupper av extrema föreskrivna förhållanden.

Repeterbarhet: Precision under repeterbarhetsförhållanden.

Repeterbarhetsförhållanden: Förhållanden när oberoende mätresultat erhålles med samma metod på identiska mätobjekt i samma laboratorium med samma operatör som använder samma mätutrustning inom ett kort tidsintervall.
Not: Se "Precision", not 3.

Reproducerbarhet: Precision under reproducerbarhetsförhållanden.

Reproducerbarhetsförhållanden: Förhållanden när mätresultat erhålles med samma metod på identiska mätobjekt i olika laboratorier med olika operatörer som använder olika mätutrustningar.

2 Metod

2.1 Litteraturstudier

I projektansökan ingick två litteraturstudier, en avseende matematiska beskrivningar av vägytans längsprofil, dvs. vägprofilen betraktad som en tvådimensionell statistisk process och en behandlande matematiska beskrivningar av vägytor, vilket sålunda innebär en tredimensionell beskrivning. Eftersom vissa rapporter kunde förväntas uppmärksamma båda dessa aspekter bedrevs dessa båda studier parallellt och av såväl praktiska som pedagogiska skäl presenterades resultatet av båda dessa studier i en och samma rapport (Magnusson och Andrén, 2001).

Parallellt med de ovannämnda litteraturstudierna genomfördes en tredje sådan syftande till att finna tillgängliga överväganden rörande erforderlig mätnoggrannhet för olika användningsområden för vägprofildata. Resultatet av denna studie redovisas nedan under i kapitlet "Tillgänglig noggrannhet".

2.2 Egna fältmätningar

IRI (International Roughness Index) se bilaga 1 är det f.n. vanligaste vägytemätetalet, använt i nästan alla länder där vägytemätning över huvud taget förekommer, inklusive Sverige. Detta mätetal är baserat på simulering av en enhjulig släpkärra där en uppmätt vägprofil utgör insignal till simuleringen. Släpkärrans fjädringsegenskaper är hämtade från en typisk framhjulsupphängning på en amerikansk personbil från 60-talet och IRI-värdet anses vara en indikator på komfortupplevelsen i en personbil. Tidigare studier har visat att komfort är ett tämligen oprecist begrepp där olika personer har helt olika uppfattning om vad som menas med komfort (Alm, 1989 och Alm & Magnusson, 1992). I här avrapporterad studie, som syftade till att utröna människans känslighet för olika nivåer av vägojämnhet, har försökspersonerna i stället uppmanats att bedöma upplevd vägojämnhet vid färd i personbil respektive lastbil på vägar med olika grad av ojämnhet. Genom att huvuddelen av provsträckorna valdes så att de var mycket jämna med mycket liten variation i jämnhet dem emellan kunde resultatet förväntas ge en indikation av hur noggrant längsprofilen behöver kunna mätas vid användandet av komfortkriterier vid vägunderhållsplanering. Bedömningarna jämfördes inte bara med IRI utan även med RMS-värden för olika våglängdsområden i syfte att finna ett till IRI alternativt jämnhetsmått med eventuellt bättre koppling till trafikanternas upplevelse av en mer eller mindre ojämn väg.

I syfte att studera sambandet mellan vägojämnhet och fordonspåkänning försågs de bilar som används vid ovan nämnda experiment med utrustning för mätning av accelerationer i framhjulsupphängningen. Det var ursprungligen avsikten att också mäta krafter i sådana fordonskomponenter där påkänningen kunde antas vara direkt relaterad till vägojämnheten, t.ex. framhjulsupphängningen. Vid kontakt med Volvo personvagnar i syfte att få råd avseende lämpliga placeringar för kraftgivarna avråddes emellertid från dessa mätningar som bedömdes mycket svåra att genomföra och bl.a. krävde viss ombyggnad av fordonens hjuluppHängningar för att mätresultaten skulle kunna bli tolkbara. Det var likaledes avsikten att dessa mätningar, i syfte att få en större datamängd, skulle genomföras samtidigt som ojämnhetsbedömningarna. Det visade sig emellertid snart att repeterbarheten hos mätningarna var så stor att upprepade mätningar i från början avsedd omfattning var tämligen meningslös. Även i detta fall jämfördes mätdata med IRI värdet för mätsträckorna och RMS-värdet för olika våglängdsområden.

Provsträckorna utnyttjades också för mätning av dynamisk hjullastvariation med hjälp av VTI:s mätfordon för mätning av vägytans deflektion, Laser RDT. Detta fordon är utrustat med givare för kontinuerlig hjullastmätning och kan sålunda utnyttjas för mätning av sambandet mellan vägojämnhet och den till vägens livslängd relaterade dynamiska hjullastvariationen. En ojämn väg ger sålunda upphov till stora hjullastvariationer innebärande att av två vägar med samma bärighet men olika grad av jämnhet kommer den ojämnare vägen att kräva underhållsåtgärder tidigare än den jämna. Dessa mätningar kunde av olika skäl inte som ursprungligen planerats genomföras under hösten 2000 utan först i mitten av januari år 2001, dvs. på frusen väg vilket ledde till mindre deflektioner än vad som annars hade varit fallet. Återigen studerades samband mellan hjullast-variation och IRI respektive något lämpligt RMS-värde liksom hur känsligt mätetalet är för mätonoggrannhet.

Provsträckornas jämnhetsvärden uttryckta i IRI och RMS för fyra våglängds-områden redovisas i bilaga 2. Tabell 1 definierar de våglängdområden som studerats. Motsvarande frekvensområden hänför sig till mäthastigheten 70 km/h.

Tabell 1 *Studerade våglängdsområden.*

Våglängdsområde (m)	Frekvensområde (Hz)	Intressant fenomen
$1 < \lambda \leq 2$	$20 > f \geq 10$	"Axle hop"
$2 < \lambda \leq 5$	$10 > f \geq 4$	Vertikal helkroppsvibration (ISO 2631)
$5 < \lambda \leq 20$	$4 > f \geq 1$	"Body bounce"
$20 < \lambda \leq 50$	$1 > f \geq 0,4$	Rörelsesjuka

2.3 FILTER-experimentet

Tekniska kommittén TC1 "Surface characteristics" inom PIARC började under 1993 diskutera ett projekt innebärande jämförelse mellan olika typer och utförandeformer av instrument för mätning vid normal trafikhastighet av vägytans jämnhet i längs- och tvärled. Planeringsarbetet fortskred under de följande åren och det beslöts så småningom att experimentet (EVEN) i syfte att minimera transportkostnaderna för deltagande profilometerägare att experimentet skulle genomföras på tre olika lokaler; i USA, Japan och Europa (i gränslandet mellan Tyskland och Nederländerna).

Den europeiska delen av experimentet skulle genomföras som en del av ett större projekt initierat av FEHRL, i vilken grupp VTI ingår. Projektet benämndes ursprungligen ”European Harmonization of Friction and Evenness Measurement Methods” men blev sedermera omdöpt till "FEHRL Investigation on Longitudinal and Transverse Evenness of Roads" (FILTER). (G. Descornet, 1999). Projekt-ledaren för här aktuellt projekt var medlem såväl av den arbetsgrupp inom PIARC/TC1 som planerade och genomförde EVEN-experimentet som den arbets-grupp inom FEHRL som planerade och genomförde FILTER-projektet. Det bedömdes att tillgång till den mycket omfattande databas som EVEN och FILTER skulle avkasta skulle vara av stort värde för här aktuellt projekt. EVEN-databasen skulle vara tillgänglig för alla intresserade medan däremot FILTER-databasen

enligt beslut av FEHRL endast skulle vara tillgänglig för de organisationer som aktivt deltog i projektets genomförande. Alternativt skulle det vara möjligt att köpa databasen för 20 000 EURO. VTI svarade i experimentet för uppmätning av de referensprofiler som skulle utgöra "facit" för de profilmätningar som utfördes av deltagande höghastighetsprofilometrar. Genom detta åtagande tillförsäkrades VTI och därmed här avrapporterat projekt tillgång till den fullständiga mätdatabasen.

En annan del av FILTER-projektet utgjordes av delprojektet ”To study the effect of errors in the profile measurements on the indices”. Detta delprojekt leddes av VTI med medverkan huvudsakligen av Transport Research Laboratory (TRL) i England. De studerade mätetalen avsåg sådana för vägars såväl längs- som tvärjämnhet. Det visade sig att VTI redan hade utvecklade program för studium av inverkan på spårdjupsmätning av sidolägesfel hos en profilometer medan TRL hade ett färdigutvecklat program för studium av inverkan på mätetal avseende vägars jämnhet i längdled av onoggrannhet i profilmätning. Genom att VTI bidrog med en teoretisk och experimentell studie av sidolägesfel kunde sålunda information om den för här aktuellt projekt mera intressanta frågan om inverkan av onoggrannhet i längsprofilmätning erhållas utan ny programutveckling.

3 Tillgänglig noggrannhet

3.1 Litteraturstudie

ASTM Standard E 950-98 "Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling Reference" definierar kvalitetsklasser för höghastighetsprofilometrar där Klass 1 är den högsta klassen. För upplösningen hos den givare som mäter avståndet mellan den fordonsmonterade vertikalaccelerometern och vägytan anges värden enligt tabell 2. Vidare anges att brusnivån hos höjdmätningen inte får överstiga 10 %.

För accelerometrar anges att de skall ha den minsta upplösning som erfordras för att medge en profilbestämning med de krav på noggrannhet och brist på systematiska fel som anges i standarden. Detta är något kryptiskt eftersom standarden inte innehåller några noggrannhetskrav. Däremot finns krav på precision men det har vid tidigare kontakter med ASTM visat sig att man har svårigheter att skilja mellan noggrannhet och precision. För precisionen hos höghastighetsprofilometrar anges värden enligt tabell 3.

För distansmätningen anges att mätfelet inte får överskrida 0,1 %.

Vad avser krav på mätbart våglängdsområde förskrivs att våglängder upp till åtminstone 60 m skall kunna mätas utan dämpning eller förstärkning av amplituden vid mäthastigheter i området 25 till 95 km/h.

Tabell 2 *Upplösningskrav för höjdmätare i höghastighetsprofilometrar.*

Klass	Upplösningskrav
1	mindre än eller lika med 0,1mm
2	större än 0,1 mm men mindre än eller lika med 0,2 mm
3	större än 0,2 mm men mindre än eller lika med 0,5 mm
4	större än 0,5 mm

Tabell 3 *Precisionskrav (noggrannhetskrav?) för vägprofiler uppmätta med höghastighetsprofilometrar.*

Klass	Precisionskrav (1 standardavvikelse)
1	mindre än eller lika med 0,38 mm
2	mindre än eller lika med 0,76 mm
3	mindre än eller lika med 2,50 mm

De systematiska felen får inte överstiga värden enligt tabell 4.

Tabell 4 *Gränsvärden för systematiska fel vid mätning med höghastighetsprofilometrar.*

Klass	Gränsvärden för systematiska fel
1	mindre än eller lika med 1,25 mm
2	mindre än eller lika med 2,50 mm
3	mindre än eller lika med 6,25 mm

Tabell 5 *Klassindelning baserad på samplingsintervall.*

Klass	Samplingsintervall
1	mindre än eller lika med 25 mm
2	större än 25 mm men mindre än eller lika med 150 mm
3	större än 150 mm men mindre än eller lika med 300 mm
4	större än 300 mm

Hudson et al. (1985) har studerat inverkan på olika jämnhetsmätetal av slumpmässiga fel vid profilmätning. Det enda av de studerade jämnhetsmätetalen som har någon likhet med IRI är QI (inch/mile) som beräknas med hjälp av en matematisk modell av ett fjärdedels fordon (quarter-car), dvs. på samma sätt som IRI. Det funna procentuella felet bör därför vara av ungefär samma storleksordning hos IRI som hos QI. Jämnheten anges också i PSI som kan räknas om till IRI med hjälp av följande samband (Paterson, 1986).

$$IRI = 5{,}5 \times \ln\left({}^{5{,}0}\!/\!_{PSI} \right); \qquad (1)$$

Inverkan av samplingsintervallet på verkliga profiler studerades genom att jämföra inverkan på olika mätetal av samplingsintervallen 0,13, 0,3 och 0,61 m. Förlängning av samplingsintervallet från 0,15 till 0,3 m medförde ett fel hos QI av 7,5 % på den jämnaste vägsträckan (PSI = 4,68; IRI = 0,36), 3,7 % på den näst jämnaste (PSI = 3,69; IRI = 1,67) och 1,3 % på den näst ojämnaste (PSI = 1,98; IRI = 5,09). På övriga ytor erhölls inga rimliga resultat. Vid ökning av samplingsintervallet till 0,61 m erhölls inga trovärdiga resultat på någon av sträckorna.

Man framhåller att den signifikanta inverkan av samplingsintervallet på QI (IRI) kan härledas till den algoritm som används vid beräkningen. Vid lösandet av de differentialekvationer som används för att beskriva "quarter-car"-modellen utnyttjas en algoritm som innehåller matriser. Beräkningen av varje enskild punkt i profilen innebär en multiplikation av dessa matriser. Avrundnings- eller approximationsfel som kan förekomma i olika delar av originalmatriserna förvärras genom denna repetitionsprocess, påverkande inte bara sig själva utan även andra matriselement.

Sayers (1988) påpekar att antagandet av slumpmässighet hos en vägprofil är en föreställning som förtjänar viss eftertanke i samband med statistisk analys. En longitudinell vägprofil är inte slumpmässig. Mätning av longitudinella vägprofiler på en given beläggning är repeterbara under förutsättning av att sidoläget hos profilometern bibehålls för samtliga mätningar och att tidsintervallet mellan mätningarna är ganska kort[1]. Det enda slumpmässiga är mätfelet som kan hållas på en ganska försumbar nivå med moderna profilometrar. Icke desto mindre är föreställningen om slumpmässighet mycket användbar vid analyser av fordonspåverkan.

I många fall är verkliga profilmätningar inte tillgängliga som insignaler till fordonsmodeller varför "representativa" insignaler måste användas. För att be-

[1] Vägprofilen kan betraktas som slumpmässig från fordonsdynamisk synpunkt eftersom variationer i vägprofilen inte kan förutses innan fordonet nått dem med framhjulen. Vägprofilen är dock definitivt inte slumpmässig i det generella systemperspektiv som används i flertalet analyser.

stämma validiteten hos en sådan insignal görs lämpligen en jämförelse av dess statistiska egenskaper med motsvarande från verkliga vägar.

Flertalet skrifter som behandlar analys av slumpmässiga signaler beaktar sådant som det förväntade värdet av PSD-funktionen vid varje frekvens, variansen hos PSD-funktionen vid varje frekvens, etc. Om man sålunda beräknar t.ex. ett jämnhetsmätetal för en deterministisk signal som en vägprofil blir också mätetalet deterministiskt. Skattningar av statistiska fel baserade på föreställningen om slumpmässighet är irrelevanta eftersom mätetalet är exakt definierat av profilen, dvs. felanalysmetoder utvecklade för slumpmässiga signaler är inte tillämpbara på vägprofildata. Kommentar: Det anförda torde vara av enbart akademiskt intresse och inte ens Sayers anser sig förhindrad att utnyttja dessa statistiska metoder. Det finns f.ö. knappast några praktiskt användbara alternativa metoder att behandla vägprofiler matematiskt.

I stället för att genom medelvärdesbildning reducera profilen till ett enda jämnhetsmätetal som anses vara representativt för en hel vägsträcka föreslår Sayers (1990) rapportering av vad han kallar "ojämnhetsprofil". Detta innebär att ett flytande medelvärde över någon vald baslängd beräknas med hjälp av ett glättningsfilter som ger samma medelvärde men med bibehållande av ojämnheten representerad som en kontinuerlig funktion av distans.

Vid formulering av specifikationer för vägytans jämnhet och/eller för mätnoggrannhet är det mycket viktigt att beakta längden hos denna baslängd. Variationen hos IRI sedd över någon längdenhet av vägen är större vid korta baslängder än vid längre och detta måste beaktas vid rapportering av instrumentnoggrannhet eller utarbetande av specifikationer för vägytans jämnhet.

Ojämnhetsprofilen är speciellt tillämplig vid fastläggandet av jämnhetsgränser för vägar liksom för specifikation av mätnoggrannhet hos profileringsinstrument, men dess natur och variation måste förstås för att göra detta möjligt. Ett jämnhetskrav baserat på ett visst IRI-värde blir mera stringent ju kortare baslängd som valts. Vid val av baslängd är det lämpligt att beakta att IRI-analys är en "quarter-car"-analys baserad på en simulerad hastighet av 80 km/h. En singulär händelse, såsom ett potthål, påverkar fordonsvibrationerna starkt under ett fåtal tiondels sekunder. En baslängd av 6 m rekommenderas som ett minimivärde att använda vid beräkning av IRI (vid hastigheten 80 km/h motsvaras 6 m av 0,27 s). I princip skall vid beräkning av ojämnhetsprofilen baslängden bestämmas med utgångspunkt från den orsak till ojämnheten som är av intresse. På grund av begränsningarna hos operatören bör alla höghastighetsprofilometrar betraktas såsom hörande till Klass 2 vid baslängder kortare än eller lika med 160 m.

Baslängden är viktig vid studier av reproducerbarheten hos jämnhetsmätningar. Ojämnhetsprofilen medger en bättre metod att jämföra två mätsystem än jämförelse mellan medelvärden över ett antal fasta mätsträckor. Ojämnhetsprofilerna från två mätsystem kan läggas över varandra och om det t.ex. finns en förskjutning mellan startpunkterna framgår detta helt klart. Efter en eventuell justering av startpunkterna kan skillnaderna mellan profilerna beräknas och användas som mått på noggrannheten hos det mätsystem som utvärderas.

Ksaibati et al. (1993) anger följande tre faktorer som är avgörande för noggrannheten hos det uppmätta jämnhetstalet:

mätnoggrannheten hos mätinstrumentet,
förarens körbeteende,
miljöpåverkan.

I syfte att studera instrumentnoggrannheten jämfördes elva exemplar av ”South Dakota Road Profiler” på åtta provsträckor med stor variation i jämnhet och spårdjup. Varje profilometer kördes tre gånger på alla provsträckorna. Det konstaterades att:

alla profilometrarna uppvisade god repeterbarhet såväl vad avser jämnhet som spårdjup,
jämnhets- och spårdjupsdata insamlade med de olika profilometrarna var i flertalet fall signifikant skilda från varandra,
regressionsanalys visade att det fanns ett starkt linjärt samband mellan alla profilometrarna.

Jämnhetsmätningarna visade sig vara repeterbara för de tre operatörer som deltog i provet medan spårdjupsmätningarna inte var det. (Det sistnämnda beror troligen på det lilla antalet sensorer i tvärprofilmätaren vilket gör sidoläget kritiskt). Parvisa jämförelser mellan förarna visade att vad avser jämnhetsmätning erhölls med 95 % sannolikhet samma resultat i 103 fall av 108. Tre av de fem fallen med avvikande resultat inträffade på ytor med lågt jämnhetsvärde. Vad avser spårdjupsmätning gav 92 av 108 samma resultat med 95 % sannolikhet. Här noterades de flesta avvikelserna på ytor med hög ojämnhet.

Egenskaperna hos en vägprofil kan signifikant förändras pga. dygns- och årstidsvariation hos temperatur och fuktighet. Variation hos fuktighetsförhållandena i vägens olika lager kan leda till att undergrundsmaterialet krymper eller sväller med åtföljande ändring av beläggningsytans form. Stora temperaturvariationer kan också leda till att profilen hos en betongvägyta förändras.

Som exempel på effekten av sådana temperatur- och fuktighetsförändringar anges att över en period om 72 timmar med konstant temperatur (-2,2 resp. +3,9C^{o}) ökade IRI-värdet 11 % vid en regnmängd av 70 mm över perioden jämfört med samma period utan regn. Över samma periodlängd ökade IRI-värdet 1 % vid en temperaturökning från -2,2 till +3,9C^{o} vid konstant regnmängd, 0 eller 70 mm.

Perera et al. (1994) ger upplösningsdata för Dipstick och avvägningsinstrument. För Dipstick anges upplösningen till 25 μm och för avvägning 0,25 mm. För en enskild mätning har det studerade avvägningsinstrumentet en standardavvikelse av 0,3 mm vid ett avstånd av 50 m och standardavvikelsen 0,5 mm vid avståndet 100 m.

Man har jämfört IRI erhållna från fyra höghastighetsprofilometrar med IRI erhållet från Dipstick och beräknade kvoten mellan medel-IRI för fyra höghastighetsprofilometrar vid mätning i höger och vänster hjulspår på fyra asfaltsträckor och fyra betongsträckor och IRI uppmätt med Dipstick, dvs. 64 sådana kvoter (se tabell 6).

Tabell 6 *Kvoten mellan medel-IRI för fyra höghastighetsprofilometrar och IRI uppmätt med Dipstick.*

Hjulspår	Asfaltsträckor				Betongsträckor			
Vänster	0,95	0,95	0,98	0,95	0,90	0,92	1,11	0,92
	0,95	0,94	0,90	0,83	0,93	1,01	1,05	1,03
	0,97	0,90	1,00	0,83	0,88	0,95	1,03	1,02
	0,95	0,94	0,90	0,84	0,96	1,02	1,06	1,06
Höger	0,99	0,92	0,98	1,04	0,93	0,94	1,02	0,99
	1,06	1,00	1,00	1,03	0,95	0,95	1,01	1,01
	1,01	1,00	1,04	1,00	0,95	0,99	1,01	0,99
	0,97	0,95	0,98	0,87	0,93	0,94	0,99	0,99

Tabell 7 visar medelvärden av dessa kvoter över höger och vänster hjulspår resp. över asfalt- och betongsträckor.

Tabell 7 *Medelvärden över höger och vänster hjulspår resp. över asfalt- och betongsträckor av i tabell 6 visade kvoter.*

Hjulspår	Beläggning	Medelvärde
Höger	Asfalt	0,9902
	Betong	0,9745
	Alla	0,9824
Vänster	Asfalt	0,9235
	Betong	0,9908
	Alla	0,9572
Båda	Asfalt	0,9568
	Betong	0,9826

I tabell 6 redovisade kvoter har följande fördelning:

4,7 %	i intervallet	0,80–0,85
9,4 %	i intervallet	>0,80–0,90
31,2 %	i intervallet	>0,90–0,95
26,6 %	i intervallet	>0,95–1,00
21,9 %	i intervallet	>1,00–1,05
4,7 %	i intervallet	>1,05–1,10
1,6 %		>1,10

Hälften av observationerna (32 stycken) gav resultatet ≤ 0,97.

Resultaten visar att det i huvudsak är god överensstämmelse mellan IRI uppmätt med Dipstick och IRI uppmätt med höghastighetsprofilometrar men att de sistnämnda i gemen givit något lägre IRI-värden än Dipstick. Underskattningen är större på asfalt än på betong och större i vänster hjulspår än i höger.

Inverkan av slumpmässiga fel på ett beräknat IRI-värde studerades för vägprofiler med olika jämnhetsnivå. För ett antal mätningar med höghastighetsprofilometer beräknades resp. IRI-värde. Därefter adderades ett slumpmässigt fel mellan -0,25 och +0,25 mm genererat av en slumptalsgenerator till varje punkt i den registrerade profilen och IRI beräknades för den sålunda kontaminerade profilen. Denna procedur upprepades sedan för slumpmässiga fel inom området ±0,5 mm; ±0,75 mm och ±1 mm. Resultatet av dessa beräkningar visas i tabell 8.

Tabell 8 *Inverkan på IRI av slumpmässiga fel i profilmätningen.*

IRI för original-profilen (m/km)	**IRI för profil med slumpmässiga fel (m/km)**				**Procentuell ändring av IRI pga. slumpmässiga fel**			
	Det slumpmässiga felets variationsområde (mm)				**Det slumpmässiga felets variationsområde (mm)**			
	±0,25	**±0,5**	**±0,75**	**±1**	**±0,25**	**±0,5**	**±0,75**	**±1**
0,76	0,78	0,90	0,97	1,19	3,3	19,0	28,5	56,9
1,07	1,10	1,16	1,26	1,37	2,8	8,3	18,3	28,2
1,64	1,65	1,68	1,77	1,79	0,4	2,5	8,1	8,8
2,35	2,35	2,40	2,37	2,65	–0,2	1,9	0,8	8,2
4,43	4,43	4,44	4,44	4,51	–0,1	0,2	0,2	1,8

Ett slumpmässigt fel i en profil med högt IRI-värde har ringa inverkan på det beräknade IRI-värdet. För profiler med relativt låga IRI-värden kan slumpmässiga fel ha stor effekt på IRI, beroende på storleken hos felet.

Enligt Sayers och Karamihas (1995) kan samma profil kan ge olika resultat från profilometrar av olika fabrikat. Samma profil kan också ge olika resultat vid upprepad mätning med samma profilometer men med olika inställning. Till exempel kommer RMS-värdet för profillutningen att öka med minskande samplingsintervall.

Vad avser profilometrars eventuella validitet sägs att:

a) en valid profilometer ger samma statistiska värden som den sanna profilen ger,
b) det statistiska resultat från två eller flera valida profilometrar är direkt jämförbara utan omräkningar,
c) validiteten hos en profilometer beror av den avsedda användningen.

Ett relevant mått är ett mått som genom forskning kopplats till vägyteegenskaper som troligen är betydelsefulla i något eller några avseenden.

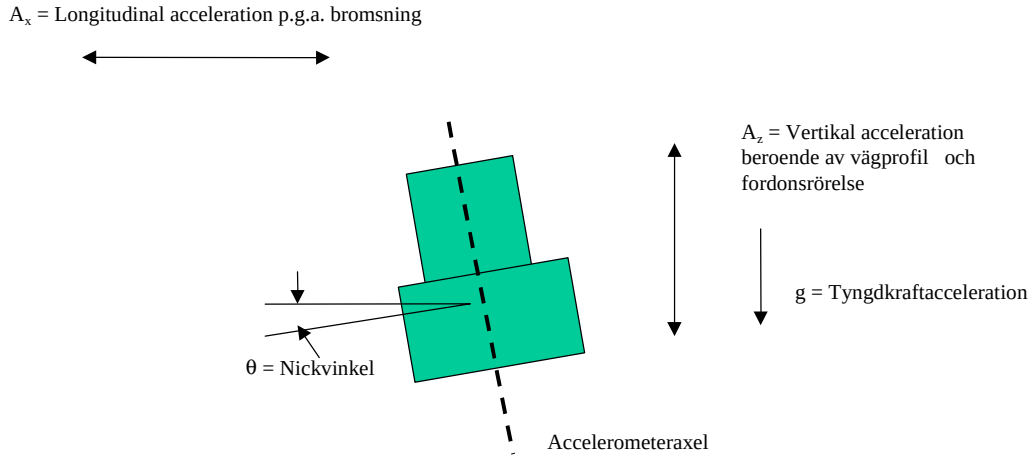
Vid vägyteinventering är inte noggrannheten hos det enskilda mätvärdet kritiskt, inte heller möjligheten att peka ut enskilda lokala ojämnheter på 10 m när. Mätfel försvinner genom medelvärdesbildning över den enskilda mätsträckan och påverkar inte den totala bilden.

Moderna höghastighetsprofilometrar tillåter hastighetsvariation under mätning. Hastighetsändringar kompenseras fullständigt om accelerometeraxeln är vertikal och den longitudinella accelerationen är lika med noll. I verkligheten är dock dessa villkor sällan helt uppfyllda. Då mätfordonet färdas på en ojämn väg

kommer fordonskarosseriet i nick- och krängsvängning vilket medför att accelerometerns känslighetsaxel avviker från vertikalen. Dessa vinklar är normalt små, vanligen mindre än en grad. Vid bromsning och körning i kurva kan dessa vinklar dock bli större. Den longitudinella accelerationen är liten utom vid kraftig bromsning eller hög acceleration. Ett potentiellt problem uppkommer då accelerometeraxeln lutar (se figur 1) som t.ex. när fordonet accelererar. (Sayers och Karamihas behandlar bara bromsningsfallet men resonemanget är det samma för sidaccelerationsfallet.)

Cosinus för nickvinkeln 1° är 0,99985. Vid tyngdkraftaccelerationen 1 g är felet (1–0,99985) = 0,00015 g. Sinus 1° är 0,0175. Om mätfordonet bromsas med retardationen 0,1 g tillkommer att fel av 0,00175 g. Denna acceleration är så liten att den inte kommer att synbart påverka insamlade profildata.

Både den longitudinella accelerationen och nickvinkeln är ungefär proportionella mot bromskraften. Felet i mätdata är ungefär proportionellt mot bromskraften i kvadrat. För t.ex. en nickvinkel av 2° och en retardation av 0,2 g är det vertikala felet 0,007 g.



Figur 1 *Inverkan av accelerometerlutning på utsignalen.*

Repeterbarheten är vanligen bättre vid mätning av långa sträckor än vid kortare sådana. Vid bearbetning av profiler i syfte att beräkna IRI bör det vara möjligt att uppnå en repeterbarhet av 5 % för profiler av längden 1 mile (1,6 km). Vid omsorgsfull mätning bör det vara möjligt att få en repeterbarhet av 2 %. Vid kortare mätsträckor blir variationerna större.

Det s.k. RMS-felet indikerar enligt ovan det förväntade felet i en viss profilmätning. Om man inte vidtar speciella åtgärder för att tillse att profilmätningen sker i precis samma mätlinje som den i vilken referensmätningen gjorts kan ett RMS-fel mindre än 5 % förväntas för profiler av längden ungefär en mile (1,6 km) under förutsättning av att profilometern är mycket noggrann.

Systematiska fel av storleksordningen 1 % eller mindre kan förväntas för profilometrar som är valida mätare av det index som är av intresse. Signifikanta systematiska fel betyder att profilometern inte är valid för den avsedda mätningen.

Regressionslinjen genom PSD för en höjdprofil uttryckt i log/log-diagram uppvisar ofta en konstant lutning över hela (eller åtminstone det centrala) våglängdsområdet. Denna lutning anses i ISO Standard 8608 vara lika med -2.

Lutningen hos verkliga profiler kan emellertid variera runt värdet -2 med kanske -2,5 som ett mera typiskt värde.

PSD för en s.k. lutningsprofil är relativt konstant över hela (eller åtminstone det centrala) våglängdsområdet, dvs. regressionslinjen genom spektrum är i stort sett horisontell. Detta har stor betydelse för förståelsen av källor till mätfel. Felaktigheter i höjdmätningen tenderar att felaktigt höja PSD-funktionen för höga vågtal (korta våglängder). Felaktigheter i accelerometern eller den mjukvara som hanterar accelerometersignalen tenderar att felaktigt höja PSD-funktionen för låga vågtal (långa våglängder). Brus i accelerometersignalen är ett exempel på ett sådant fel.

Det faktum att PSD för lutningsprofilen är relativt konstant över det våglängdsområde som är av betydelse för IRI-värdet medför att IRI reagerar mer eller mindre enhetligt (inom en faktor 2) på lutningsändringar för våglängder längre än 1,8 m och kortare än 24 m. Ett rimligt noggrannhetskrav för profilometrar optimerade för att ge IRI kan vara att specificera noggrannheten vid mätning av profillutning för sinusoider med våglängder mellan 3 och 24 m. Detta krav kan uttryckas i form av ett maximalt lutningsmätfel, t.ex. 1 % eller i form av ett maximalt fel i IRI, t.ex. 0,03 m/km.

Det är enkelt att bestämma inverkan av mätfel på IRI eftersom IRI är linjärt relaterat till sinusoidens amplitud. Betrakta exemplen i tabell 9. Antag att sinusoidernas amplitud är behäftat med att mätfel av 0,127 mm. Detta innebär ett fel av 10 % för sinusoiden med våglängden 3,05 m och följaktligen ett fel i IRI av 10 % (0,237 m/km). Samma amplitudfel för sinusoiden med våglängden 15,24 m innebär ett fel av 2 % och ett fel i IRI lika med 0,05 m/km. För den längsta våglängden innebär amplitudfelet 0,127 mm ett IRI-fel av 0,5 %, dvs. försumbara 0,0008 m/km. Uppenbarligen säger inte en begränsning av amplitudfelet mycket om noggrannheten i erhållet IRI-värde.

Tabell 9 *Exempel på sinusvågor med tillhörande IRI-värden.*

Våglängd (m)	Amplitud (mm)	Lutningsamplitud (m/km)	IRI (m/km)
60,96	25,40	2,62	0,15
15,24	6,35	2,62	2,53
3,05	1,27	2,62	2,37

En begränsning av lutningsfelet är mera direkt relaterat till felet i IRI. Antag att lutningsfelet är 0,03 m/km. Felet i IRI blir då nära 0,03 m/km för de två kortare våglängderna och ungefär noll för den längsta.

Sayers och Karamihas (1996) menar att publicerade noggrannhetsspecifikationer för vägprofilmätning inte är tillräckliga för att göra det möjligt att vid en godtycklig analys ange den absoluta noggrannhet som är att förvänta. Typen av analys är av betydelse. Två profilometrar kan t.ex. ha samma noggrannhet vid bestämning av IRI men ändå ha drastiskt olika noggrannhet vid bestämning av något annat jämnhetsmått.

Det viktigaste resultatet av 1993 och 1994 års RPUG-studier var att felet i rutinmätningar av IRI var oacceptabelt stort. I experimentet deltog nio höghastighetsprofilometrar som vardera mätte varje mätsträcka tio gånger. Som referensinstrument användes Dipstick. Fyra av höghastighetsprofilometrarna hade ultra-

soniska höjdmätare, tre hade optiska höjdmätare medan de två återstående hade laserbaserade höjdmätare. Resultaten av jämförelserna kan sammanfattas sålunda:

1 IRI-värdena erhållna från Dipstick var ofta lägre än IRI-medelvärdena från höghastighetsprofilometrarna,
2 mätresultaten från de ultrasoniska mätarna var ofta signifikant högre än resultaten från de övriga höghastighetsprofilometrarna,
3 även om medelvärdena från de olika höghastighetsprofilometrarna var signifikant olika var de ofta resonabelt repeterbara (inom ±3 % av medelvärdet),
4 på ytor med grov textur var IRI-värdena erhållna från de ultrasoniska profilometrarna systematiskt höga och mindre repeterbara än övriga mätningar.

Vid ett givet tillfälle uppvisar en linje längs en väg en enda sann profil och följaktligen ett enda sant IRI-värde. Det skulle kunna förväntas att höghastighetsprofilometrarna skulle vara kapabla att producera IRI-värden nära detta sanna värde. Konstaterade skillnader kan bero på tre olika faktorer:

1 föraren kan ha gjort ett misstag, vanligen mätt en annan linje än den avsedda och följaktligen en annan profil,
2 profilometern kan var felaktig, t.ex. begränsningar hos sensorerna, elektroniken och/eller mjukvaran som beräknar profilen från sensorsignalerna,
3 den sanna profilen kan pga. temperatur- eller andra miljöeffekter ha ändrats mellan mätningarna.

I realiteten kan alla tre faktorerna påverka en enskild mätning. Den första och tredje faktorn kan emellertid kontrolleras på olika sätt. Ändringar i profilen kan t.ex. minimeras genom att alla mätningar genomförs inom en kort tidsrymd. Med hjälp av ett statiskt instrument som t.ex. Dipstick kan felaktigheter i lokaliseringen av mätlinjen minimeras. **Kommentar**: Problemet är dock att kunna följa denna linje med höghastighetsprofilometern, inte att kunna göra det med Dipstick eller något annat långsamt mätdon.

Även felaktig startpunkt kan ge felaktigt mätresultat. Vid 1993 års RPUG-mätningar, med enligt ovan deltagande av nio höghastighetsprofilometrar, gav vid mätning av en provsträcka med längden 207 m ett fel i startpunkt av upp till 9 m ett IRI-fel i området -2 till +4 %.

Sayers och Karamihas (1996) konstaterar avslutningsvis att variationen mellan olika höghastighetsprofilometrar är större än vad som hade förväntats. Publicerade specifikationer för instrumentklass 1 är inte tillräckliga för att definiera den absoluta noggrannhet som vore att förvänta vid alla tänkbara analyser. Till exempel skulle specifikationer avseende noggrannhet vid mätning av lutningsprofil vara mera ändamålsenliga för instrument som huvudsakligen används för bestämning av IRI. Variation hos mätresultatet vid upprepad mätning tenderar att minska med ökande profileringslängd. Till exempel kan ett instrument som uppvisar en standardavvikelse av 0,5 % över en mätsträcka av 1,6 km ge en standardavvikelse av 5 % över 60 m.

I ett Appendix betitlat "Literature Survey" anger Sayers och Karamihas att upplösningen 1 mm erfordras för avvägningsinstrument som används för kalibrering av jämnhetsmätare för mätning av IRI på alla ytor utom de jämnaste. För mätning på mycket jämna ytor fordras en upplösning av 0,5 mm hos kalibreringsinstrumentet. **Kommentar**: Det anges inte var IRI-gränsen mellan jämna och

mycket jämna ytor anses ligga. För storleken hos samplingsintervallet vid bestämning av IRI rekommenderas 305 mm eller mindre.

Karamihas et al. (1999) menar att hur profilmätningar skall genomföras i praktiken beror av den slutliga användningen av mätdata. Slumpmässiga fel kan i viss utsträckning tolereras vid vägnätsmätningar, dock inte några systematiska fel.

Noggrannhetskravet vid objektmätning är av följande skäl mycket högre:

1 objektmätning utförs ofta på relativt jämna vägytor där flertalet källor till mätfel är mest uttalade,
2 mätningarna utnyttjas för mera detaljerade analyser såsom t.ex. att lokalisera punkter längs vägen som kräver speciell uppmärksamhet och planering av erforderliga åtgärder.

Tabell 10 visar en sammanställning av olika faktorer som påverkar profilmätningens noggrannhet i form av systematiskt fel, överensstämmelsen mellan olika profilometrar, mätningarnas repeterbarhet och tolkbarheten av mätdata.

Vad avser mätningarnas noggrannhet har Karamihas et al. följande kommentarer till tabellen:

Beräkningsalgoritmer som arbetar simultant med profilmätningen kan kontinuerligt ge ett korrekt jämnhetsvärde men introducerar ett fasfel i profilen sådant att de längre våglängderna förflyttas något relativt de kortare. Detta bör beaktas vid försök att identifiera punkter som behöver speciell uppmärksamhet.

Flertalet profilometrar mäter longitudinell distans med en noggrannhet av 0,5 %, resulterande i ett fel i IRI av samma storleksordning vilket anses sakna betydelse.

Vägytans textur kan i vissa fall ge "aliasing"-fel. I synnerhet profilometrar med ultraljudsensorer är utsatta för denna felkälla vilket kan leda till IRI-värden som är 50–100 % för höga. Profilometrar med laser- och infrarödsensorer är inte känsliga för vägytans textur under förutsättning av att databearbetningsprogrammet innehåller korrekta "anti-aliasing"-filter.

Ytskador med en utsträckning motsvarande storleken hos sensormätpunkten (t.ex. smala tvärgående sprickor med en bredd motsvarande storleken hos ljusfläcken hos en laser) kan också försämra mätnoggrannheten om "anti-aliasing"-filter saknas.

Det första steget vid beräkning av IRI är att beräkna ett flytande medelvärde över en baslängd så nära 250 mm som möjligt. Om samplingsintervallet är av samma storleksordning som den tilltänkta baslängden fås emellertid en effektiv baslängd som i vissa fall avviker något från den avsedda. Detta pga. att antalet mätpunkter inom baslängden måste vara ett heltal. Den effektiva baslängden är därför alltid samplingsintervallet multiplicerat med ett heltal. Antalet punkter inom baslängden beräknas enligt nedan.

$$I_B = NH(B/\Delta); \qquad (2)$$

Där I_B = antalet punkter inom baslängden (måste vara ≥1),
NH = närmaste heltal,
B = baslängden,
Δ = samplingsintervallet.

Tabell 10 *Faktorer som påverkar vägprofilmätningens resultat.*

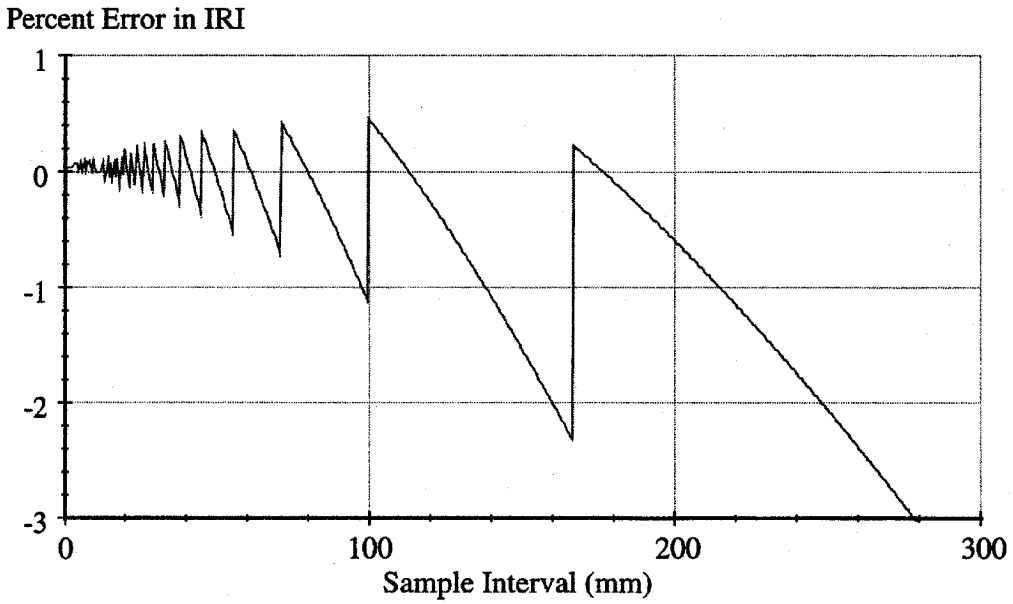
Faktor	**Noggrann-het**	**Överens-stämmelse**	**Repeter-barhet**	**Tolkning**
Profilometerns utformning	X	X		X
Samplingsintervall	X			
Beräkningsalgoritm	X			
Automatisk felkontroll	X			
Höjdsensorer	X	X		
Accelerometrar	X			
Mätare för longitudinell distans	X			
Antal sensorer				X
Avstånd mellan sensorer		X		
Vägytans form	X		X	
Variationer transversalt			X	
Dygnsvariationer			X	
Årsvariationer			X	
Textur	X			
Ytskador	X		X	
Kurvatur	X			
Backighet	X			
Miljöförhållanden	X			
Vind	X			
Temperatur	X			
Luftfuktighet	X			
Fuktighet på vägytan	X			
Löst material (skräp) på vägytan	X			
Vägmarkeringar	X			
Beläggningens färg	X			
Omgivningsljus	X			
Mätningens utförande	X		X	X
Mäthastighet	X			
Hastighetsändringar	X			
Sidoläge			X	
Start- och stoppmarkering			X	
Fel i längdled			X	
Segmentlängd				X
Datainsamlingsfrekvens				X
Funktionskontroll av profilmetern	X			
Förare och operatör	X		X	

Kvoten inom parentesen är givetvis sällan ett heltal varav följer att den effektiva baslängden $I_B \times \Delta$ sällan är 250 mm. Tabell 11 ger några exempel på beräknade effektiva baslängder. Den effektiva baslängden ligger i området 175 till 300 mm. Denna variation i effektiv baslängd ger upphov till ett systematiskt mindre fel i resultatet. I tabell 11; Effektiva baslängder visar känsligheten hos IRI för samplingsintervallets längd på en väg vars lutnings-PSD har karaktären av vitt brus. (Ansättande av lutnings-PSD i form av vitt brus är en vanlig approximation av en typisk väg). En verklig väg skulle ge endast en mindre modifikation av resultaten enligt Figur 2.

Felet ändras kontinuerligt med längden av den effektiva baslängden ända tills antalet punkter i medelvärdesbildningen ändras från ett heltal till ett annat. Detta förorsakar en abrupt ändring av den effektiva baslängden och därmed en abrupt ändring av det förväntade felet. Det största språnget inträffar vid samplingsintervallet 167 mm vilket är övergången från två punkter i det flytande medelvärdet (baslängd 334 mm) till en punkt (baslängd 167 mm). I detta fall ändras ett negativt fel av 2,3 % till ett positivt av 0,2 %. När samplingsintervallet ökar bortom denna punkt blir IRI stadigt mindre eftersom mindre och mindre del av det våglängdsområde som påverkar IRI blir föremål för mätning. Det förväntade felet är mindre än 2 % ända tills samplingsintervallet uppgår till 160 mm.

Tabell 11 *Effektiva baslängder.*

Samplingsintervall Δ (mm)	B/Δ	I_B	Effektiv baslängd (mm)
25	10,00	10	250
50	5,00	5	250
75	3,33	3	225
100	2,50	3	200
125	2,00	2	250
150	1,67	2	300
175	1,43	1	175
200	1,25	1	200
225	1,11	1	225
250	1,00	1	250
275	0,91	1	275
300	0,83	1	300

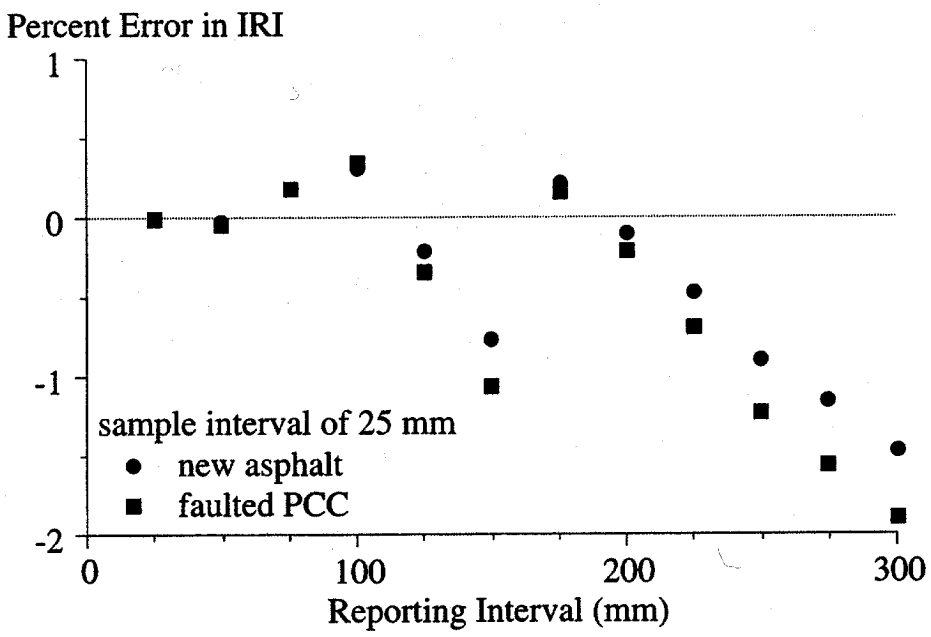


Figur 2 *Förväntat fel i IRI som funktion av samplingsintervallets längd (Karamihas et al. 1999).*

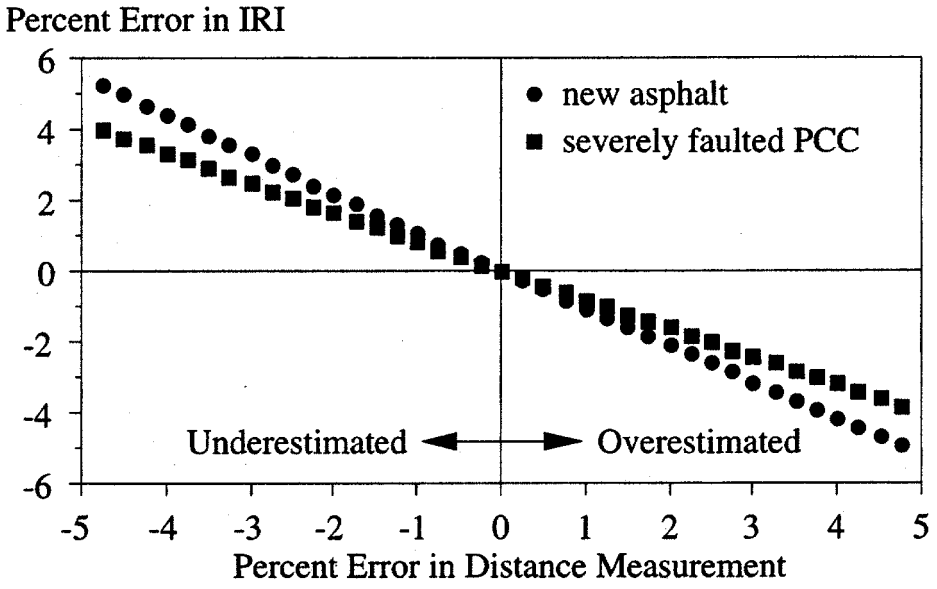
Denna typ av fel kan minimeras genom att samplingsintervallet sätts till 55 mm eller mindre, varvid det systematiska felet begränsas till 0,5 %. Därefter beräknas det flytande medelvärdet över någon baslängd (lämpligen 250 mm eftersom det är det första steget i beräkningen av IRI) varefter den sålunda filtrerade profilen samplas med ett större intervall och lagras.

Figur 3 visar felet i IRI som funktion av lagringsintervallet, baserat på en profil som samplats med intervallet 25 mm och medelvärdesberäknats över 250 mm. Det systematiska felet är mindre än 1 % om lagringsintervallet är mindre än eller lika med 125 mm. Även lagringsintervall upp till 250 mm är acceptabla vid beräkning av IRI om samplingsintervallet är tillräckligt kort.

Bristande noggrannhet vid mätning av longitudinell distans förorsakar ett mindre fasfel i profilens våglängdsinnehåll. Våglängdskomponenter som ligger utanför det område som påverkar t.ex. IRI blir felaktigt inflyttade i detta område medan andra våglängder som skulle ha inverkan på IRI blir utflyttade. Andra delar av våglängdsområdet inom det intressanta området blir föremål för felaktig viktning. Detta leder till ett systematiskt fel i IRI. Felaktig distansmätning leder också till att ett rapporterat jämnhetsvärde kommer att knytas till felaktig del av den uppmätta vägen. Ett vägavsnitt som t.ex. uppmäts som kortare än det verkligen är ger vidare ett för högt IRI-värde. Figur 4 ger det procentuella felet i IRI för fel i distansmätningen.



Figur 3 *Inverkan av lagringsintervallets längd på IRI vid profilmätning med samplingsintervallet 25 mm (Karamihas et al. 1999).*



Figur 4 *Fel i IRI förorsakat av fel i distansmätning (Karamihas et al. 1999).*

3.2 EVEN/FILTER-experimentet

3.2.1 Referensprofilmätningar

Av yppersta vikt för ett lyckosamt genomförande av EVEN/FILTER-experimentet (B. De WIT, E. Kempkens, L. Sjögren and D.-M. Ducros, 1999), som syftade till att bestämma noggrannheten hos höghastighetsprofilometrar, var att längsprofilerna hos provsträckorna, de s.k. referensprofilerna, kunde inmätas med hög och känd noggrannhet och med av deltagarna accepterad mätmetod.

Utvärderingen av mätningarna innefattade en punkt-för-punkt-jämförelse mellan av höghastighetsprofilometrarna registrerade längs- och tvärprofiler och motsvarande profiler uppmätta med långsamma men noggranna referensinstrument. Här avrapporterat projekt är begränsat till att endast omfatta erforderlig mätnoggrannhet vid längsprofilmätning och den del av EVEN/FILTER-experimentet som behandlar tvärprofilmätning lämnas därför här utan avseende.

Eftersom jämförelserna som nämnts skulle baseras på punkt-för-punkt-jämförelser och existerande profilometrar använder olika samplingsavståndet måste referensprofilerna vara kända i form av en i princip kontinuerlig kurva där amplitudvärden kan tas ut med för varje deltagande aktuellt samplingsavstånd.

Ett förförsök som syftade till att fastställa noggrannheten hos ett antal tänkbara referensinstrument, genomfördes hos Federal Highway Administration i McLean, Virginia, USA, i oktober 1997. VTI:s referensinstrument PRIMAL, (se bilaga 3) var upptagen av andra mätningar i Sverige och kunde därför tyvärr inte delta. Av okänd anledning har resultatet av denna studie aldrig delgivits den grupp som organiserade FILTER-experimentet.

För att så vitt möjligt säkerställa hög noggrannhet hos referensprofilerna skulle dessa enligt den ursprungliga planen inmätas på tre olika sätt. Amplitudvärden för var tionde meter längs mätsträckan skulle fastställas med hjälp av ett automatiskt avvägningsinstrument (totalstation, se bilaga 3). Hela mätsträckan skulle sedan mätas med en stegande profilmätare ”Swivelling Dipstick” (vanligen endast ”Dipstick", se bilaga 3) som ger amplitudvärden med inbördes avstånd av 250 mm. Vid eventuell avvikelse i någon mätpunkt mellan amplitudvärdet från avvägningen och motsvarande från den stegande profilmätaren skulle den sistnämnda korrigeras i denna punkt och även proportionellt mot samplingsavståndet i mätpunkterna bakåt till föregående punkt vars amplitud är känd från avvägningen. Slutligen skulle hela sträckan mätas med en i princip kontinuerlig profilmätare (mycket kort samplingsavstånd). Vid eventuella avvikelser mellan den "kontinuerliga" profilen och den korrigerade stegade profilen skulle den förstnämnda korrigeras på motsvarande sätt. Det förutsattes också att alla dessa mätningar skulle genomföras under kortast möjliga tidsrymd och i så nära anslutning till mätningarna med höghastighetsprofilometrarna som möjligt.

Denna procedur följdes också i princip men med vissa avsteg som redovisas i det följande. Avvägning skedde på avsett sätt i såväl EVEN- som FILTER-experimenten. Mätning med Dipstick kunde inte genomföras samtidigt med avvägningarna i FILTER-experimentet utan först två veckor senare. I syfte att kontrollera om vägytan förändrats under denna tidsrymd genomfördes profilmätning med "Walking Profiler" (se bilaga 3) både i samband med avvägningarna och vid mätningarna med Dipstick. Ytterligare en avvikelse var att mätningar med Dipstick bara kunde genomföras på de provsträckor som låg på en avstängd provbana men inte på de sträckor som låg på motorväg eftersom detta hade krävt trafikavstängning vilket inte var möjligt att genomföra.

För mätning av den kontinuerliga referensprofilen föreslogs från amerikanskt håll användning av ett instrument kallat ”Rolling Dipstick” (se bilaga 3) som är ett i Europa föga känt instrument och med vid experimenttillfället okänd funktion och okänd noggrannhet. För att säkerställa att åtminstone referensprofilerna vid det europeiska delexperimentet skulle uppmätas med hög och känd noggrannhet beslöts att i denna del av experimentet uppmäta den kontinuerliga profilen med utnyttjande av den vid VTI utvecklade profilmätaren PRIMAL.

I FILTER-experimentet inmättes sålunda referensprofilerna vid ett tillfälle med hjälp av totalstation, PRIMAL och "Walking Profiler" och två veckor senare även med "Swivelling Dipstick". I EVEN-experimentet inmättes referensprofilerna med hjälp av totalstation, Swivelling Dipstick och Rolling Dipstick. Detta avser mätningarna i såväl USA som Japan.

Referensprofilerna förutsattes bli inmätta med hjälp av de noggrannaste mätinstrument som stod att uppbringa. Det är därför inte möjligt att ange någon uppnådd mätnoggrannhet eftersom detta förutsätter tillgång till ännu noggrannare mätmetoder. Sådana kan i och för sig troligen uppbringas men det torde innebära mätprocedurer som av praktiska skäl inte kan genomföras på vägprofiler, framför allt inte av den sammanlagda väglängd det handlar om här.

3.2.2 Höghastighetsprofilometri

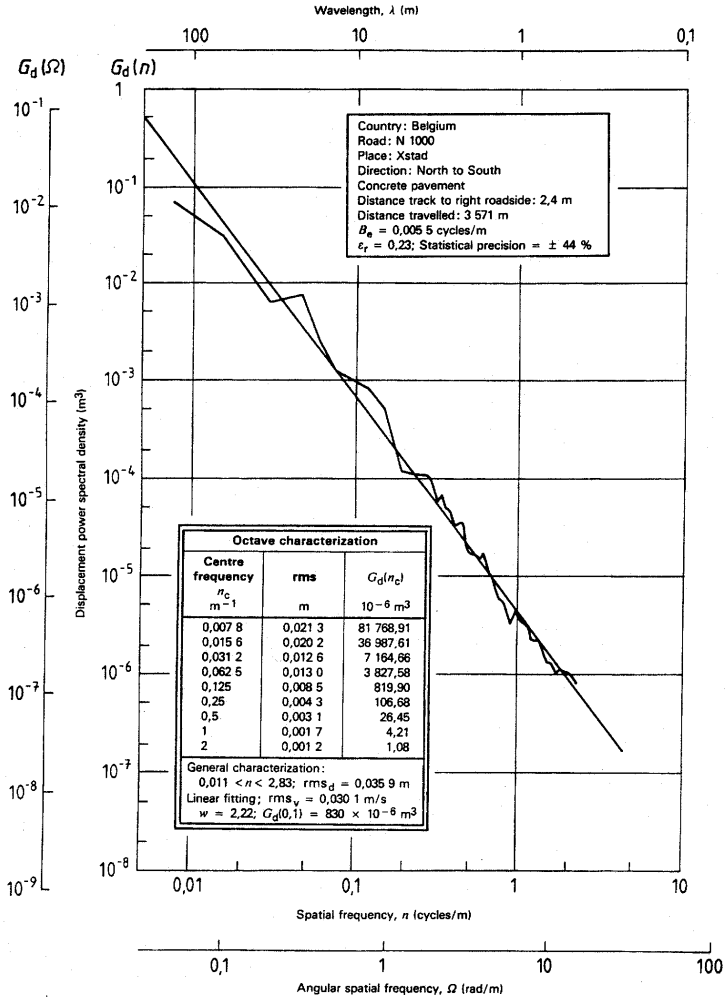
Inverkan av mätfel på IRI

TRL har som ovan nämnts inom ramen för FILTER-experimentet genomfört en teoretisk studie av inverkan av mätfel på ett antal mätetal för vägytans jämnhet i längsled (Willet et al., 2000). Det enda av dessa studerade jämnhetsmätetal som är av intresse för svenska förhållanden är IRI och i det följande presenteras därför endast resultat avseende detta jämnhetsmått.

Studien omfattar emellertid inte bara inverkan av mätfel på mätetalen utan även inverkan av samplingsintervallets längd samt den sträcka över vilken profildata medelvärdesberäknats före beräkning av det rapporterade mätvärdet. Även dessa resultat presenteras i det följande eftersom kännedom om storleksordning av de avvikelser från "sant" värde som dessa valbara parametrar förorsakar ger ett bättre perspektiv på storleksordningen hos de rena mätfelen.

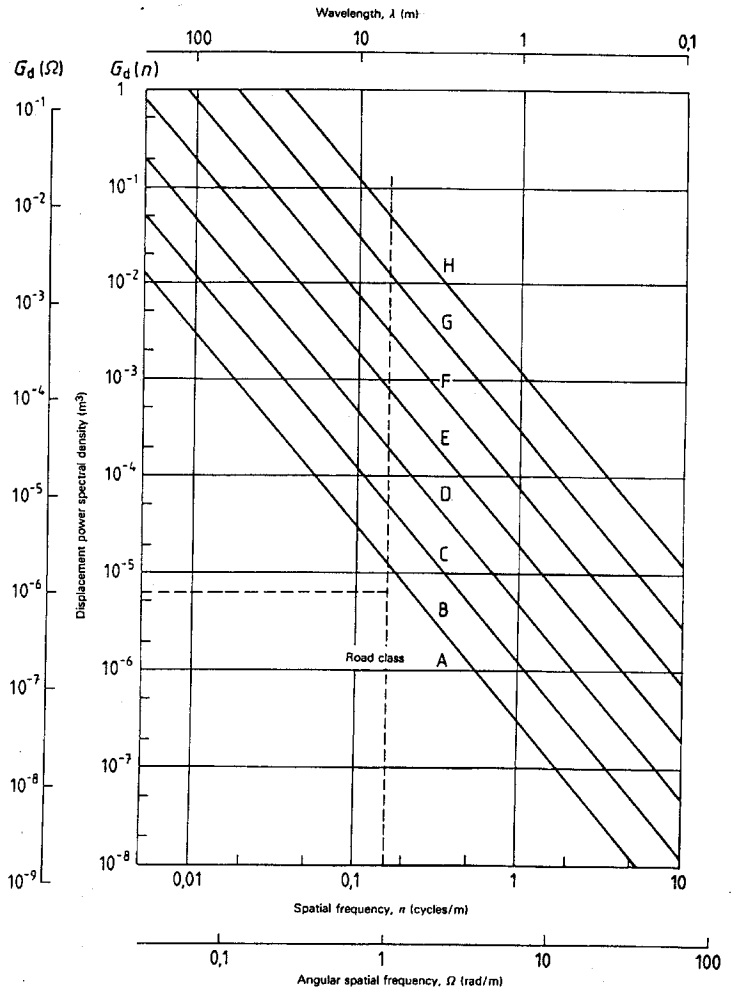
Författarna diskuterar vad som menas med "sant" värde på ett mätetal och konstaterar att detta borde vara det värde som beräknas med utgångspunkt från den sanna profilen. Man konstaterar emellertid också att det är omöjligt att beräkna ett sådant sant värde eftersom den tillgängliga profilinformationen utgörs av ett antal diskreta punkter och inte en kontinuerlig kurva. Lösningen på problemet är att med "sant" värde menas ett värde som beräknas från en profil som samplats med mycket litet samplingsavstånd. Det "sanna" värdet är sålunda inte ett i strikt mening sant värde utan ett referensvärde med vilket motsvarande värden beräknade på annat sätt jämföres.

Studien är baserad på artificiella vägprofiler konstruerade med hjälp av den inverterade Fouriertransformen med utgångspunkt från ett idealiserat frekvensspektrum (PSD) bestående av en rät linje i ett log/log-diagram med amplitud-PSD som funktion av vågtalet (se figur 5).



Figur 5 *Vägprofilspektrum (ISO Standard 8608).*

Genom att applicera olika serier av slumpad fasinformation konstruerades 300 artificiella profiler vardera för fyra jämnhetsklasser definierade i ISO Standard 8608 (se figur 6 och tabell 12).



Figur 6 *Jämnhetsklassificering enligt ISO 8608.*

Tabell 12 *PSD-värde motsvarande vågtalet 0,1 cykler/m (våglängd 10 m) för de fyra jämnhetsklasserna och motsvarande ungefärliga IRI-värden.*

Jämnhetsklass enligt ISO 8608	$G(n_0)$ (10^{-6} m^3)	IRI (mm/m)
A	16	2,2
B	64	4,3
C	246	8,6
D	1024	17,2

De artificiella profilerna hade en längd av ungefär 270 m och hade ett samplingsavstånd av ca 0,52 mm. (De kallas i de följande för "detaljerade profiler"). Olika vägytemätetal, inklusive IRI, beräknades för var och en av de 300 profilerna.

Vid studiet av inverkan av samplingsavståndets storlek samplades de detaljerade profilerna med samplingsavståndet (Δ) i intervallet 1,0 till 512,0 mm i sjättedelsoktavsteg enligt formeln:

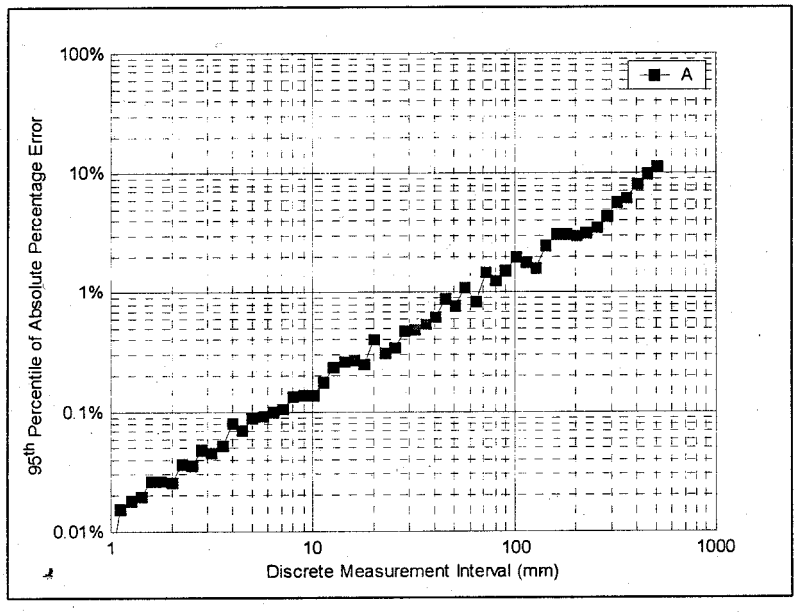
$$\Delta = 1{,}0 \times 2^{n/6} \text{ mm för n = 0, 1, 2, 3, …., 54;} \qquad (3)$$

Profilhöjden i varje punkt interpolerades från de detaljerade profilerna med hjälp av en s.k. kubisk spline. Detta genomfördes sålunda för alla de 300 detaljerade profilerna och de aktuella jämnhetsmätetalen beräknades för alla varianter av profilerna som blev resultatet av de olika samplingsintervallen. Det absoluta procentuella felet beräknades enligt formeln:

$$E = \left| \frac{\left(V - V_{ref}\right)}{V_{ref}} \right| \times 100 ; \qquad (4)$$

där E = absolut procentuellt fel
V = värdet av vägytemätetalet vid valt samplingsavstånd
V_{ref} = värdet av vägytemätetalet vid referenssamplingsavståndet 0,520 mm

För varje samplingsavstånd fanns sålunda 300 E-värden. Som redovisat mätfel, valdes 95-percentilvärdet av det absoluta procentuella felet. Resultatet vad avser IRI och jämnhetsklass A framgår av figur 7. Mätfelen blir generellt mindre för ojämnare vägar varför resultatet avseende jämnhetsklass A är det värsta fallet.



Figur 7 *95-percentilvärdet av det absoluta procentuella felet hos IRI för olika samplingsintervall i område 1, 0 till 512,0 mm. Vägar med jämnhetsklass A enligt ISO 8608.*

Eftersom samplingsavståndet hos Laser RST vid alla rimliga mäthastigheter är mindre än 1 mm, är mätfelet av storleksordningen 0,01 % vilket givetvis är insignifikant. Detta goda resultat torde dock sammanhänga med att IRI-beräkningen innehåller beräkning av ett flytande medelvärde över 250 mm vilket gör att effekten av samplingsavståndets storlek maskeras.

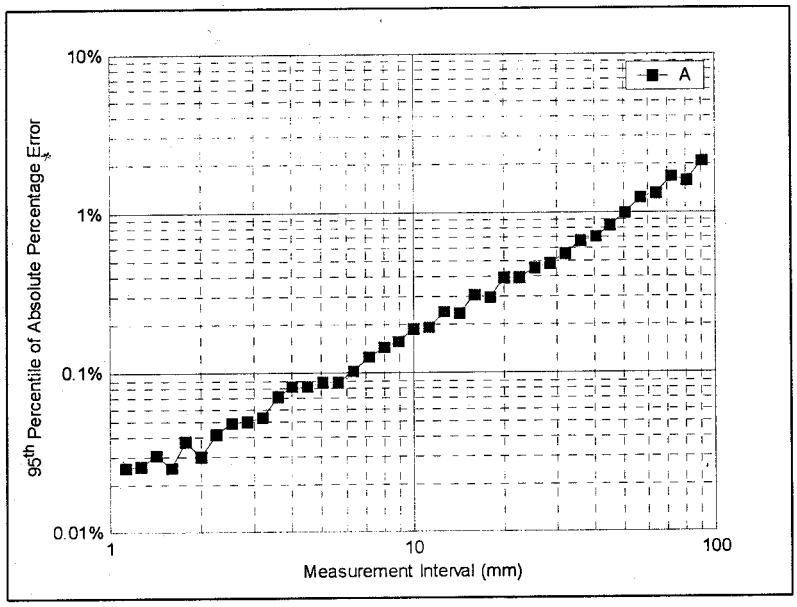
Vid studien av inverkan på mätetalet av längden hos den sträcka över vilken det rapporterade medelvärdet beräknades efter att profilen samplats konstaterades att det givetvis var praktiskt omöjligt att studera alla tänkbara kombinationer av samplingsavstånd och sträckor för medelvärdesbildning. Man valde därför att genomföra två delstudier, en omfattande en konstant sträcka för medelvärdes-

beräkning av profiler samplade med olika avstånd och en omfattande ett enda samplingsavstånd men med medelvärdesberäkning över ett antal sträckor av olika längd.

I det förstnämnda fallet valdes sträckan 100 mm för medelvärdesberäkning och detta var också lika med rapporteringsintervallet. Samplingsavstånden låg i intervallet 1,0 till cirka 90,5 mm i sjättedelsoktavsteg beräknat enligt formel 4.

$$\Delta = 1{,}0 \times 2^{n/6} \text{ mm för n = 0, 1, 2, 3, …., 39;} \qquad (5)$$

På samma sätt som ovan beräknades jämnhetsmätetalen för de 300 profilerna i jämnhetsklass A samplade enligt (5) efter att profilen medelvärdesbildats över 100 mm. 95-percentilen av det absoluta procentuella felet beräknades också på samma sätt som ovan och som referensvärden användes samplingsintervallet 1,0 mm och medelvärdessträckan 100 mm. Figur 8 visar resultatet vad avser IRI.



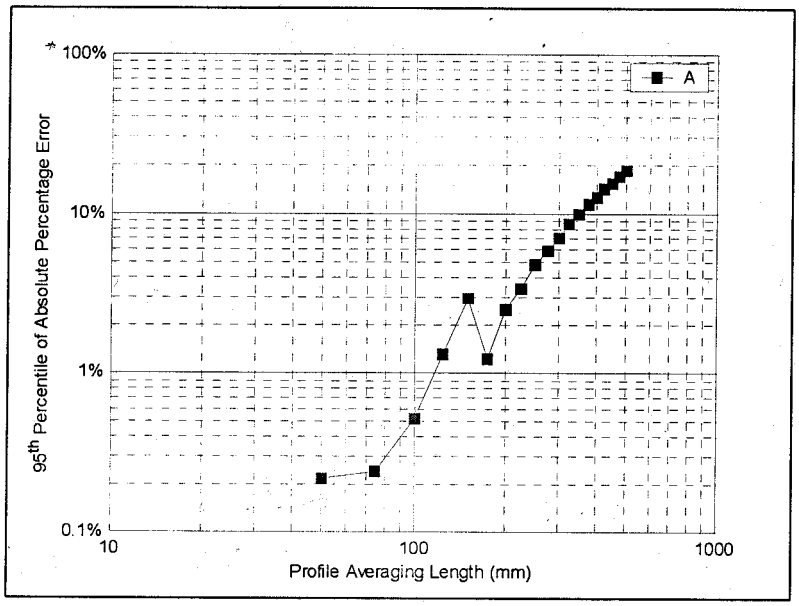
Figur 8 *95-percentilvärdet av det absoluta procentuella felet hos IRI medelvärdesbildat över 100 mm. Vägar med jämnhetsklass A enligt ISO 8608.*

Vid det kortaste samplingsintervallet som använts i studien (1,0 mm) blev det absoluta procentuella felet i IRI återigen av storleksordningen 0,01 %. Detta är rimligt med hänsyn till att IRI-beräkningen som ovan sagts innebär en medelvärdesberäkning över 250 mm varför en föregående medelvärdesberäkning över 100 mm torde sakna betydelse.

I det andra fallet var samplingsintervallet konstant 100 mm och profilen medelvärdesbildades över längder i intervallet 25 till 500 mm enligt (6) innan mätetalen beräknades.

$$\Delta = n \times 25 \text{ mm för n = 1, 2, 3 …, 20:} \qquad (6)$$

Rapporteringsintervallet var i samtliga fall lika med medelvärdessträckan. Referensvärdena beräknades med samplingsintervallet 0,52 mm. Figur 9 visar resultatet vad avser IRI och jämnhetsklass A.



Figur 9 *95-percentilvärdet av det absoluta procentuella felet hos IRI för olika medelvärdessträckor. Vägar med jämnhetsklass A enligt ISO 8608.*

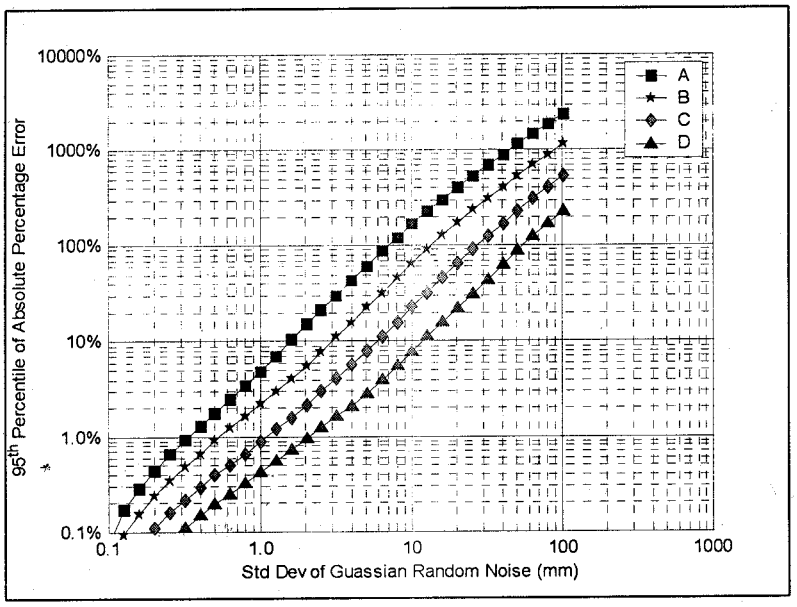
Resultat avseende den kortaste medelvärdessträckan (25 mm) saknas i diagrammet men vid de för Laser RST intressanta medelvärdessträckorna 50 respektive 100 mm noteras mätfel av storleksordningarna 0,2 resp. 0,5 % vilket i båda fallen får anses ligga inom det acceptablas gräns.

Alla profilmätningar innehåller en viss grad av fel, ett s.k. brus. Det finns ett flertal källor till detta fel, t.ex. beroende på föraren, fordonet, mätsystemet etc. Det totala felet beror sannolikt av en okänd kombination av olika felkällor. Formen hos detta totala fel är också okänd men i TRL:s studie antogs att bruset var normalfördelat med känd standardavvikelse och medelvärdet lika med noll. De detaljerade profilerna samplades med intervallet 1,0 mm och ett normalfördelat brus adderades till varje punkt i profilen. Efter medelvärdesbildning över 100 mm beräknades de olika mätetalen. Detta genomfördes för alla profilerna med olika nivåer av normalfördelat slumpmässigt brus. Standardavvikelsen för bruset låg i intervallet 0,1 till 102,4 mm beräknat enlig (7).

$$\sigma = 0{,}1 \times 2^{n/3} \text{ mm för n = 0, 1, 2, …. 30;} \qquad (7)$$

Den absoluta brusnivån är mer betydelsefull på jämna vägar än på ojämna och inverkan av brus på vägytemätetalen studerades därför för vägar av de fyra olika jämnhetsklasserna definierade enligt ISO 8608 (se figur 7 och tabell 12).

På samma sätt om ovan beräknades 95-percentilen av det absoluta procentuella felet. Figur 10 detta fel avseende IRI är för de fyra jämnhetsnivåerna.



Figur 10 *95-percentilvärdet av det absoluta procentuella felet hos IRI för olika jämnhetsklasser och brusnivåer.*

Det visar sig att om det tillåtna felet anges till t.ex. 0,5 % får brusnivån inte vara större än ca 0,2 mm för vägar med jämnheten IRI = 2,2 medan vid vägar med t.ex. IRI = 8,6 en brusnivå på ca 0,5 mm kan tillåtas.

3.3 Resultat från FILTER projektet

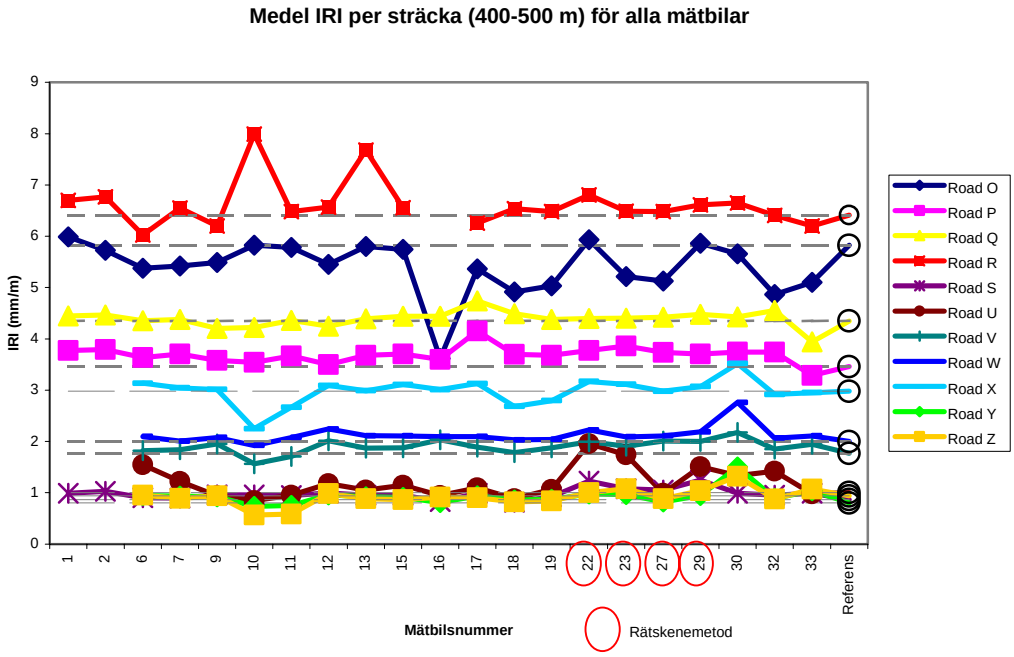
3.3.1 Bakgrund

VTI deltog i FILTER projektet för att bland annat få tillgång till den databas av mätresultat som planerades. Databasen kom att innehålla data om längs- och tvärprofiler och tillhörande jämnhetsmått som levereras från i stort sett alla i Europa befintliga typer av vägytemätutrustningar. Ett urvalskriterium var att det skulle vara profilometrar som opererade i fart, se kapitlet FILTER. VTI:s del i projektet var att ansvara för den referensmätning som behövdes, se bilaga 3. Mätningar har genomförts på teststräckor av varierande ojämnhet (IRI) från 0,5 mm/m till 6,5 mm/m. Varje mätbil har genomfört mätningar upprepade gånger på samma teststräcka och i olika hastighet. Totalt genomfördes minst nio upprepade mätningar per mätbil och teststräcka. Teststräckornas längd var 400-500 m. I figur 11 visas medelvärdet för IRI och alla mätningar med respektive mätbil och för hela teststräckan. Den röda punkten i figur 11 är referensvärdet för IRI (beräknat från PRIMAL och avvägningar). IRI-värdet för respektive utrustning har beräknats efter mätningen från mätbilens insamlade längsprofil. Samma programvara har använts för att beräkna IRI för alla mätbilar. I FILTER-försöken har de flesta mätarna samtidigt med leverans av längsprofil också lämnat beräknade IRI-värden. Dessa har inte använts här. Det finns risk att ”fel” introduceras som åstadkommer skillnader i IRI beroende på hur man beräknar IRI. För att undvika detta valdes att beräkna IRI i efterhand med samma metod för alla mätare. Analysen är genomförd på så sätt att först har en noggrannhetsbedömning gjorts av hela materialet och sedan med en särskiljning på typ av mätprincip. Dessa mätprinciper beskrivs i bilaga 4.

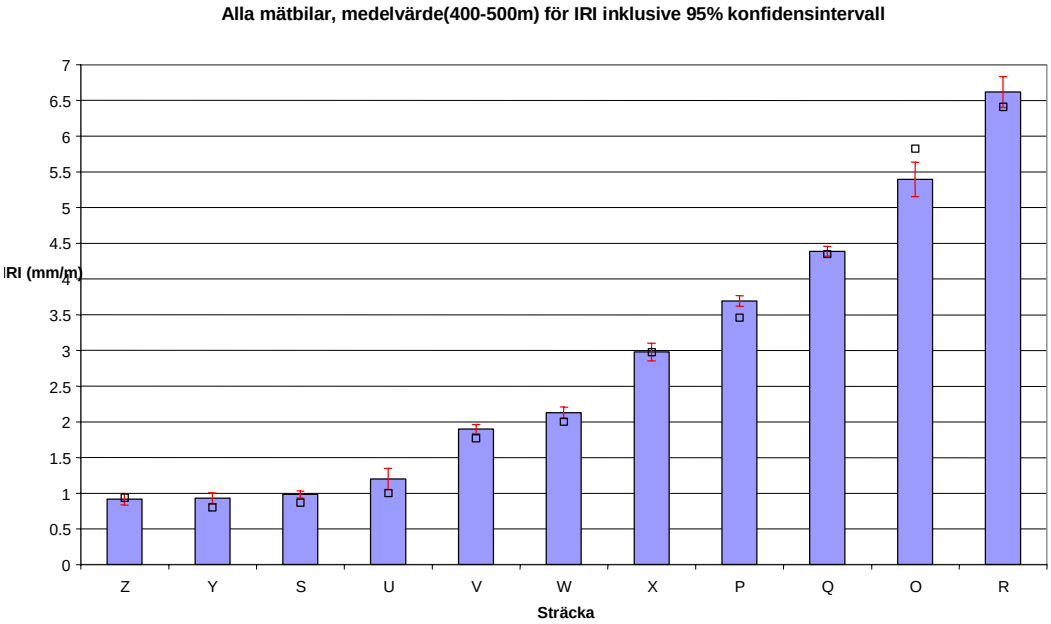
3.3.2 Slutsats

Från figur 11 kan man se att spridningen är större för de mätare som använder rätskenemetoden än för de som använder GM-profilometermetoden. Nummer 22, 23, 27 och 29 använder rätskenemetoden. Vissa av GM-profilometrarna t.ex. 10, 13 och 16 har kraftigt avvikande resultat från de övriga. I figur 2 kan man se att det inte är någon stor differens mellan mätare och referens. För sträcka O finns en avvikelse där inte ens konfidensintervallet täcker referensen. Detta beror på mätare 16. I figur 13 och figur 14 samt tabell 13 och 14 är mätarna uppdelade på mätare som mäter enligt rätskenemetoden respektive GM-profilometermetoden.

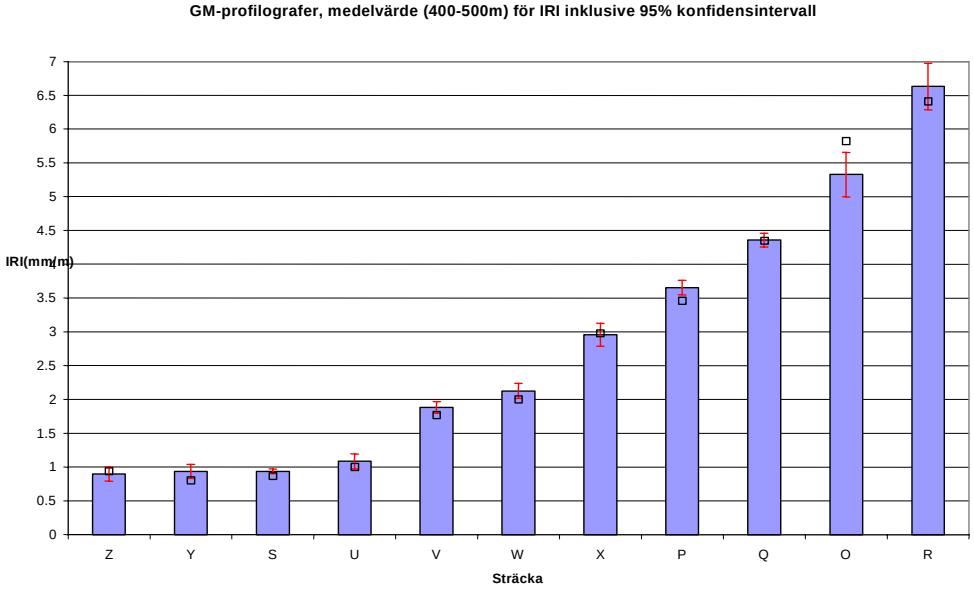
Man kan se att mätare enligt rätskenemetoden konsekvent mäter högre än referens medan GM-profilometrar hamnar mer normalt kring referens. Totalt ser alla mätare ut att mäta med en hög likhet med referens, som sämst 0,5 % avvikelse men oftast bättre.



Figur 11 *IRI per mätare (1–33) och sträcka (0–2).*



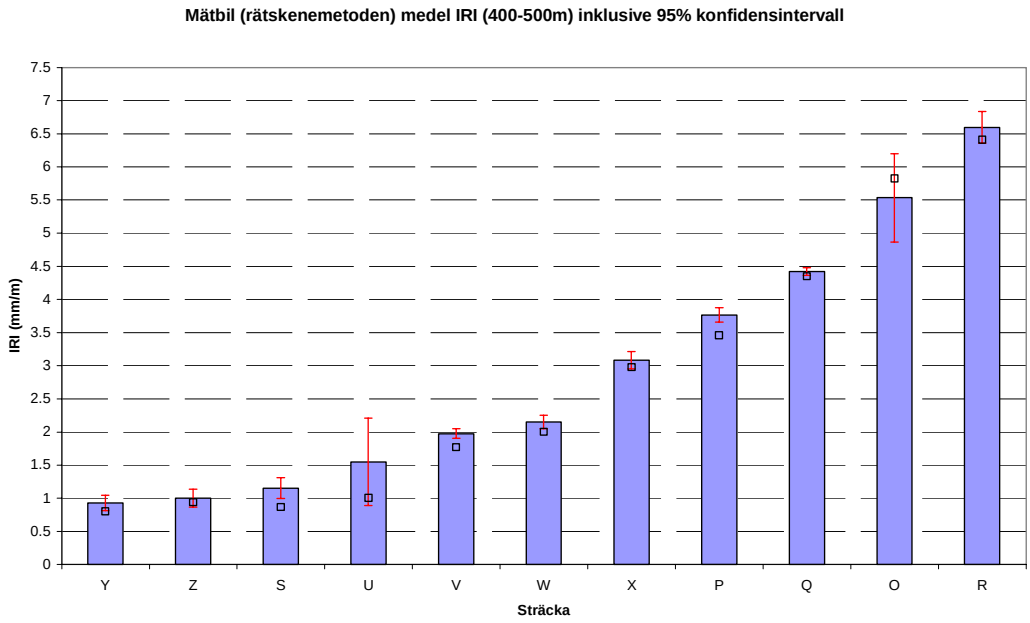
Figur 12 *IRI per sträcka inklusive konfidensintervall och referens.*



Figur 13 *IRI per sträcka inklusive konfidensintervall och referens ( ), för GM-profilometrar.*

Tabell 13 *Avvikelser för GM-profilometrar.*

	IRI GM-profilometrar	IRI Referens		
Sträcka	**mm/m**	**mm/m**	**Diff. mm/m**	**Avvikelse %**
Z	0.90	0.94	-0.04	-0.05
Y	0.94	0.80	0.13	0.14
S	0.94	0.87	0.07	0.07
U	1.08	1.00	0.08	0.08
V	1.88	1.77	0.11	0.06
W	2.13	2.00	0.13	0.06
X	2.96	2.98	-0.02	-0.01
P	3.66	3.46	0.20	0.05
Q	4.36	4.35	0.01	0.00
O	5.33	5.82	-0.50	-0.09
R	6.63	6.41	0.22	0.03



Figur 14 *IRI per sträcka inklusive konfidensintervall och referens ( ), för rätskenemetoden.*

Tabell 14 *Avvikelse för rätskenemetoden.*

Sträcka	Rätskenemetod, IRI mm/m	IRI Referens mm/m	Diff. mm/m	Avvikelse %
Y	0.93	0.80	0.12	0.13
Z	1.00	0.94	0.06	0.06
S	1.15	0.87	0.29	0.25
U	1.55	1.00	0.55	0.35
V	1.98	1.77	0.21	0.10
W	2.15	2.00	0.15	0.07
X	3.08	2.98	0.11	0.03
P	3.77	3.46	0.31	0.08
Q	4.42	4.35	0.07	0.02
O	5.53	5.82	-0.29	-0.05
R	6.60	6.41	0.19	0.03

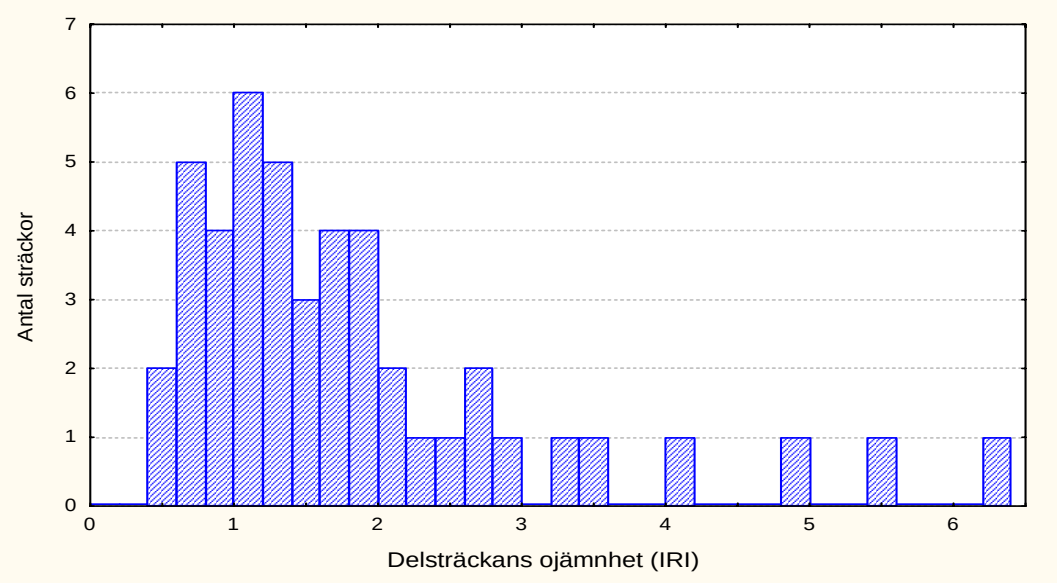
4 Erforderlig noggrannhet

4.1 Bedömd vägojämnhet på vägar med låga IRI-värden

4.1.1 Undersökningsmetod

Inom den grupp på VTI, som arbetar med vägytemätning och vägbeskrivning med s.k. RST-bilar, har med åren en ansenlig erfarenhet av och databas över vägarna i Linköpingstrakten byggts upp. Med denna bakgrund gjordes först några provkörningar av några tänkbara teststräckor. Detta ledde till en preliminär inriktning på RV 34 utanför Linköping, där en detaljerad uppmätning genomfördes på vägavsnitt längs, och i anslutning till, RV 34. Från dessa data gjordes sedan urvalet av teststräckor för bedömningsförsöket. Målsättningen härvid var att inom en entimmas körsträcka hitta minst ett 30-tal 100-meters sektioner med homogen ojämnhetskaraktär, belägna på raksträcka och någorlunda jämnt fördelade mellan ca IRI=0 och IRI=5 (mm/m). Ytterligare krav var att det fick inte förekomma några punktvisa skador, iögonfallande lagningar eller markanta tvärfall.

Efter flera provkörningar och kontrollmätningar valdes slutligen de provsträckor som finns listade i bilaga 1. Sammanlagt blev det en slinga på ca 60 km med 45 provsträckor samt en referenssträcka, vilken passerades två gånger. I Figur 15 redovisas hur sträckorna var fördelade efter ojämnhet. Som torde framgå var det relativt lätt att hitta sträckor med IRI-värden strax under 1 upp till cirka 3. Däremot var det avsevärt svårare att hitta bra bedömningssträckor med IRI mellan 3 och 5. Eftersom undersökningens tonvikt skulle ligga vid bedömningen av relativt jämna vägar, dvs. låga IRI-värden, ansågs detta inte utgöra någon direkt nackdel.



Figur 15 *Bedömningssträckorna fördelade efter jämnhet.*

Bedömningsuppgiften

I motsats till de flesta tidigare bedömningar av vägojämnheter begränsades denna gång uppgiften till att så renodlat som möjligt avgöra hur jämn/ojämn vägen upplevdes. Mot bakgrund av såväl egna tidigare erfarenhet av komplexa skattningar (t.ex. Dahlstedt, 1986 eller 1996) och de översikter som gjorts över just ojämnhetsbedömningar (Nick and Janoff, 1983; Cairney *et al*, 1989) valdes att göra skattningarna med en magnitudskattningsmetod (se t.ex. Engen, 1971). Försökspersonerna instruerades att en fullständigt slät vägsträcka skulle ges ojämnhetsbedömningen 0 (noll) och den sträcka som användes som referenssträcka skulle definitionsmässigt ha upplevelsevärdet 100. Bedömningen av alla teststräckorna skulle sedan göras i förhållande till dessa givna värden (Instruktionen till försökspersonerna återfinns i bilaga 4).

Innan själva försökskörningen kördes en träningsslinga på ett par km, vilken började med samma referenssträcka som i försöket. Under träningspasset uppmanades försökspersonerna att koncentrera sig dels på att bilda sig en referensram för hur ojämna olika delsträckor kändes, dels att kvantifiera dessa upplevelser.

Försökspersonernas rapportering av sina bedömningar gjordes med några få undantag grafiskt. Detta innebär att försökspersonen som åkte som passagerare, för varje passerad teststräcka, själv gjorde en markering på en 145 mm lång linje där referensvärdena 0 och 100 fanns markerade vid 0 respektive 120 mm. En ojämnhetsbedömning på ”50” skulle alltså rapporteras med en markering mitt på linjen, ”25” skulle markeras vid ¼ av linjen räknat från 0-an, osv. Avsikten var att de gjorda markeringarna sedan skulle avläsas och registreras med hjälp av digitaliseringsteknik, men problem med både hård- och mjukvara gjorde att avläsningen fick göras manuellt med hjälp av en millimetergraderad linjal och sedan knappas in i dator. I några fall (4) gjordes bedömningarna genom att försökspersonen istället redovisade sin bedömning i siffror.

Fordon

Lustigt nog verkar det som om det mesta av den hittills genomförda vägojämnhetsforskningen har gjorts i personbilar. I Cairneys litteraturstudie (Cairney et al, 1989) nämns visserligen att det känns annorlunda att åka lastbil än personbil, men inga slutsatser dras av detta konstaterande. Flera forskare har jämfört ojämnhetsupplevelsen i olika personbilar och de flesta drar slutsatsen att skillnaderna är försumbara, även om t.ex. Loizos och medarbetare (1994) säger sig ha fått signifikanta skillnader mellan två "typiska" grekiska bilar, och Quinn (1983) efter en mer analytisk studie påpekar att bilar med olika fjädringsegenskaper kan ge helt skilda ojämnhetsupplevelser.

I den nu föreliggande undersökningen bestämdes från början att ojämnhetsupplevelsen i såväl personbil som lastbil skulle studeras. För valet av personbil gällde att bilen skulle vara någorlunda representativ för den svenska fordonsparken – inte alltför komfortabel, men inte heller för obekväm när det gällde sittkomforten. Praktiska aspekter bidrog dessutom till att en befintlig Volvo 245 valdes som försöksbil. För att försöka betona kontrasten mellan personbil och lastbil valdes en lastbil med relativt "gammaldags" mekanisk bladfjädring. En sådan hyrdes in från ett lokalt åkeri och kunde disponeras under hela försöksserien. Viktigare data för de båda bilarna har sammanfattats i tabell 15.

Tabell 15 *Data för de båda fordonen som användes för bedömning av vägojämnheter.*

	Personbil	**Lastbil**
Fabrikat, typ	Volvo 245	Scania 94
Årsmodell	1983	1999
Hjulbas	2,64 m	4,30 m
Tjänstevikt	1400 kg	7,8 ton
Totalvikt	1930 kg	18 ton
Last	1 pass + 60kg	1 passagerare
Däck (fram)	Michelin MXT, 185/80 R14	Bridgestone M758, 295/80 R 22,5

För att minimera effekten av förarens körstil och för att bidra till att bedömningarna gjordes i samma körspår, kördes respektive fordon huvudsakligen av samma förare. I några fall var det dock nödvändigt att ersätta den ordinarie föraren, vilket kan ha påverkat likformigheten i körningarna.

Försökspersoner

Totalt deltog 22 personer som bedömare i försöket. Alla utom en var VTI-anställda, med varierande erfarenhet av vägkvalitetsbestämning (vilket förmodligen inte påverkar bedömningen enligt Janoff (1985)), vid någorlunda mogen ålder (fördelaktigt enligt Nick och Janoff (1983)), cirka två tredjedelar män och en tredjedel kvinnor (relevant enligt Loizos et al (1994), irrelevant enligt Cairney (1989)) och samtliga med god egen körvana. Endast en av bedömarna hade någon tidigare erfarenhet av magnitudskattningstekniken.

Alla genomförde bedömningarna i både personbil och lastbil. I samtliga fall gjordes den första körningen i personbil, då också bedömningsinstruktionen gicks igenom. Vid lastbilskörningen hade försökspersonerna tillgång till instruktionen, men mera som reserv om någon ville kontrollera någon detalj. Intervallet mellan första och andra körningen varierade mellan någon dag till drygt en vecka, varför

de flesta verkade komma ihåg procedurerna. Träningsrundan för att bygga upp referensramen genomfördes dock på samma sätt med både personbil och lastbil.

Bearbetningar, analyser

Som redan nämnts avlästes försökspersonernas grafiska registreringar manuellt med en upplösning på bråkdelar av en millimeter. De erhållna avstånden konverterades till numeriska magnitudskattningar mellan 0 och 100, som fördes in på ett Excel-blad. I några fall hade markeringar gjorts långt ut i marginalen, vilket skulle innebära att en sträcka hade upplevts som mer ojämn än referenssträckan och vilket alltså gav numeriska värden över 100.

Metoden att bara presentera en referens i början av bedömningsserien har den uppenbara risken att bedömarna under försökets gång får en allt osäkrare minnesbild av referensen och successivt övergår till att jämföra en aktuell sträcka med tidigare, men mera näraliggande sträckor. För att kunna kompensera för den systematiska förskjutning som därvid kan misstänkas, fick försökspersonerna som avslutning bedöma referenssträckan som om den var en av alla de övriga teststräckorna. Parantetiskt kan nämnas att cirka en tredjedel av bedömarna verkade ha ökat sin "känslighet" så att referenssträckan gavs skattningar över 100, medan de andra hade blivit mera "avtrubbade" så att den avslutande bedömningen istället blev mindre än 100.

Skillnaden mellan varje bedömares slutbedömning och det nominella referensvärdet ”100” togs som utgångspunkt för korrigering av respektive persons bedömningar. Under antagande att bedömarnas glidande referens hade varit någorlunda linjär under försöket gjordes korrektionen proportionell mot varje teststräckas ordningstal i försöksserien. Till första bedömningen gjordes ingen korrektion, till den andra adderades eller subtraherades en fyrtiofemtedel av skillnaden, för den tredje var korrektionen två fyrtiofemtedelar osv. till full korrektion för den sista bedömningen. Alla resultat och vidare beräkningar är baserade på dessa korrigerade bedömningsvärden.

Under försökets genomförande störddes bedömningsprocesserna ibland av arbeten som pågick längs vägrenen på RV 34. I sådana fall kunde inga meningsfulla bedömningar göras på vissa av teststräckorna. Inga försök gjordes att kompensera detta bortfall av data, vilket innebär att för några av sträckorna är resultaten baserade på endast 21, och i ett fall 20, försökspersoners bedömningar.

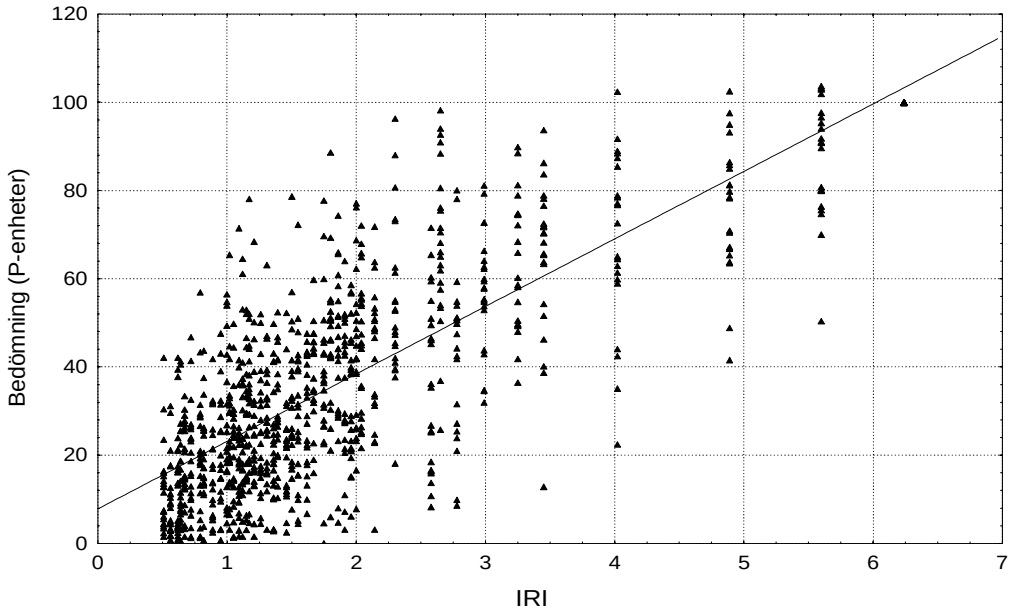
Eftersom magnitudskattningsdata verkar kunna betraktas som en intervallskala (Stevens, 1975) gjordes alla vidare beräkningar och analyser med konventionella parametriska statistiska metoder såsom aritmetiska medelvärdesberäkningar och produktmomentkorrelationer. Huvuddelen av resultaten är sammanfattande beräkningar över samtliga 22 försökspersoner, men i några fall gjordes även individuella analyser, vilket tydligt framgår av resultatpresentationen. Eftersom hela undersökningen är deskriptiv till sin karaktär har inga statistiska signifikansprövningar gjorts.

I den del av undersökningen som gällde effekten av slumpmässiga mätfel i IRI-bestämningarna manipulerades data på så sätt att ett värde från en slumptalsfördelning med känd variationsvidd adderades till varje ursprungligt IRI-värde. Därefter gjordes tidigare korrelationsberäkningar om med de "nya" IRI-värdena i kombination med oförändrade bedömningsdata, varefter de nya korrelationerna jämfördes med de ursprungliga.

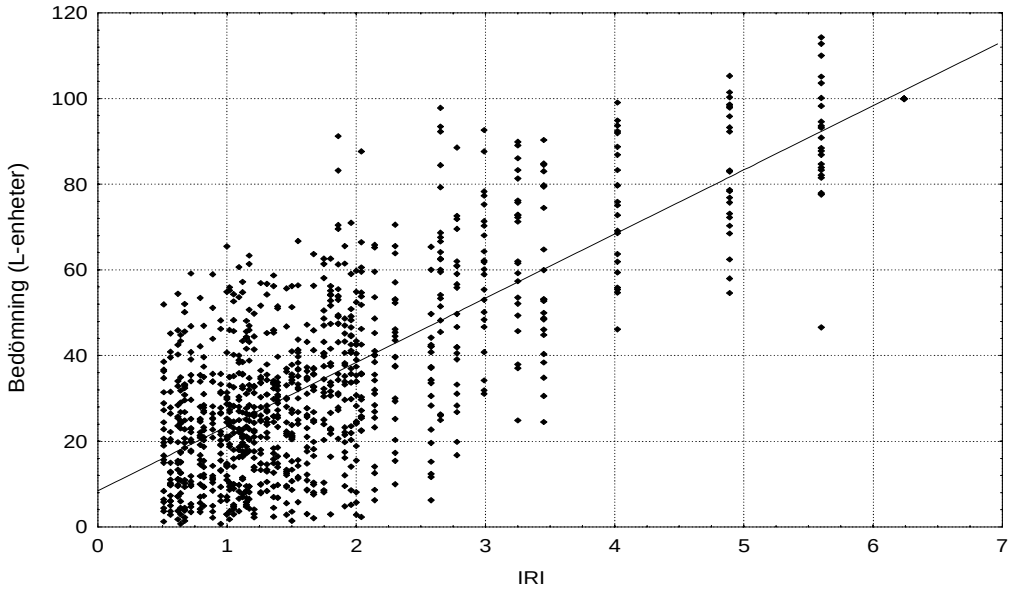
4.1.2 Resultat

Översikt

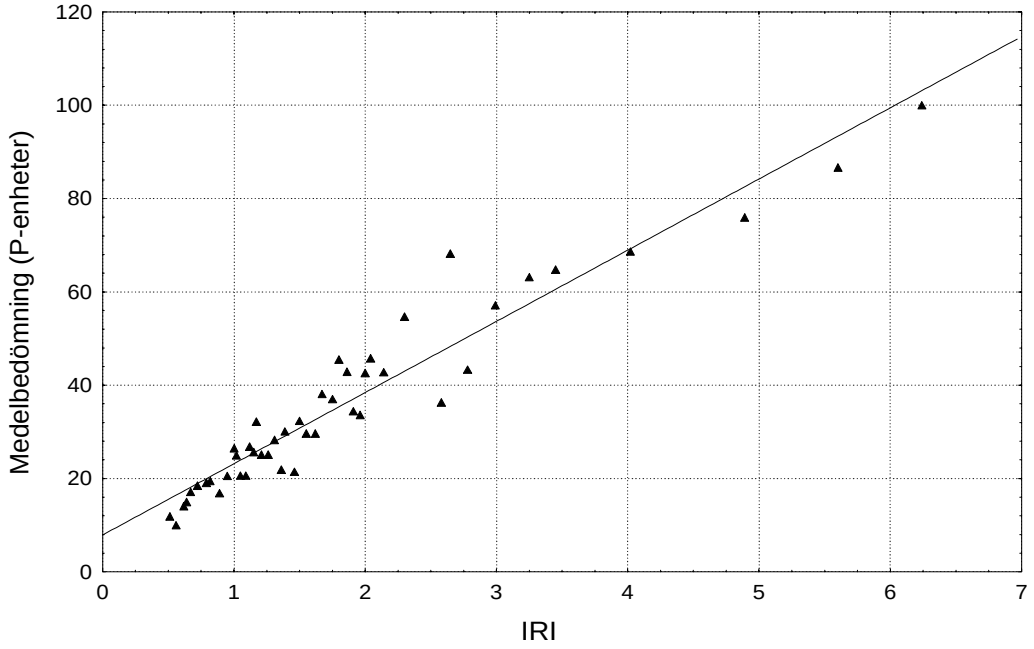
I figur 16 och figur 17 redovisas samtliga erhållna bedömningar i personbil respektive lastbil prickade mot IRI-värdet för den sträcka där bedömningen gjordes, och i figur 18 och i figur 19 återfinns de något mera överskådliga medelbedömningarna prickade mot respektive teststräckas IRI. Både för rådata och medelvärden gjordes "minstakvadrat"-anpassningar av olika funktioner. Trots att man enligt t.ex. Stevens (1975) hade kunnat vänta sig att en potensfunktion skulle ge bästa anpassning, visade det sig att linjära funktioner gav marginellt bättre resultat. De regressionslinjer som då också beräknades finns inritade i figur 18 och i figur 19 men några regressionsekvationer presenteras ej eftersom de erhållna regressionskoefficienterna endast gäller numeriskt för en referenssträcka med IRI=6,24. Däremot kan konstateras att i både personbil och lastbil blir den predicerade bedömningen för en fullständigt slät vägsträcka (dvs. IRI=0) räknat över alla bedömarna något för stor.



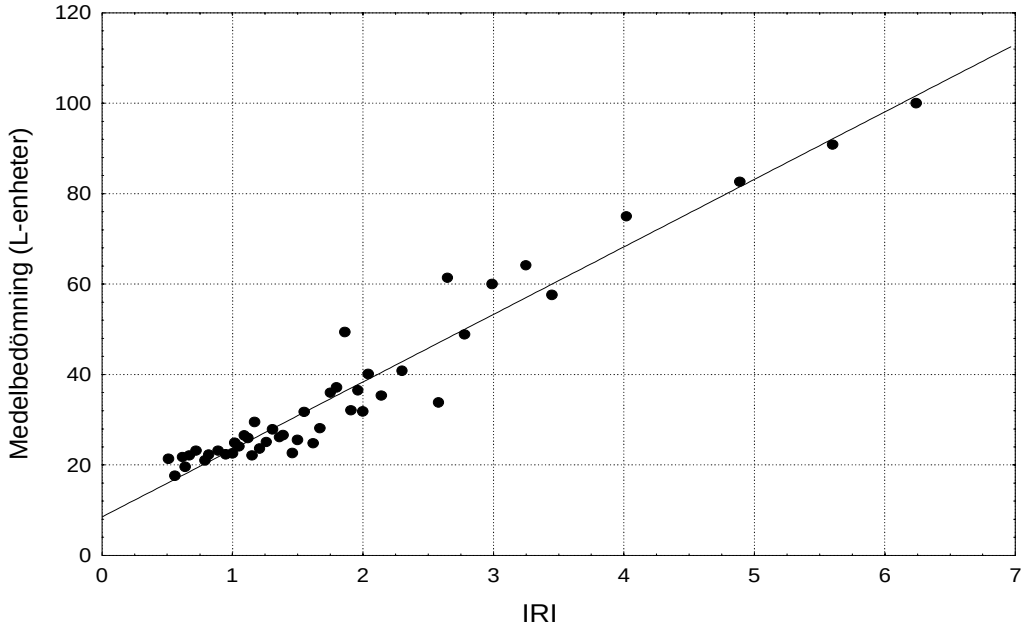
Figur 16 *Vägojämnhet i* ***personbil*** *bedömd av 22 personer för 45 olika teststräckor i förhållande till en referenssträcka med IRI=6,24 (r=0,735).*



Figur 17 *Vägojämnhet i **lastbil** bedömd av 22 personer för 45 olika teststräckor i förhållande till en referenssträcka med IRI=6,24 (r=0,773).*



Figur 18 *Genomsnittsbedömningar beräknat över 22 personer för upplevd ojämnhet hos 45 olika vägsträckor i personbil. (r=0,961).*

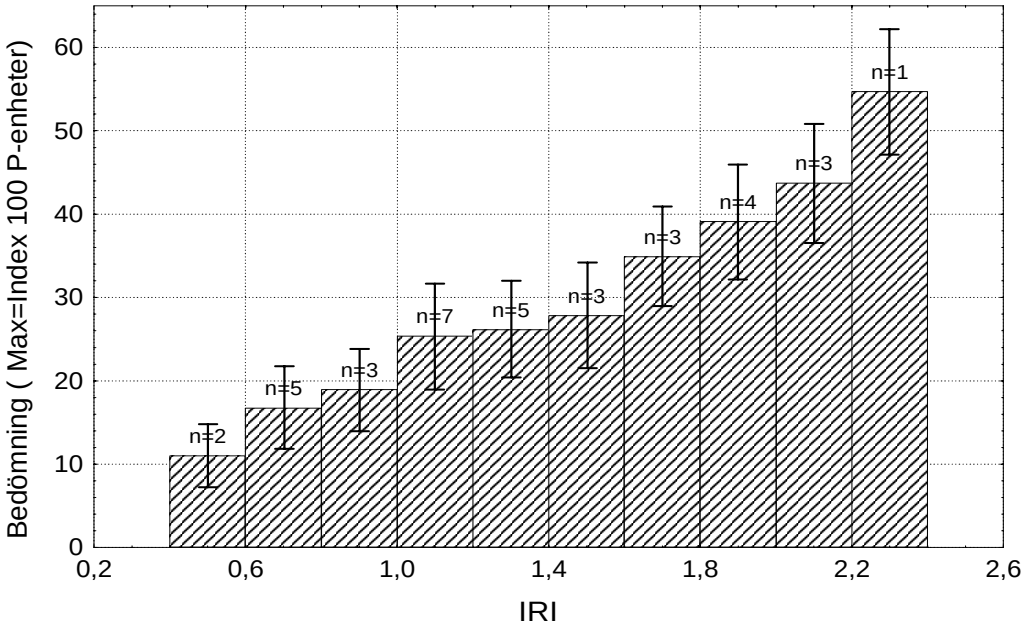


Figur 19 *Genomsnittsbedömningar beräknat över 22 personer för upplevd ojämnhet hos45 olika vägsträckor i* ***lastbil****. (r=0,968).*

Korrelationerna mellan ojämnhet enligt IRI och ojämnhet enligt bedömarna uppgår till 0,735 respektive 0,773 i figur 16 och i figur 17, där det ganska tydligt framgår att det fanns en viss variation i bedömningarna. När det mesta av denna variation elimineras genom medelvärdesbildning som i figur 18 och i figur 19 ökar korrelationskoefficienterna avsevärt till 0,961 i personbil respektive 0,968 i lastbil, vilket också torde framgå av figur 18 och figur 19. Vid IRI-värden alldeles över 2,5 är dock avvikelserna ganska markerade vilket kommenteras närmare i avsnitt 4.4 nedan.

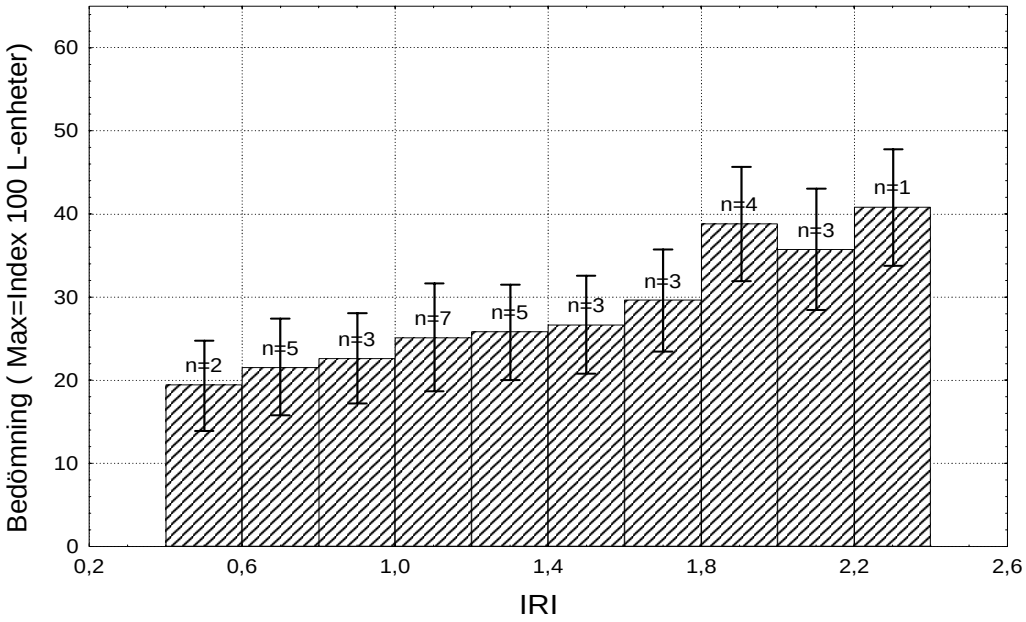
Låga IRI

Eftersom undersökningens huvudsyfte gällde upplevelsen av ojämnhet på relativt jämna vägavsnitt gjordes en särskild analys av resultaten för teststräckor med IRI-värden mindre än 2,5. För varje IRI-intervall på 0,2 enheter beräknades medelvärde och 95 % konfidensintervall. Anledningen till att intervallbredden sattes till 0,2 var främst att en finare uppdelning hade givit ett antal intervall utan några data alls i figur 20 och i figur 21. Som resultaten nu är beräknade och redovisade kan det avläsas ovanför stapeln hur många delsträckors bedömningar som ingår i varje intervall, storleken på medelbedömningen i varje IRI-intervall, och var den "sanna" medelbedömningen ligger med 95 % sannolikhet. Resultaten i personbil redovisas i figur 20, och från lastbil i figur 21.



Figur 20 *Medelbedömningar och 95 % konfidensintervall för klassindelade delsträckor med IRI-värden under 2,5. Resultat från* ***personbil****, 22 bedömningar per delsträcka, antal delsträckor i varje klass enligt siffran över stapeln.*

Som framgår av figur 20 och figur 21 så överlappar närliggande IRI-klassers konfidensintervall alltid varandra varför det är rimligt att dra slutsatsen att en skillnad på 0,2 IRI-enheter inte kan urskiljas av bedömargrupper på cirka 20 personer. I personbil verkar det som om IRI-intervallen bör skilja med cirka 0,8 enheter för att medelbedömningarnas konfidensintervall inte skall överlappa. I lastbil, där medelvärdesskillnaderna är något mindre och osäkerheten i bedömningarna (= konfidensintervallen) något större, verkar det krävas IRI-differenser på mer än 1,5 enheter för att medelbedömningar från 20-personersgrupper skall kunna särskiljas.



Figur 21 *Medelbedömningar och 95 % konfidensintervall för klassindelade delsträckor med IRI-värden under 2,5. Resultat från* ***lastbil****, 22 bedömningar per delsträcka, antal delsträckor i varje klass enligt siffran över stapeln.*

Individuella skillnader

Som redan torde ha framgått av figur 16 och figur 17 så varierade bedömningarna avsevärt mellan de olika personerna. I viss utsträckning kan dessa skillnader bero på att försöksfordonen inte kunde köras på exakt samma sätt vid alla körningar, men annars torde främsta orsaken vara olikheter mellan försökspersonerna. För att beskriva de individuella bedömarnas prestation och därigenom även erhålla en typ av reliabilitetsbestämning gjordes ett antal särskilda beräkningar.

För varje person beräknades regression och korrelation mellan IRI och ojämnhetsbedömningar i personbil respektive lastbil över alla 45 teststräckorna. Från regressionsekvationerna togs regressionskonstanten som en indikation på hur väl personen varit ”kalibrerad” för att bedöma en helt slät väg med en “nolla”, (dvs. den referens de aldrig prövat utan endast fick föreställa sig) – en konstant nära noll innebar att bedömaren var ”välkalibrerad”, en negativ konstant innebär att vägsträckor med mätbara IRI-värden redan upplevdes som helt släta, och en positiv konstant innebär att bedömaren hade sin subjektiva nollpunkt långt till vänster om IRI-skalans faktiska nollpunkt. Korrelationskoefficienterna togs som indikation på hur konsekvent respektive person varit i sin egen bedömningsstrategi. Resultaten har sammanfattats i tabell 16 ”Storleken på regressionskonstanter för 22 personers bedömning av vägojämnhet som funktion av ojämnhet enligt IRI i personbil respektive lastbil” och tabell 17 ”Storleksordning på korrelationskoefficienter mellan resp. försökspersons” nedan.

När det gäller regressionerna i tabell 16 ”Storleken på regressionskonstanter för 22 personers bedömning av vägojämnhet som funktion av ojämnhet enligt IRI i personbil respektive lastbil” verkar det som om flera av bedömarna har haft litet egna uppfattningar om när en väg egentligen skall anses som helt slät. Korrela-

tionerna i tabell 3 torde i stort sett kunna betraktas som acceptabla eller till och med bra. Eftersom lastbilskörningen alltid genomfördes efter personbilskörningen kan möjligen skillnaden mellan fordonstyperna tolkas som att bedömarna hade behövt något mera träning innan första försökspasset. Eller att ojämnheterna känns tydligare i lastbil.

Tabell 16 *Storleken på regressionskonstanter för 22 personers bedömning av vägojämnhet som funktion av ojämnhet enligt IRI i personbil respektive lastbil.*

Konstantens storlek	Personbil	Lastbil
5	< 0	6
5	0-5	5
1	5-10	3
6	10-15	3
5	>15	5

Tabell 17 *Storleksordning på korrelationskoefficienter mellan resp. försöks-persons.*

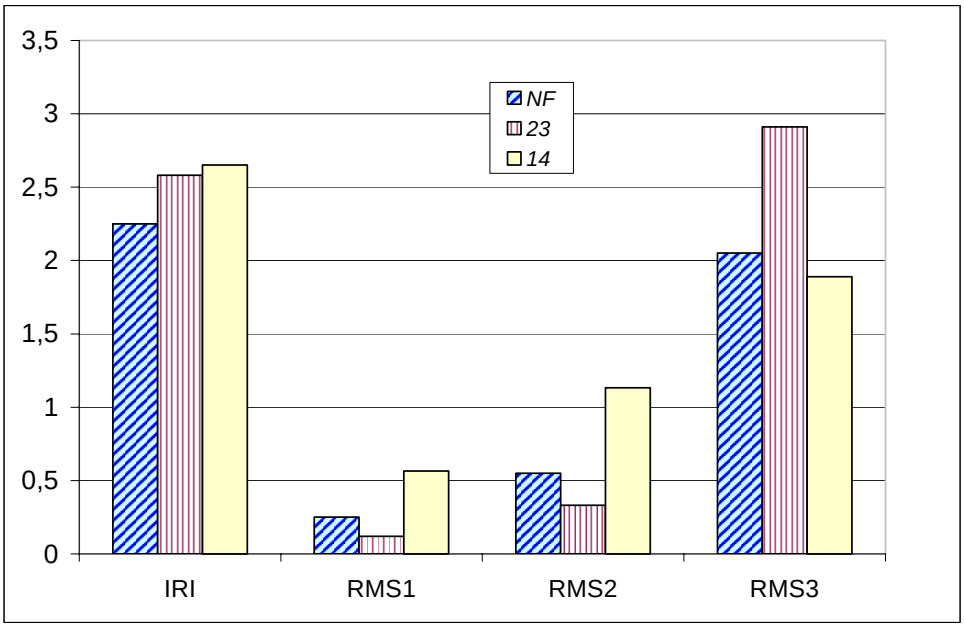
Korrelation	i personbil	i lastbil
–	< 0,7	1
2	0,7-0,8	3
7	0,8-0,9	11
13	> 0,9	7

Några speciella teststräckor

Som redan påpekats var det ett par delsträckor med IRI-värden mellan 2,5 och 3 som gav ganska markant avvikande bedömningar från den i övrigt relativt goda anpassningen till regressionslinjerna i figur 18 och i figur 19. Eftersom avvikelserna var likartade i personbil och lastbil verkade det misstänkt att två delsträckor med nästan samma IRI skulle ge så olika bedömningar. Sträckorna identifierades som delsträcka 14 med IRI=2,65 och delsträcka 23 med IRI = 2,58.

Flera analyser gjordes för att försöka förklara de erhållna resultaten. Först kontrollerades givetvis att IRI-beräkningarna var korrekta. Flera kontroller genomfördes för de två sträckorna men gav resultat som stämde på andra decimalen, varför andra förklaringar måste sökas. För att mera i detalj kunna relatera vägbanans, eller egentligen vägprofilens, egenskaper gjordes dels grafiska beskrivningar (som blev något svåröverskådliga), dels beräkningar av vägens ojämnhetsegenskaper i form av RMS-värden för olika våglängdsområden. Alla teststräckor beskrevs i RMS-värden för våglängderna 1–2 m, 2–5 m, 5–20 m och 20–50 m, vilka benämndes RMS1 till RMS4. Vid en färdhastighet av 70 km/h motsvarar dessa våglängder vertikala vibrationsfrekvenser på 10–20 Hz, 4–10 Hz, 1–4 Hz respektive 0,4–1 Hz. Det är tveksamt om de allra längsta våglängderna

(lägsta frekvenserna) bidrar särskilt mycket till ojämnhetsupplevelsen i den aktuella bedömningssituationen, varför intresset främst riktades mot RMS1–3. Det visade sig då att sträckorna 14 och 23 inte var helt jämförbara, varken med varandra eller med andra sträckor med IRI mellan 2,0 och 2,5. Dessa resultat har sammanfattats i figur 22.



Figur 22 *IRI och RMS-värden för teststräckorna **14** och **23** samt sammanfattning av de närmast föregående teststräckorna med IRI mellan 2,0 och 2,5.*
RMS1 = 10–20 Hz,
RMS2= 4–10 Hz, RMS3 = 1–4 Hz.

Som framgår av figur 22 verkar sträckorna 14 och 23 avvika på var sitt sätt från de närmast jämförbara teststräckorna. Sträcka 23 (långstreckad i figur 22) verkar ge förhållandevis litet av de mera högfrekventa ojämnheterna, men relativt mycket av frekvenserna 1–4 Hz. För sträcka 14 (gul och omönstrad i figur 22) är det tvärtom, dvs. mycket av de högre frekvenserna men förhållandevis litet låga frekvenser. Eftersom detta stämmer relativt väl med människans känslighet för vertikala helkroppsvibrationer enligt t.ex. Griffin (1990) torde detta vara anledningen till att två sträckor med nästan identiska IRI-värden ändå kan upplevas som mycket olika.

Jämförelser IRI – RMS

När RMS-analyserna av alla teststräckor enligt avsnitt 4.4 väl genomförts gjordes även några beräkningar för att studera om kombinationer av IRI och RMS skulle kunna bidra till en bättre förklaringsgrad (dvs. starkare samband) för ojämnhetsbedömningarna, särskilt för de bedömare som hade de lägsta korrelationerna mellan IRI och subjektiv ojämnhet.

Först prövades med en stegvis multipel regressionsanalys för att se i vilken ordning de olika oberoendevariablerna IRI och RMS 1–4 skulle falla ut för de olika personerna. En automatisk varning i statistikprogrammet (StatSoft, 1997) utlöstes dock och informerade om multikollinearitetsproblem (höga interkorrelationer mellan oberoendevariablerna) vilket kunde göra resultaten osäkra eller

otolkbara. Istället prövades att beräkna de enkla korrelationerna mellan varje persons bedömningar och de tillgängliga ojämnhetsbeskrivningarna i form av IRI eller RMS1, RMS2, RMS3 eller RMS4. Resultaten har sammanfattats i tabell 18 nedan.

Som framgår av tabellen verkar det inte helt självklart att IRI alltid ger den bästa prediktionen av hur ojämn en väg upplevs. Närmare bestämt så är det, trots de starka sambanden med gruppmedelvärdena i figur 4 och i figur 5, inte ens för hälften av försökspersonerna som IRI ger den högsta korrelationen med den upplevda ojämnheten. För de sex fall då de individuella korrelationerna mellan IRI och bedömd ojämnhet låg under 0,80 (jämför tabell 3) erhålls i fem fall högre korrelationer med RMS än med IRI – en genomsnittlig ökning från r=0,743 till r=0,778. Tyvärr är det dock olika RMS-intervall som ger högsta korrelationen för olika personer, varför det inte kan sägas att något särskilt RMS-område skulle vara ett alternativ till IRI.

Tabell 18 *Antal personer med högsta korrelation mellan upplevd ojämnhet och ojämnhet enligt IRI eller olika RMS-intervall i personbil respektive lastbil, samt medelvärden av de högsta korrelationerna.*

Mätprincip	**Frekvens-område (Hz)**	**Antal högsta korrelationer och deras medelvärde**			
		Personbil		**Lastbil**	
IRI	~0-20+	9	0,87	8	0,92
RMS1	10-20	4	0,93	1	0,84
RMS2	4-10	8	0,86	9	0,91
RMS3	1-4	1	0,91	4	0,91
RMS4	0,4-1	0	–	0	–

Att döma av resultaten i tabell 18 så förefaller det vara en majoritet av försökspersonerna som snarare har baserat sina bedömningar på upplevelsen av begränsade frekvensområden än på en integrerad helhetsupplevelse så som IRI-värdena beskriver. För det aktuella försöksfallet verkar den upplevda ojämnheten motsvaras praktiskt taget lika bra av RMS-värden för frekvenser mellan 4 och 10 Hz, som av IRI-värden.

Personbil – lastbil

Det genomförda försöket hade inte planerats för att direkt illustrera hur ojämnheter upplevs i det ena eller andra fordonet. Det måste också betonas att trots att referenssträckan med IRI = 6,24 gavs samma numeriska värde (=100) vid körningarna med båda fordonen så kan det inte på något vis antagas att den upplevda ojämnheten är av samma storleksordning. Det kan också påpekas att "P-enheterna" på Y-axeln i figur 16, figur 18 och i figur 20 inte motsvaras av "L-enheterna" i figur 17, figur 19 och i figur 21, trots att de är ritade i samma skala.

Några observationer kan också noteras som illustration till att vägojämnheterna upplevs olika i de två fordonen. Det visade sig t.ex. att några av delsträckorna bedömdes ganska markant olika i personbil respektive lastbil. I personbil var det främst sträckorna 41, 42 och 44 som ofta gavs förhållandevis höga ojämnhetsbedömningar, och i lastbil hände detta för sträckorna 13 och 14. Några uppenbara

förklaringar till dessa effekter, av t.ex. vissa våglängdssammansättningar som i avsnitt 4.4 ovan, har dock inte hittats.

En annan skillnad mellan de båda fordonen kan urskiljas vid en jämförelse av figur 20 och figur 21. Trots att ekvationen för upplevd ojämnhet som funktion av fysikaliskt beskriven ojämnhet egentligen inte är definierad för IRI-värden mindre än ca 0,5 kan det ändå spekulationsvis vara intressant att extrapolera funktionen nedåt mot IRI=0. Det visar sig då att i personbil kommer IRI nära noll också att ge genomsnittsbedömningar som ligger nära noll. I lastbil däremot kommer sträckor som är helt släta ändå att erhålla bedömningar kring ca 15 subjektiva bedömningsenheter. Att förklara denna effekt ligger utanför den nu presenterade undersökningen och torde lämpligen tas som ämne för en ny undersökning om vägojämnheter.

Osäkerhet i IRI-värdet

Avslutningsvis gjordes också några beräkningar för att illustrera hur mycket slumpmässiga mätfel vid bestämningen av IRI-värden kan påverka det beräknade sambandet med upplevd ojämnhet. Detta gjordes genom att låta datorn generera slumptal av en viss storleksordning och addera dessa till de uppmätta IRI-värdena innan korrelationerna beräknades.

Som ett exempel prövades att på de data som redovisas i figur 17 lägga till ett slumpfel till alla IRI-värden. Värden från rektangulära slumpfördelningar inom intervallen ±0,1 och ±0,2 provades. Grafiskt innebar detta att de vertikala "pärlbanden" vid t.ex. IRI=4,89 och 5,60 kom att spridas ut i sidled mellan IRI= 4,79 och 4,99 eller mellan 4,69 och 5,09 för det större intervallet, respektive mellan IRI= 5,50 och 5,70 eller mellan 5,40 och 5,80 för ±0,2. Likaså upplöstes den tidigare så skarpa gränsen nedåt vid IRI=0,51 och blev betydligt mera obestämd. Men numeriskt hade dessa visuella effekter knappt något märkbart inflytande. Den tidigare korrelationen på 0,773 ändrades till 0,771 vid den mindre transformationen och ytterligare till 0,769 vid påverkan av en slumpfaktor ±0,2.

Inte heller påverkades prediktionens medelfel, som är ett annat sätt att uttrycka tillförlitligheten i ett sambandsmått, märkbart av de vidtagna manipulationerna. Utgångsvärdet 15,69 ökade först till 15,71 och sedan till 15,79 för de största manipulationerna.

Liknande provberäkningar gjordes också för enskilda försökspersoners bedömningar och med likartade resultat. Korrelationskoefficienterna förändrades oftast bara i tredje siffran, ibland till och med till ett högre värde, och som resultat av de mycket små förändringarna av korrelationernas storlek så förändrades inte heller prediktionens medelfel nämnvärt.

Dessa resultat måste dock tolkas med beaktande av att referensvärdet vid ursprungliga IRI = 6,24 fanns med som en ganska solid förankring i ytterkanten av det numeriska intervall som behandlades, och att även vid de individuella fallen kunde beräkningarna göras på så många som 45 datapar. Med färre observationer och utan något förankrande extremvärde torde inverkan av slumpmässiga mätfel kunna bli större.

4.1.3 Sammanfattande kommentarer

Några metodsynpunkter

Som ett allmänt omdöme verkar det som om den tillämpade magnitudskattningsmetoden har fungerat tillfredsställande. De ofrånkomliga successiva minnesfelen verkar för de flesta av bedömarna inte ha givit så stora effekter att det hade blivit några större skillnader i resultaten även om korrektionen (enligt avsnitt 3.5) inte genomförts. Vad som emellertid är en påtaglig nackdel är att metoden inte ger möjligheter till direkta jämförelser av ojämnhetsupplevelserna i olika fordon. Detta var inte heller ett huvudsyfte för försöket, men i efterhand – när det är för sent – känns det som om det hade varit väldigt värdefullt om denna aspekt hade vägt tyngre vid metodvalet.

En annan metodaspekt, som kan vara värd att kommentera och beakta vid eventuella fortsatta försök, gäller den antydan till träningseffekter som återfinns i tabell 17. Om det är så att den något bättre precisionen i lastbilsbedömningarna (högre korrelationskoefficienter) beror på den ökade rutinen försökspersonerna hunnit få, så har detta flera implikationer. För de föreliggande personbilsresultaten innebär det att dessa egentligen är underskattningar av de ”sanna” resultat som kunnat erhållas från “fullärda” bedömare. I praktiken spelar dock denna aspekt mindre roll eftersom de erhållna resultaten ändå ger en tillräckligt noggrann beskrivning av hur vägojämnheter upplevs i personbil. För andra försök, kanske sådana med syfte att signifikanstesta skillnader i upplevd ojämnhet, är dock denna aspekt synnerligen viktig.

Ett helt annat metodresultat, som kan ha vissa praktiska, förenklande, konsekvenser, gäller mätnoggrannheten vid bestämning av IRI-värden. De simuleringar som gjordes med de tillgängliga värdena visade att slumpmässiga mätfel inte har några nämnvärda effekter på sambanden med upplevd ojämnhet även om slumpfelens storlek kan uppgå till ca 20 % av det faktiska mätvärdet vid IRI kring 1, till ca 6,5 % av det faktiska värdet vid IRI=3, eller till 4 % av det faktiska värdet vid IRI=5.

Sambandet mellan uppmätt och upplevd vägojämnhet

Som redan konstaterats i första resultatavsnittet (4.1) verkar det föreligga linjära samband på gruppnivå mellan uppmätt och upplevd ojämnhet inom den studerade variationsvidden. Detta kan förefalla något oväntat då relationen mellan stimulering och upplevelse oftast har visats beskrivas bäst av krökta förlopp i form av potensfunktioner. Exponenten kan visserligen variera inom ganska vida gränser, subjektiv vikt har t.ex. en exponent på 1,5–1,9 och upplevd ljusstyrka ca 0,35 (Björkman och Ekman, 1962). Ett specialfall av potensfunktion erhålls dock om exponenten råkar vara exakt 1, då potensfunktionen blir en rät linje. Nästan som på beställning visar det sig att Griffin (1990), i sin omfattande översikt över de flesta områden som berör vibrationer, redovisar att exponenten för upplevelse av vertikala vibrationer ligger just i närheten av 1,0.

Icke desto mindre kvarstår resultaten från lastbilsbedömningarna i figur 21, vilka ger ett intryck av att ojämnhetsupplevelserna börjar plana ut vid IRI-värden under ca 1,5. Om denna tendens inte endast är en ren tillfällighet så leder den dock till att även fullständigt släta vägar kommer att ges bedömningar som tyder på en fullt märkbar ojämnhetsupplevelse. Varifrån härrör den ojämnheten? Upplevelsen av vägojämnheter och kanske även andra ojämnheter i lastbilar och andra tunga fordon förefaller värda några ytterligare forskningsinsatser.

Jämnhet/ojämnhet – Komfort/obehag

För undvikande av alla missförstånd kan det vara befogat att kommentera några viktiga, och nära relaterade begrepp. Den genomförda, och här rapporterade, undersökningen gällde explicit **ojämnhet**, främst upplevd men i viss mån även uppmätt sådan. Förhoppningsvis har inget o ramlat bort någonstans i texten, för jämnhet (särskilt den subjektiva) kan inte självklart tolkas som en enkel omvändning eller invertering av ojämnhet.

Vad gäller de ännu mera komplexa fenomenen komfort och obehag så torde det inte råda några tvivel om att de är starkt beroende av ojämnheten (uppmätt eller upplevd), men sambanden torde vara beroende av ett antal andra faktorer, därför svårare att beskriva, och dessutom förmodligen avsevärt mera ickelinjära än de här redovisade sambanden. Det finns därför all anledning att vara försiktig med extrapoleringar från ojämnhet till någon av de näraliggande variablerna.

Kriteriefrågor

En näraliggande, och ganska angelägen, fråga gäller om, eller hur, de erhållna resultaten kan utnyttjas för formuleringen av kriterier för vägars standard. En sådan fråga ligger egentligen helt utanför en undersökning som denna, som endast syftade till att beskriva relationen mellan fysiskt uppmätt ojämnhet och subjektivt upplevd ojämnhet. Hade resultatet blivit ett helt annat, t.ex. indikerande att bedömare inte förmår särskilja ojämnheter under kanske IRI=2, så hade det varit mycket enklare. Nu blev (tyvärr!) resultatet snarast det motsatta. Åtminstone i personbilar förefaller det som om grupper av bedömare kan skilja mellan ojämnhetsnivåer så långt ned på IRI-skalan som undersökningen omfattade (IRI≈0,5).

Resultaten tyder alltså på att bedömare/bilister kan skilja mellan ojämnhetsnivåer som egentligen inte längre är särskilt ojämna, men resultaten säger ingenting om (den subjektiva) betydelsen av denna förmåga. För att belysa var en lämplig gränsdragning kan göras mellan ”bra” och ”dåliga” vägar krävs några ytterligare försök, t.ex.

- för att jämföra olika typer av fordon på en gemensam skala så att det kan avgöras vilket/ vilka fordon som skall vara gränssättande,
- för att beskriva/bestämma sambanden mellan åkkomfort och både objektiv och subjektiv vägojämnhet,
- och kanske även några undersökningar för att fastställa vilken fysikalisk ojämnhetsbeskrivning (IRI, RMS eller kanske någon annan) som ger den bästa prediktionen av bilisternas subjektiva upplevelser av ojämnhet, jämnhet, åkkomfort, ”vägstandard” eller andra förmodat väsentliga vägegenskaper.

4.2 Fordonsslitage

Det var enligt den ursprungliga planen avsikten att mäta såväl accelerationer som påkänningar i framhjulsupphängningarna på de fordon som utnyttjades vid vägojämnhetsbedömningarna. Av tidigare kontakter med Volvo personvagnar hade framgått att man där hade gjort mätningar av denna typ. Volvo personvagnar kontaktades därför i syfte att få vägledning vad avser givartyp, lämplig givarplacering, signalernas storleksordning etc. Det framhölls dock därvid att direkt påkänningsmätning med s.k. trådtöjningsgivare var en mycket komplicerad uppgift som i princip krävde partiell ombyggnad av framhjulsupphängningarna för att

mätresultaten skulle bli tolkbara. Accelerationsmätning är däremot praktiskt genomförbart.

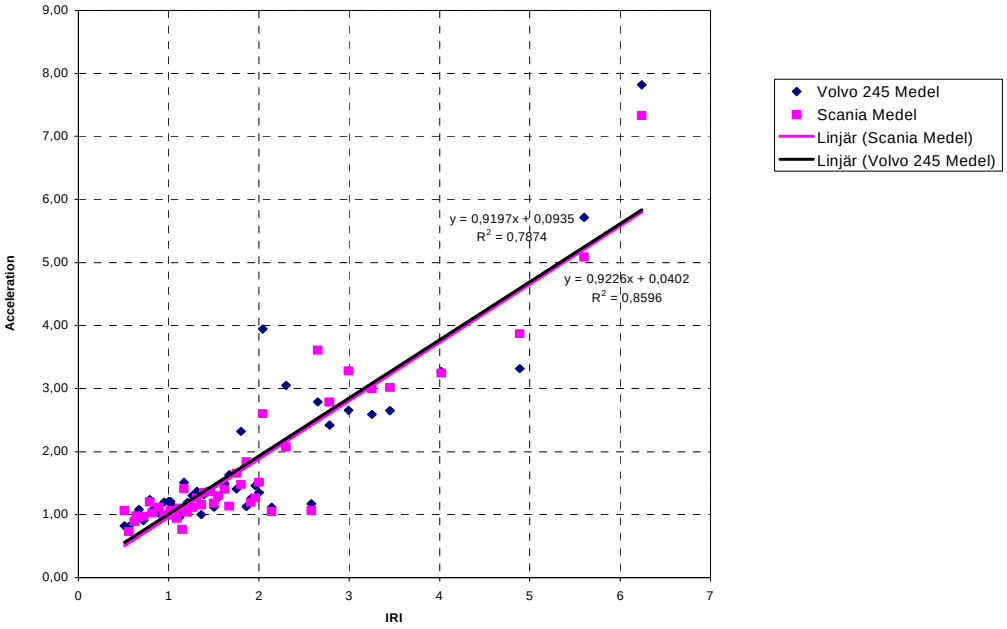
Mätning av vertikalaccelerationen vid höger framhjul har genomförts dels på en personbil, Volvo 245, och dels på en lastbil, Scania 94.

Tabell 19 *Fordonsdata.*

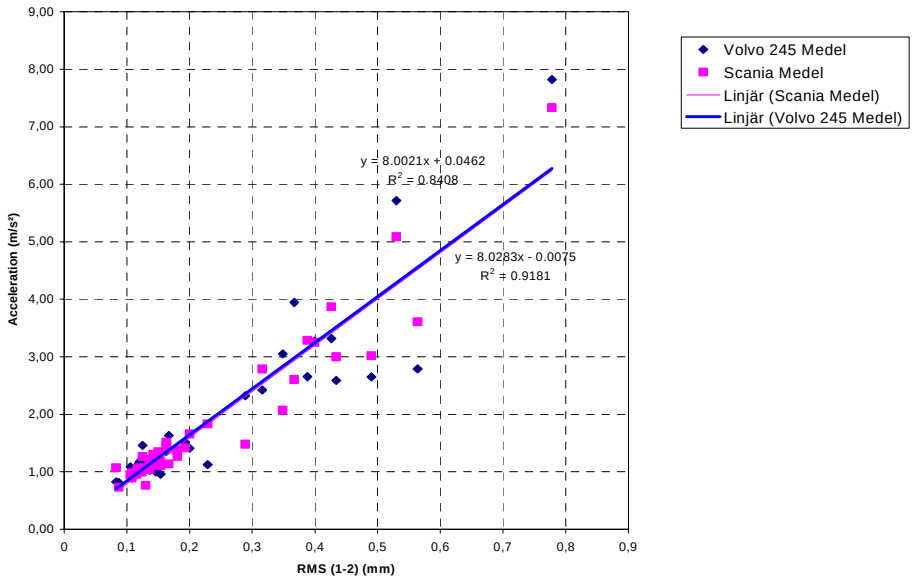
	Volvo	**Scania**
Modell	245	q 94
Årsmodell	1983	1999
Axelavstånd (m)	2,64	..4,70
Tjänstevikt (kg)	1400	7 00
Totalvikt (kg)	1930	18000

Figur 23 visar sambandet mellan framhjulsaccelerationer uppmätta i de två fordonen som funktion av vägojämnheten uttryckt i IRI. Det kan konstateras att accelerationsnivåerna över samtliga provsträckor är ungefär desamma i båda fordonen vilket inte var att förvänta. I vissa fall har t.o.m. högre accelerationer noterats i personbilen än i lastbilen. Regressionslinjerna är också i stort sett lika. Detta resultat är svårt att förklara i all synnerhet eftersom lastbilen var olastad. Dock har lastbilen s.k. parabelfjädring vilket medför att friktionsdämpningen är nedbringad så långt det är möjligt vid stålfjädring, nära nog jämförbar med den hos en skruv(spiral)fjädring. Resultatet är ändå förvånansvärt eftersom personbilen givetvis har individuell framhjulsfjädring medan lastbilen har stel framaxel med åtföljande högre s.k. ofjädrad (snarare däckfjädrad) massa. Korrelationen är i båda fallen tämligen hög, r = 0,93 för lastbilen och 0,89 för personbilen.

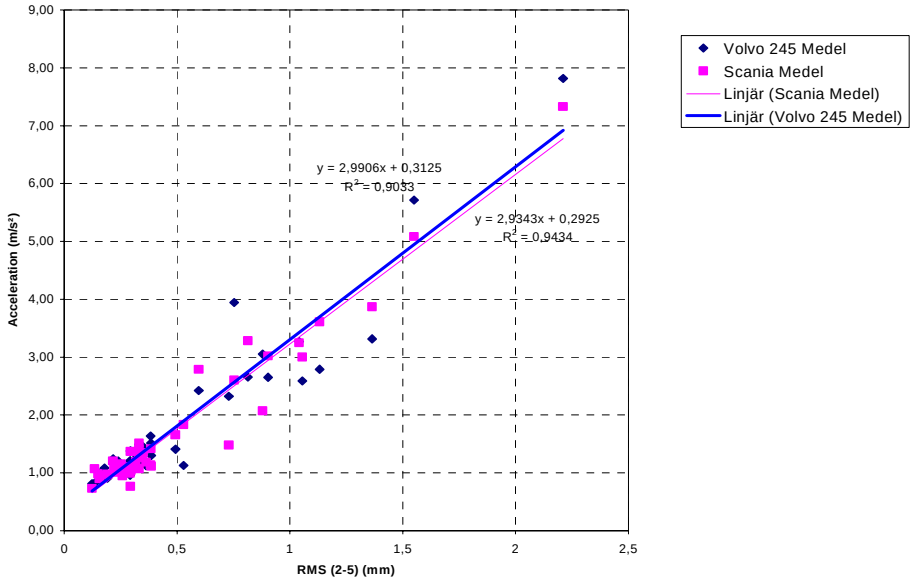
Den vertikala framhjulsaccelerationen har också jämförts med RMS-värdet för de olika våglängdsområden som definierats i (figur 23–27). Enligt tabell 15 ligger den s.k. axelhoppfrekvensen i området 10–20 Hz (våglängdområde 1–2 m). Närmare bestämt ligger den för en personbil nära 10 Hz och för lastbilar nära 15 Hz. Det var därför att förvänta att en jämförelse med RMS-värdet för detta frekvensområde skulle ge den högsta korrelationen. Det visade sig dock att korrelationskoefficienterna för detta våglängdsområde var 0,96 för lastbilen och 0,92 för personbilen med motsvarande för frekvensområdet 4–10 Hz (2–5 m) var 0,97 resp. 0,95. I båda fallen var sålunda korrelationerna bättre än vid jämförelse med IRI. Jämförelse med RMS-värdena de längre våglängdbanden gav lägre korrelationer än IRI. Det förefaller därför som om RMS-värdet för något väl valt våglängdsområde i vägprofilen är en bättre prediktor på fordonsslitaget än IRI-värdet.



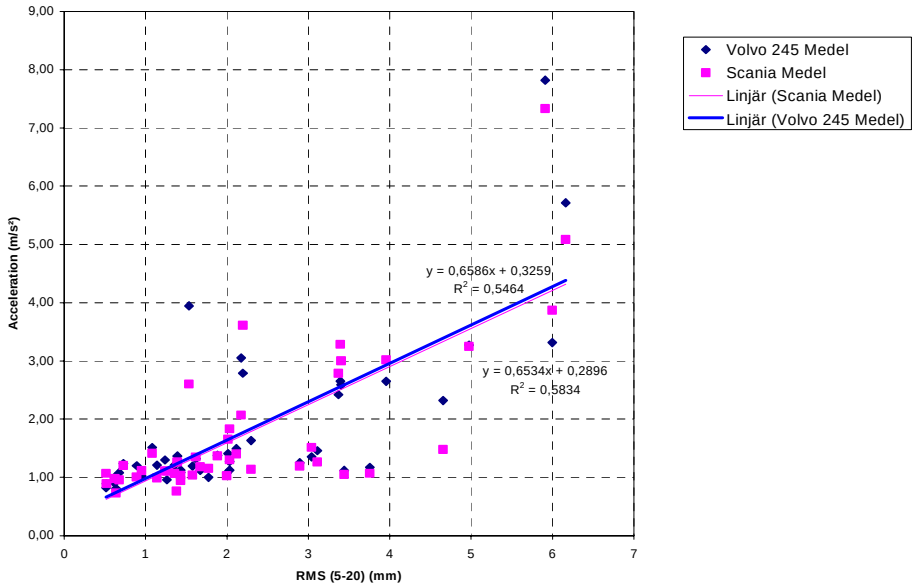
Figur 23 *Framhjulsaccelerationer uppmätta i personbil Volvo 245 och i lastbil Scania 94 som funktion av vägojämnheten uttryckt i IRI.*



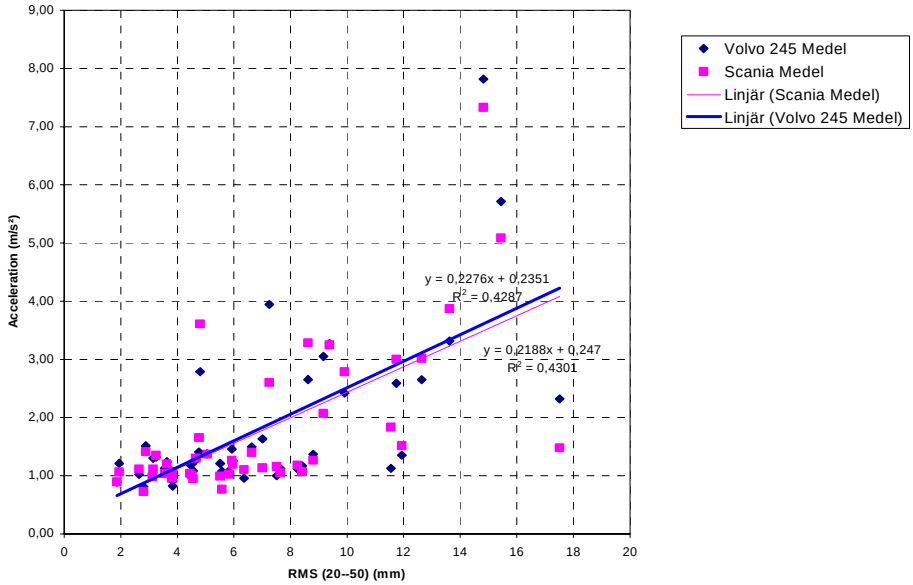
Figur 24 *Framhjulsaccelerationer uppmätta i personbil Volvo 245 och i lastbil Scania 94 som funktion av vägojämnheten i våglängdområdet 1–2 m motsvarande frekvensområdet 10–20 Hz vid färdhastigheten 70 km/h.*



Figur 25 *Framhjulsaccelerationer uppmätta i personbil Volvo 245 och i lastbil Scania 94 som funktion av vägojämnheten i våglängdområdet 2–5 m motsvarande frekvensområdet 4–10 Hz vid färdhastigheten 70 km/h.*



Figur 26 *Framhjulsaccelerationer uppmätta i personbil Volvo 245 och i lastbil Scania 94 som funktion av vägojämnheten i våglängdområdet 5–20 m motsvarande frekvensområdet 1–4 Hz vid färdhastigheten 70 km/h.*



Figur 27 *Framhjulsaccelerationer uppmätta i personbil Volvo 245 och i lastbil Scania 94 som funktion av vägojämnheten i våglängdområdet 20–50 m motsvarande frekvensområdet 0,4–1 Hz vid färdhastigheten 70 km/h.*

Enligt figur 23 är för de jämnaste vägarna (IRI = 0,5–2) accelerationsnivån i stort sett konstant. Enligt figur 1 resp. 2 i bilaga 1 motsvaras IRI = 0,5–2 mm/m av RMS1-2 = 0,1–0,2 mm och RMS2-5 = 0,1–0,5 mm. Framhjulsaccelerationen enligt figurerna 24 och 25 ökar däremot linjärt med RMS1–2 och RMS2–5 inom (bl.a.) detta jämnhetsområde och är därmed känsligare prediktorer på framhjulsaccelerationer än vad IRI-värdet är.

4.3 Vägpåkänning

Vid färd på ojämna vägar försätts fordonen i vertikal svängningsrörelse. De därtill associerade vertikalaccelerationerna tillsammans med de tunga massorna hos lastfordon och bussar ger upphov till stora variationer i dynamisk hjullast. Storleken hos dessa hjullastvariationer beror av våglängd och amplitud hos vägens längsprofil i de två hjulspåren, färdhastigheten, fordonens massa, massfördelning och fjädringsegenskaper.

Storleken hos dessa dynamiska hjullastvariationer brukar anges i DLC ”Dynamic Load Coefficient” definierad som:

$$DLC = \frac{hjullastens\ standardavvikelse}{statisk\ hjullast}; \qquad (8)$$

Den normala variationsvidden hos DLC är 0,1 till 0,3. Den s.k. fjärdepotensregeln säger att vägslitaget är proportionellt mot hjullasten upphöjd till fjärde potens. Detta betyder att förlusten i vägens livslängd när hjullasten överstiger statisk hjullast med ett viss mått är mycket större än vinsten i livslängd när hjullasten understiger statisk last med samma belopp. Följaktligen ökar vägförslit-

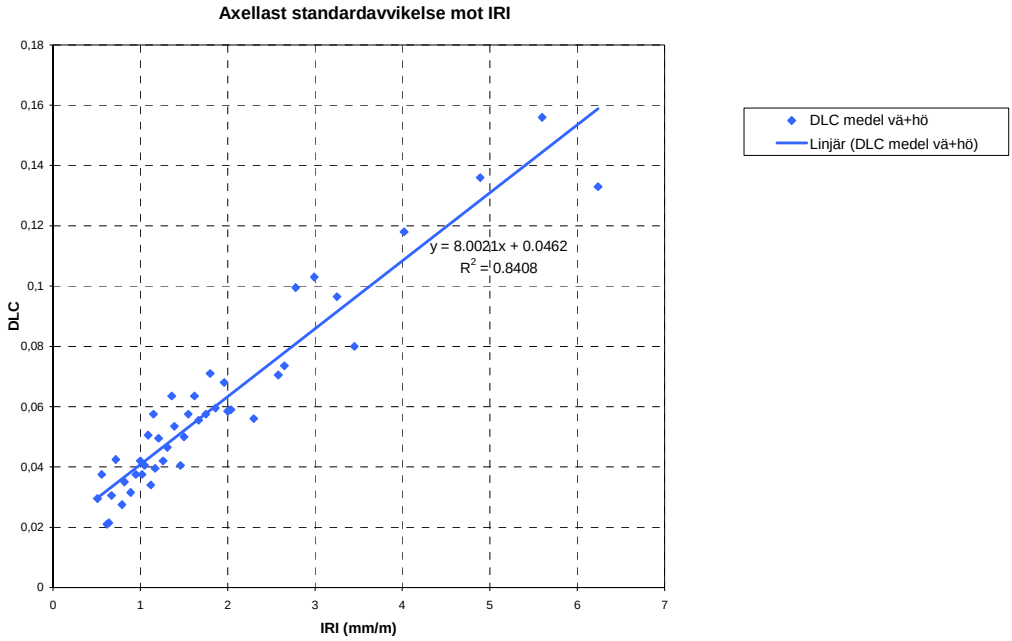
ningen med ökande hjullastvariation trots att medelvärdet av hjullastvariationerna över en tillräckligt lång vägsträcka är lika med den statiska lasten. Till exempel är en hjullast uppgående till 120 % av statisk last enligt fjärdepotensregeln dubbelt så skadlig för vägen som den rent statiska lasten.

De stora hjullastvariationerna är associerade till fordonskarosseriets vertikalsvängningar på karosserifjädringen, "body bounce", men med ett överlagrat mindre tillskott härrörande från axlarnas svängningsrörelse mellan däckfjädringen och karosserifjädringen, "axle hop".

För ett visst fordon med given last och hastighet beror som ovan nämnts dess bidrag till vägnedbrytningen på graden av vägojämnhet. En ojämn väg ger sålunda upphov till dynamiska hjullastvariationer som skadar vägen så att ojämnheten ökar med åtföljande större hjullastvariationer och därmed en ytterligare försämring av vägytan, dvs. man får en accelererad nedbrytning av vägen. Det är därför angeläget att genom fortlöpande jämnhetsmätningar följa den gradvisa försämringen av vägytan så att förbättringsarbeten kan igångsättas innan nedbrytningen gått för långt.

VTI:s mätfordon för mätning av vägytans deflektion under rullande last den s.k. Laser RDT (Laser Road Deflection Tester) har utrustning för mätning av dynamisk hjullast på såväl höger som vänster bakhjul (Östergren och Magnusson, 1998). Mätsystemet utnyttjades för mätning av dynamisk axellast på samma mätsträckor som användes för vibrationsbedömningar och mätning av framhjulaccelerationer.

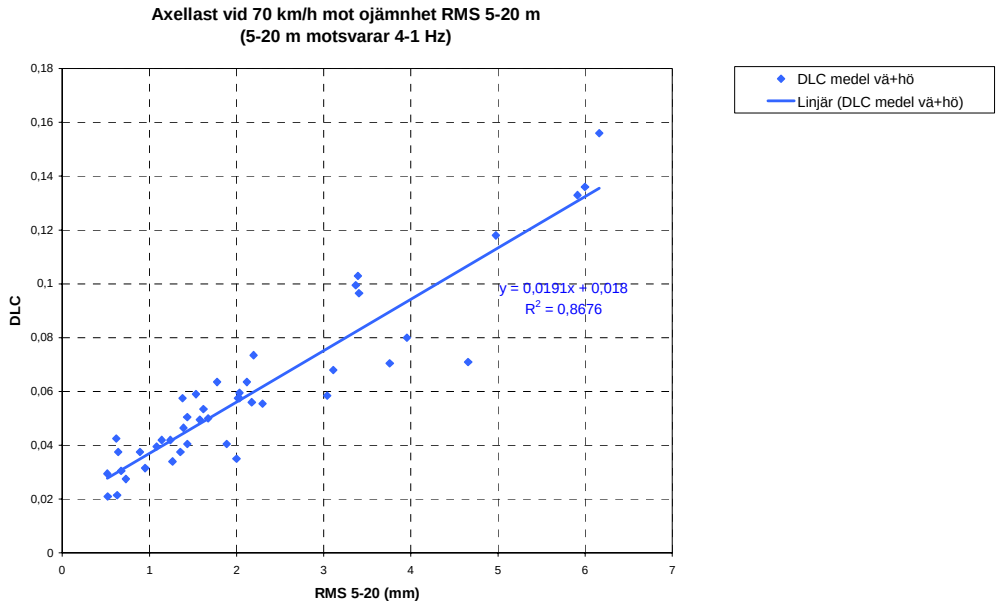
Figur 28 visar sambandet mellan DLC och IRI. Sambandet är som synes linjärt och med tämligen god korrelation (r = 0,92).



Figur 28 *DLC som funktion av vägytans jämnhet uttryckt i IRI.*

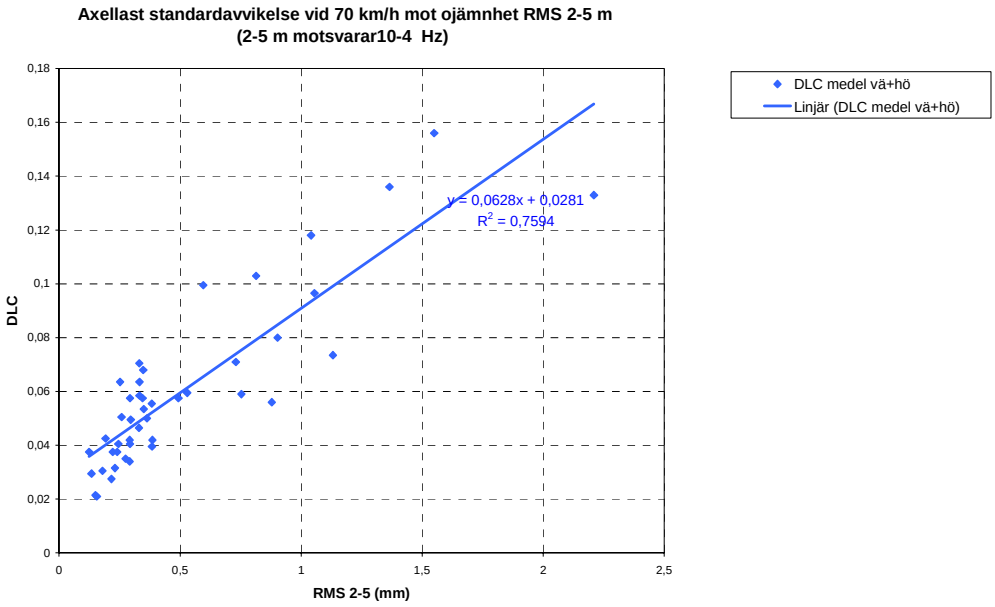
En något högre korrelation (r = 0,93) fås vid jämförelse med RMS-värdet för våglängdsområdet 5–20 m, motsvarande frekvensområdet 1–4 Hz vid hastigheten 70 km/h (se figur 26). Eftersom egenfrekvensen för fordonskarosserites svängningar på vagnsfjädringens egenfrekvens ligger i detta område var det enligt ovan

att förvänta att RMS-värdet för detta frekvensområde skulle ge den bästa korrelationen. Skillnaden i korrelation jämfört med motsvarande för IRI är dock som synes mycket liten



Figur 29 *DLC och som funktion av vägojämnheten i våglängdområdet 1–2 m motsvarande frekvensområdet 10–20 Hz vid färdhastigheten 70 km/h.*

Korrelationen mellan DLC och övriga här studerade RMS-värden är avsevärt lägre. Den näst bästa korrelationen (r = 0,87) fås för frekvensområdet 4–10 Hz som sålunda innehåller axelhoppfrekvensen (se figur 18). Övriga studerade samband ej illustrerade.



Figur 30 *DLC och som funktion av vägojämnheten i våglängdområdet 2–5 m motsvarande frekvensområdet 4–10 Hz vid färdhastigheten 70 km/h.*

Här redovisade resultat indikerar sålunda att IRI och RMS för våglängdsområdet 5–20 m är lika goda prediktorer på hög dynamisk axellast, åtminstone för vägar där tunga fordon håller en hastighet av cirka 70 km/h. Vid 90 km/h motsvaras frekvensområdet 1–4 Hz av våglängdsområdet 1,7–7 m. Det återstår att utröna om RMS-värdet för detta våglängdsområde är en god prediktor på högt potentiellt vägslitage på vägar där 90 km/h är en vanlig hastighet.

5 Rekommendationer för fortsatt forskning

5.1 Upplevelse av vägojämnhet (åkkomfort)

I samband med planeringen av här avrapporterad studie förslogs att bedömningarna av vägojämnhet skulle kompletteras med mätning av de accelerationer som människan utsätts för vid färd på ojämn väg. För ändamålet skulle en av de s.k. "krockdockor" som används vid VTI:s krockbana utnyttjas. Tyvärr gick detta inte att genomföra pga. bristande tid hos krockbanans personal vilket ledde till att någon krockdocka inte kunde iordningställas inom den tidsram som stod till förfogande för mätningarnas genomförande. Det rekommenderas att detta genomförs, lämpligen inom ramen för det planerade projekt som tills vidare går under benämningen "Bilisters monetära värdering av komfort" inom huvudprojektet ”Vägytans trafikeffekter”.

Studier av bilisters upplevelse av komfort eller kanske snarare okomfort har nästan alltid avsett upplevelsen av vibrationer även om den totala komfort- eller okomfortupplevelsen förutom av vibrationsupplevelsen beror av ett flertal faktorer såsom buller, infraljud, ljusförhållanden, det fordonsinterna klimatet etc. Dessa studier har vanligen strävat efter att etablera samband mellan en på något sätt kvantifierad upplevelse av vibrationer och ett på vägens längsprofil baserat uttryck för vägens ojämnhet. Denna begränsning gäller även för här avrapporterad studie.

Bedömningarna av upplevelse av vägojämnhet utfördes först i personbil och därefter i lastbil. Det kunde då konstateras att den totala upplevelsen av vägojämnhet i lastbil innehöll en stor del som härrörde från bilens krängningsrörelser och var därigenom annorlunda än i personbilen. Lastbilen var av s.k. frambyggd typ vilket innebär att förare och passagerare satt högt över bilens krängaxel vilket medförde att de av tvärfallsändringarna förorsakade sidaccelerationer som påverkade försökspersonerna var större i lastbilen än i personbilen. Människan är vidare känsligare för sidaccelerationer än för vertikalaccelerationer vilket sålunda påverkar komfortupplevelsen (ISO Standard 2631). En annan aspekt är att sidaccelerationerna påverkar fordonet på ett sätt som kan föranleda korrigerande styråtgärder som i sig kan upplevas som tröttande, komfortnedsättande, men i extrema fall även kan utgöra en olycksrisk i händelse av överreaktion. Känsla av osäkerhet är kanske den största källan till nedsatt komfort för en bilist. Ytterligare studier kring detta behövs för att fastställa problemets omfattning och allvarlighet.

5.2 Fordonsslitage

Som ovan nämnts kunde inga direkta påkänningsmätningar genomföras eftersom detta förutsatte ombyggnad av fordonens fjädringssystem. Sådana mätningar genomförs dock av bilindustrien och kontakter med Volvo personvagnar visade att man är beredd att låna ut en personbil förberedd för sådana mätningar. Motprestationen torde kunna bestå av vägytemätningar på allmänna vägar eller Volvos provbana. Motsvarande överenskommelser torde också vara möjliga att träffa med Volvo och/eller Scania lastvagnar. Det rekommenderas att dessa försöksfordon förses med profilmätare av typ Laser RST Portable vilket gör det möjligt att finna direkta samband mellan den momentana vägojämnhetsberoende fordonsexcitationen och responsen i form av påkänning och acceleration hos kritiska fordonskomponenter. Några sådana studier har veterligen aldrig tidigare genomförts. Det bör genom sådan mätningar vara möjligt att finna de egenskaper

hos vägytan som har den största betydelsen för fordonsslitaget. Genom att alla mätningar sker samtidigt och i ett och samma fordon nedbringas personalkostnaderna till ett minimum och ett större spektrum av ojämnheter kan avsökas till rimlig kostnad.

5.3 Vägpåkänning

Här avrapporterad studie har givit ett samband mellan vägojämnhet och dynamisk hjullast. Detta samband kan användas som bidrag till utvecklandet av ett gränsvärde för acceptabel vägojämnhet från ett väghållarperspektiv. Ju högre dynamiska hjullaster desto snabbare vägnedbrytning, principiellt sett. Hur manifesteras då vägnedbrytningen? Man torde kunna särskilja åtminstone två mätbara nedbrytningssymptom hos vägar. En gradvis försämring av jämnheten, med en åtföljande försämring av bärigheten. Denna process torde vara snabbare ju lägre initialbärigheten är, innebärande att högre jämnhetskrav bör ställas på svagare vägar än på starkare sådana.

I syfte att vinna bättre insyn inom detta område föreslås ett flerårigt forskningsprojekt med följande uppläggning. Ett tämligen stort antal vägavsnitt med god initialjämnhet utväljs. Förslagsvis tas ett tjugotal teststräckor fram med en längd av cirka 1 km. Dessa provvägar bör ligga inom samma klimatzon men representera de tre av Vägverket definierade bärighetsklasserna med ungefär lika många provvägar i varje klass. Förändring i jämnhet, bärighet och dynamisk hjullast följs upp under projekttiden genom upprepade mätningar med Laser RST och Laser RDT eller hellre enbart Laser RDT kompletterad med utrustning för jämnhetsmätning. Mätningarna skall genomföras vid ungefär samma tidpunkt varje år. Det kan diskuteras om detta skall avse samma kalendertidpunkt eller vad som kanske skulle kunna kallas årstidstidpunkt, t.ex. viss tid efter tjällossning eller dylikt. Information om den tunga trafiken och dess eventuella förändringar under projekttiden insamlas genom trafikmätning och med utnyttjande av s.k. WIM-sensorer. Ett lyckosamt genomförande av detta projekt bör ge förbättrat underlag för fastläggande av jämnhetskrav för vägar av olika bärighetsklass och med olika trafikbelastning. Genom att följa trafikens förändringar över tid bör det också vara möjligt att förutse kommande förändringar i vägens tillstånd och därmed möjliggöra beslut om eventuellt erforderlig rehabilitering innan vägunderhålls- och trafikantkostnader nått oacceptabla värden.

5.4 Ytterligare analys av data insamlade i detta projekt

I projektet finns tillgång till en omfattande databas innehållande data från mätningar av både längs- och tvärprofiler med tillhörande mått. Data finns från de flesta i Europa förekommande mobila profilmätarna. I den här rapporten har data från längsprofilerna utnyttjats. Ett fortsatt arbete är att dels göra en detaljerad analys av tvärprofilerna men också en analys av längsprofilmätarna med fokus på vilka som skulle kunna användas i Sverige vid de övergripande mätningarna, t.ex. finns det alarmerande data för jämförbarheten mellan de nordiska mätarna.

Följande analyser föreslås:

- Detaljerad analys av i Sverige användbara längs- och tvärprofilmätare
- Analys av tvärprofildata

6 Referenser

Alm, I: **Transportabel komfort – komfortabel transport**. Statens väg- och trafikinstitut, VTI rapport 347, Linköping, 1989.

Alm, I & Magnusson, G: **Bilisters uppfattning om körkomfort och om det svenska vägnätet.** Statens väg- och trafikinstitut. VTI meddelande 693, Linköping, 1992.

ASTM Standard E 950-98: **Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling Reference**. Annual Book of ASTM Standards, Section 4 "Construction", Volume 04.03 Road and Paving Materials; Vehicle – Pavement Systems, ASTM, West Conshohocken, PA, USA.

Björkman, M & Ekman, G (1962): **Experimentalpsykologiska metoder**. Almqvist & Wiksell, Stockholm.

Cairney, PT & Prem, H & McLean, JR & Potter, DW (1989): **A literature study of pavement user ratings.** Research Report ARR 161, Austral Road Res Board, Vermont South, Victoria.

Carey, WN Jr. & Irick, PE (1690): **The pavement serviceability – performance concept.** HRB Bull. 250, pp 40–58, Highway Research Board, Wash. D.C.

Dahlstedt, Sven (1986): **A comparison of some daylight motorcycle visibility treatments**. VTI report 302A, Swedish Road and Traffic Reseach Institute, Linköping.

Dahlstedt, Sven (1996): **Bilisters upplevelse och bedömning av vägkorsningar**. VTI Meddelande 781, Statens Väg- och Transportforskningsinstitut, Linköping.

De WIT, & Kempkens, BE & Sjögren, L & Ducros, DM: **The FILTER Experiment**. Technical Note 199/2, FEHRL, 1999.

Descornet, G: **Inventory of High-Speed Longitudinal and Transverse Road Evenness Measuring Equipment in Europé**. Technical Note 1999/1, FEHRL, 1999.

Ducros, DM & Petkovic, L & Descornet, G & Berlemont, B & Alonso Anchelo, M & Yanguas, S & Jendryka, W & Andrén, P: **FILTER Experiment – Analysis of Longitudinal Measurements**. Technical Note 2001/1, FEHRL, 2001.

Engen, T (1971): **Psychophysics. Ch. 3 in Kling**, J.W. and Riggs, L.A., Woodworth and Schlosberg's Experimental Psychology, pp 47–86, Methuen, London.

FEHRL http://fehrl.lcpc.fr/fehrl_welcome.html

Gillespie, TD & Sayers, MW & Segel, L (1980): **Calibration of response-type road roughness measuring systems**. NCHRP Report 228, Dec 1980, TRB, Wash D.C.

Griffin, MJ (1990): **Handbook of human vibration**. Academic Press, London.

Holbrook, LF (1969): **Prediction of subjective response to road roughness by use of the Rapid Travel Profilometer**. Highway Research Record 291, pp 212–226, HRB, Wash D.C.

Hudson, WR & Halbach, D & Zaniewski, JP & Moser, L: **Root-Mean-Square Vertical Acceleration as a Summary Roughness Statistic**. Measuring Road Roughness and its Effects on User Cost and Comfort, ASTM STP 884. T.D. Gillespie and M. Sayers. Eds., American Society for Testing and Materials. Philadelphia, 1985, pp 3–24.

International standard ISO 2631-1: **Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1: General requirements**. International Organization for Standardisation, Genève, Schweiz, 1997.

International standard ISO 3534-1: **Statistics – Vocabulary and symbols – Part 1: Probability and general statistical terms**. International Organization for Standardisation, Genève, Schweiz, 1993.

International Standard ISO 8608: **Mechanical vibration – Road surface profiles – reporting of measured data**. International Organization for Standardisation, Genève, Schweiz, 1995.

Janoff, MS (1988): **Pavement roughness and rideability – Field evaluation**. NCHRP Rpt 308, Transportation Research Board, Wash D.C.

Janoff, MS & Nick, JB & Davit, PS & Hayhoe, GF (1985): **Pavement roughness and rideability.** NCHRP Rpt 275, Transportation Research Board, Wash D.C.

Karamihas, SM & Gillespie, TG & Kohn, SD & Perera, RW: "**Guidelines for longitudinal pavement profile measurement**". National Cooperative Highway Research Program, Report 434, Transportation Research Board, National Research Council, February 1999.

Ksaibati, K & Asnani, S & Adkins, TM: ”**Factors Affecting the Accuracy of Road Profilers Measurement**”. Mountain-Plains Consortium, MPC Report No. 93-20, 1993.

Lay, MG (1992): **Ways of the world**. Rutgers University Press, New Brunswick, NJ.

Loizos, A & Golias, J & Kanellaidis, G. & Kondou, M (1994): **Effects of road user characteristics and vehicle type on road roughness perception**. Road & Trp Res., Vol 3, No 4, 56–64.

Magnusson, Georg & Arnberg, Peter W (1976): **Bedömning och mätning av vägojämnheter.** VTI Rapport 83, Statens Väg- och Trafikinstitut, Linköping.

Magnusson, Georg & Arnberg, Peter W & Pettersson, HE (1977): **Mätning och bedömning av ojämnheter på grusväg**. VTI Rapport 123, Statens Väg- och Trafikinstitut, Linköping.

Magnusson, G & Andrén, P: **Matematisk beskrivning av vägytor och longitudinella profiler**. Statens väg- och transportforskningsinstitut, VTI Notat 41, Linköping 2001.

Nick, JB & Janoff, MS (1983): **Evaluation of panel rating methods for assessing pavement ride quality**. Transp.Res.Rec. 946, pp 5–13, Transportation Research Board, Wash D.C.

Paterson, WDO: "**International Roughness Index: Relationship to Other Measures of Roughness and Riding Quality**". Transportation Research Record 1084, National Academy Press, Washington D.C., USA, 1986.

Perera, RW & Kohn, SD & Richter, CA: **Comparative Testing of Profilometers**. Transportation Research Record 1435, National Academy Press, Washington D.C., USA, 1994.

PIARC. **Caractéristiques de Surface des Chaussées. IV Symposium International ”SURF 2000”**. Nantes, France, May 22–24 2000.

Quinn, BE (1983): **Problems encountered in using vehicle ride as a criterion of pavement roughness**. Transp Res Rec. 946, pp 1–4, Transp Res Board, Wash. D.C.

Sayers, M: **Dynamic terrain inputs to predict structural integrity of ground vehicles**. The University of Michigan, Transportation Research Institute, Ann Arbor, Michigan, 1988.

Sayers, M W: "**Profiles of roughness**". TRB 69th Annual Meeting January 7–11, 1990, Preprint 890220, Washington, D.C., USA, 1990.

Sayers, MW: **"On the calculation of IRI from longitudinal road profile**". TRB 74th Annual Meeting January 22–28, 1995, Preprint 950842, Washington, D.C., 1995.

Sayers, MW & Gillespie, TD: "**The Ann Arbor Profilometer Meeting"**. Report No. FHWA/RD-86/100, Washington, D C, USA, 1986.

Sayers, MW & Karamihas, SM: "**The Little Book of Profiling**". UMTRI, November 1995.

Sayers, MW & Karamihas, SM (1996): **Estimation of rideability by analyzing longitudinal road profile.** Transp.Res.Rec. 1536, pp 110–116,Transportation Research Board, Wash D.C.

Sayers, MW & Karamihas, SM: "**Interpretation of road roughness profile data** ". UMTRI 96–19, June 1996.

StatSoft: (1997): **Statistica, release 5**. StatSoft Inc, Tulsa, OK.

Stevens, SS (1975): **Psychophysics**. Wiley, New York.

Still, PB & Jordan, PG: "**Evaluation of the TRRL high-speed profilometer"**. Department of the Environment, Department of Transport, TRRL Report Laboratory LR 922, Crowthorne, U. K., 1980.

Weaver, RJ. & Clark, RO (1977): **Psychophysical Pavement Serviceability**. Report from Soil Mechanics Bureau, New York State DOT, Albany, NY.

Willet, M & Magnusson, G & Ferne, B: "**Theoretical Study of Indices**". FEHRL Investigation on Longitudinal and Transverse Evenness of Roads, Concluding Workshop, Nantes, 24 May 2000.

Östergren, R & Magnusson, G: "**Laser RDT: dynamisk bakaxellastmätning. Analys av mätningar i vägsimulator".** Statens väg- och transportforsknings-institut, VTI notat 69-1998, Linköping, 1998.

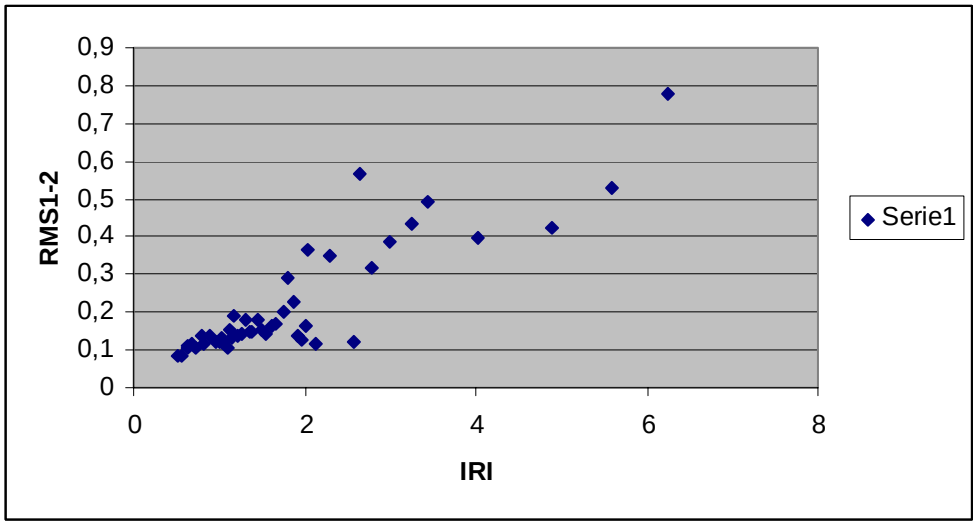
Mätsträckor vid de egna fältmätningarna

Tabell A 1 visar med Laser RST uppmätta jämnhetsvärden för de 46 mätsträckor som utnyttjades för vibrationsbedömningar och för mätning av framhjuls-accelerationer och dynamiska hjullaster. De olika RMS-värdena avser RMS-värdet för våglängdsområdena 1–2, 2–5, 5–20 resp. 20–50 m.

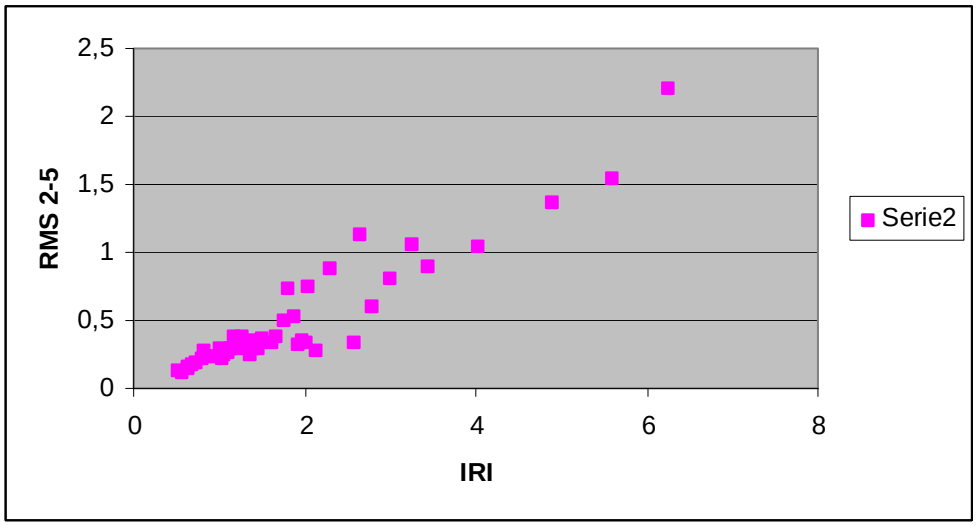
Tabell A1 *Uppmätta jämnhetsvärden*

Sträcka nr	IRI	RMS 1-2	RMS 2-5	RMS 5-20	RMS 20-50	Sträcka nr	IRI	RMS 1-2	RMS 2-5	RMS 5-20	RMS 20-50
1	6,24	0,778	2,21	5,912	14,822	24	2,58	0,12	0,331	3,757	8,413
2	3,25	0,434	1,055	3,405	11,741	25	0,67	0,116	0,179	0,675	3,807
3	2,04	0,367	0,753	1,535	7,249	26	1,5	0,153	0,363	1,672	8,251
4	5,6	0,53	1,55	6,162	15,443	27	0,64	0,113	0,15	0,628	3,129
5	2,78	0,316	0,596	3,369	9,915	28	1,17	0,193	0,384	1,082	2,886
6	1,62	0,163	0,332	2,117	6,63	29	2	0,163	0,332	3,039	11,933
7	0,95	0,123	0,24	0,892	4,519	30	1,02	0,132	0,222	1,356	1,943
8	0,82	0,119	0,275	1,998	5,812	31	0,51	0,083	0,134	0,517	3,84
9	1,26	0,145	0,386	1,239	3,147	32	0,56	0,087	0,124	0,64	2,81
10	1,39	0,15	0,35	1,62	3,246	33	1,46	0,18	0,293	1,886	5,056
11	1,09	0,106	0,258	1,433	4,559	34	1,31	0,181	0,33	1,391	8,796
12	1,21	0,137	0,296	1,578	4,442	35	0,79	0,138	0,216	0,728	3,632
13	1,55	0,142	0,345	2,032	4,66	36	0,62	0,108	0,156	0,522	1,868
14	2,3	0,349	0,879	2,175	9,165	37	0,89	0,136	0,231	0,952	2,646
15	2,65	0,564	1,132	2,196	4,801	38	0,72	0,108	0,192	0,62	3,832
16	1,8	0,289	0,73	4,658	17,515	39	1,67	0,167	0,383	2,298	7,01
17	1,15	0,13	0,293	1,381	5,576	40	1,91	0,138	0,318	2,894	5,97
18	1,75	0,2	0,493	2,016	4,768	41	2,14	0,117	0,275	3,441	7,647
19	1,96	0,125	0,348	3,11	5,927	42	2,99	0,388	0,814	3,394	8,626
20	1,05	0,121	0,245	1,434	3,553	43	4,89	0,426	1,365	5,998	13,628
21	1,36	0,146	0,252	1,776	7,509	44	1,86	0,229	0,529	2,032	11,551
22	1,12	0,154	0,292	1,265	6,356	45	4,02	0,399	1,041	4,975	9,38
23	1	0,124	0,292	1,141	5,515	46	3,45	0,49	0,903	3,955	12,639

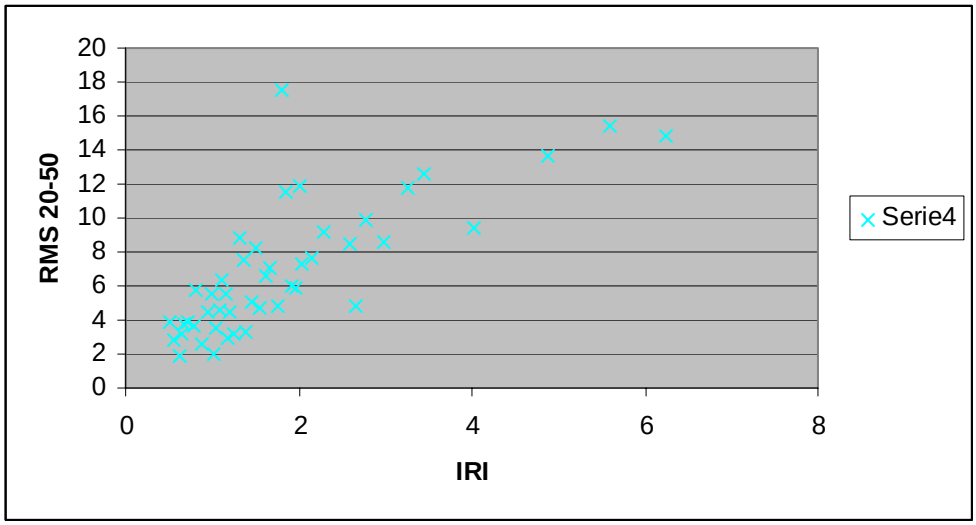
Figur 1–4 visar sambandet mellan RMS-värdena för de olika våglängdsområdena och IRI.



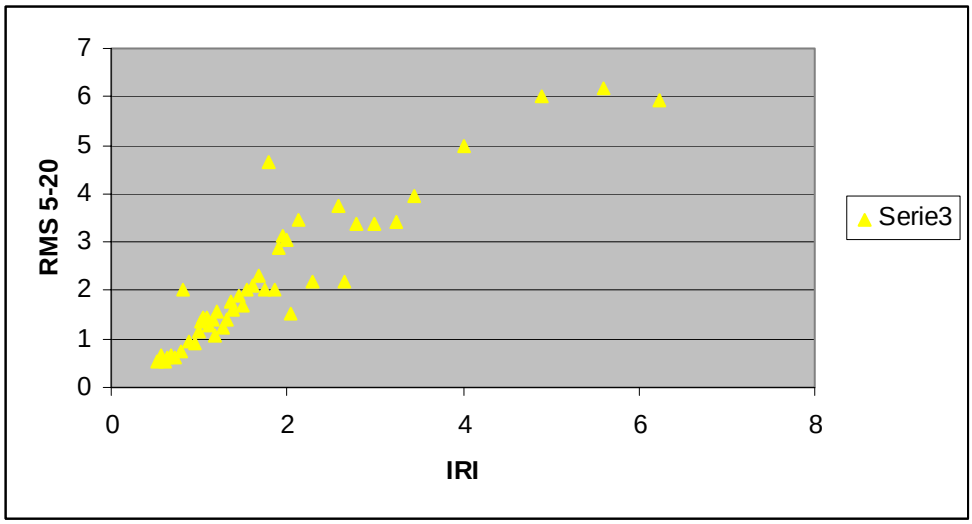
Figur 1 *Sambandet mellan RMS för våglängdsområdet 1–2 m och IRI.*



Figur 2 *Sambandet mellan RMS för våglängdsområdet 2–5 m och IRI.*



Figur 3 *Sambandet mellan RMS för våglängdsområdet 5–20 m och IRI.*



Figur 4 *Sambandet mellan RMS för våglängdsområdet 20–50 m och IRI.*

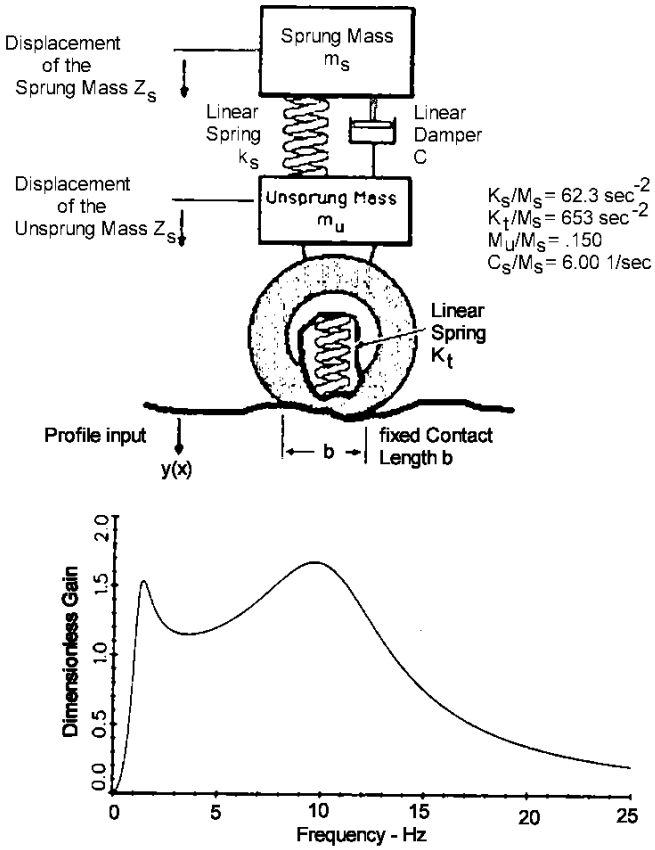
IRI

Sayers (1995) definierar IRI och uppställer krav på dess mätning enligt det följande:

"Definition av IRI

1 IRI beräknas från en uppmätt longitudinell vägprofil. Samplingsintervallet bör inte vara större än 300 mm för att medge noggranna beräkningar. Den upplösning som krävs beror av ojämnhetsnivån, med bättre upplösning för jämnare vägar. En upplösning av 0,5 mm är lämplig för alla förhållanden.
2 Profilen antas ha konstant lutning mellan två höjdvärden.
3 Profilen glättas genom beräkning av flytande medelvärde med baslängden 250 mm.
4 Den glättade profilen filtreras genom en s.k. "quarter-car"-simulator med specificerade parametervärden och simulerad hastighet 80 km/h (figur 1).
5 Den simulerade relativa fjädringsrörelsen ackumuleras linjärt och divideras med profilens längd för att ge IRI. IRI är därför ett lutningsmått och anges i enheten m/km eller mm/m, viket är samma sak.

Interpolation mellan mätpunkter skall vara linjär.



Figur 1 *"Quarter-car".*

IRI-filter

IRI inkluderar två olika filter: flytande medelvärde och en "quarter-car"-modell. Det flytande medelvärdet tjänar två syften. Det simulerar bildäckets draperande verkan över vägytan och det minskar "quarter-car"-modellens känslighet för samplingsintervallets längd.

IRI-algoritmen

"State transition algorithm" föredras framför eulerintegration. I det förstnämnda fallet kan samplingsintervallet uppgå till 20 mm utan fel och <2 % vid 300 mm. Eulerintegration ger ett litet fel redan vid samplingsintervall understigande 10 mm.

Profilometerklassificering

För att en profilometer skall kunna klassificeras som tillhörande Klass 2 skall den kunna ge IRI-värden som i genomsnitt varken är för höga eller för låga. Ett individuellt mätvärde kan dock förväntas var behäftat med ett slumpmässigt fel. Begreppet Klass 1 representerar ett instrument som är så noggrant att det slumpmässiga felet är försumbart, dvs. att ett rapporterat IRI-värde verkligen är det "sanna" IRI-värdet. Det vill säga så sant det nu kan vara med hänsyn till den levererade profilen trots allt är samplad, ehuru med mycket litet samplingsintervall.

Baserat på data som var tillgängliga då IRRE i Världsbankens regi genomfördes 1982 sattes den till Klass 1 associerade noggrannhetsnivån till ±2 % för provsträckor om 320 m. Resultat från korrelationsstudier under de följande tio åren visade emellertid att denna originalspecifikation för IRI-mätningar som skall uppfylla kraven för Klass 1 är otillräckliga. Instrument som "på papperet" tillhör Klass 1 har använts för upprepade IRI-mätningar som givit mycket varierande resultat. Det huvudsakliga problemet är att världsbanksspecifikationerna fokuserar på instrumentet och inte dess användning. Mänskliga felhandlingar resulterar ibland i inkorrekt profilmätning och sålunda även inkorrekta IRI-värden. En operatör kan starta mätningen för sent eller för tidigt eller placera mätfordonet i ett felaktigt sidoläge.

Sentida mätningar inom RPUG och LTPP-projektet visar att ingen av de nu existerande profileringsinstrumenten är så idiotsäkra och automatiska att varje enskilt mätresultat reservationslöst kan betraktas såsom varande av kvalitetsklass 1. Världsbanken kan klassa ett instrument såsom tillhörande Klass 1 men för att kunna säkerställa att ett visst mätvärde kan betraktas såsom varande av Klass 1 måste mätningen upprepas åtminstone en gång.

Som en del av FHWA:s forskningsprogram utnyttjades data från mätningar inom RPUG-mötet 1993 i syfte att utveckla förslag till kriterier för mätningar enligt Klass 1. Studien visar att mer forskning behövs innan det är möjligt att redovisa de viktigaste faktorerna som påverkar repeterbarheten. Det är t.ex. känt att vägprofiler förändras med temperaturen. Dessa ändringar kan vara mera signifikanta än rena mätfel.

Utrustning för referensprofilmätning

Totalstation

En totalstation är ett elektroniskt instrument för mätning av längd och horisontal och vertikal vinkel. Totalstationen uppställs på en punkt i terrängen med kända koordinater i såväl x- som y- och z-led. På den punkt på t.ex. en vägyta vars koordinater skall bestämmas placeras ett s.k. prisma vars läge automatisk uppsöks av en från totalstationen utsänd infraröd ljusstråle varvid prismats koordinater lagras i totalstationens dator.

"Swivelling Dipstick"

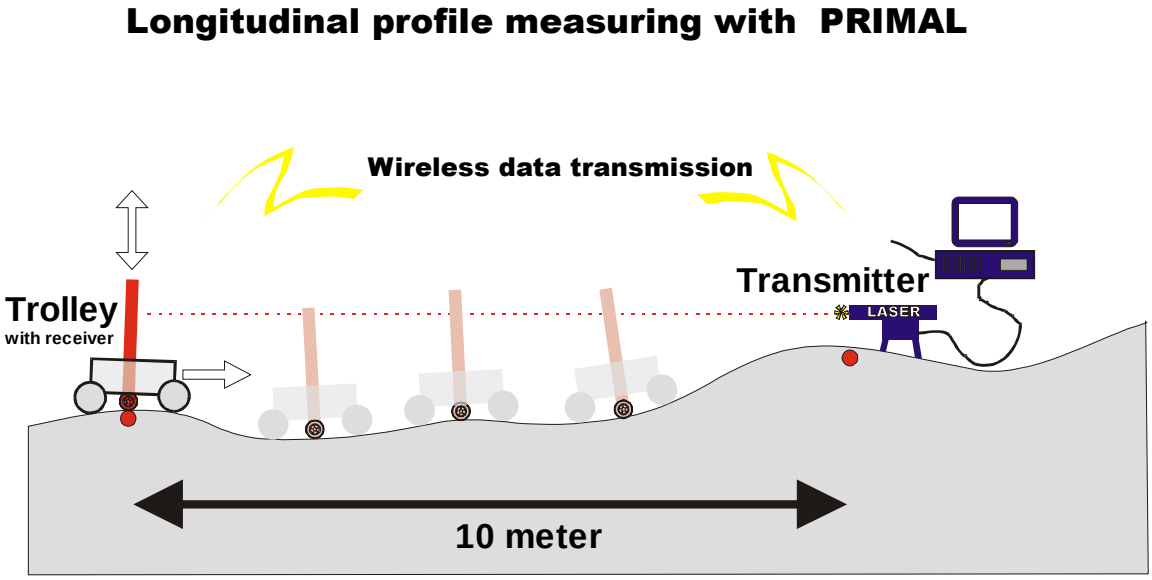
"Swivelling Dipstick" (vanligen Dipstick) är ett instrument utvecklat för profilmätning, t.ex. på en väg. Det är i princip en pendel upphängd i en rätvinklig "låda" med rektangulär över- och undersida. Lådans botten är försedd med en fot i vardera änden, placerade mitt på dess kortsidor, medan en vertikal stång med ett handtag i den övre änden är fäst mitt på ovansidan. Dipstick finns i såväl metrisk som "imperial" version med avståndet 0,25 m, 0,3 m resp 1' mellan fötterna. I EVEN/FILTER-experimentet användes versionen med 0,25 m mellan fötterna. Pendeln mäter lådans lutning i längsled relativt horisonten och eftersom avståndet mellan fötterna är känt kan den absoluta höjdskillnaden mellan dessas understödspunkter beräknas. Genom att starta mätningen från en punkt med känd absolut-höjd och med hjälp av handtaget successivt rotera lådan ett halv varv runt den främre foten fås en stegvis mätning av absoluthöjden längs profilen.

Mätning med Dipstick fordrar bara en man och enligt tillverkaren är det möjligt att mäta, lagra och analysera en vägsträcka om 180 m på en timme med en noggrannhet av ±0,15 mm för den metriska versionen. En test av en prototyp av Dipstick har genomförts i Austin, Texas, U.S.A. och man rapporterade att: "operator error does not seem to be a factor in the instruments accuracy, the repeatability of the measurement system is very good, and the integrity of the data as far as file reversal is accurate".

PRIMAL

PRIMAL (se figur 1) består av en liten vagn med ljuskänslig sensor och en stationär laser. Vagnen som är batteridriven har dimensionerna ca 0,5×0,5×0,5 m har tre bärhjul och ett mäthjul, det sistnämnda med diametern 70 mm. Vagnen placeras vid startpunkten för mätsträckan med lasern ca 10 m framför och laserstrålen riktas längs vägen med sikte på vagnens sensor (se figur 2). Vagnen startas och rör sig mot lasern, styrd av laserstrålen. Sensorn är vertikalt rörlig i vagnen och dess läge relativt en fast referens i vagnen avkännes. Samtidigt avkännes avståndet mellan mäthjulet och samma referens och profilen utgör slutligen summan av dessa båda avstånd. Avståndet mellan vägyta och laserstråle registreras med ett samplingsavstånd av 20 eller 40 mm och skickas trådlöst till kontrolldatorn i den följebil som ingår i systemet. Mätningen sker i sektioner om 10 m och när mätningen av en sådan sektion genomförs flytas den stationära lasern 10 m längs den profil som skall uppmätas och proceduren upprepas. Ändpunkten för varje sektion mäts med totalstation enligt ovan eller med konventionell avvägning.

Figur 1 *PRIMAL*



Figur 2 *Principen för mätning av längsprofil med PRIMAL.*

Walking Profiler

Walking Profiler är stor som en liten motorgräsklippare och skjuts i långsam promenadtakt av en operatör längs den profil som skall mätas. Instrumentet innehåller en liten balk (linjal) av längden 241,3 mm (9,5") försedd med en fot i vardera änden. Då instrumentet skjuts längs vägprofilen läggs balken automatisk ned på ytan och dess längslutning relativt horisonten mätes med hjälp av en snabb servoaccelerometer. Därefter lyfts balken automatiskt och flyttas fram ett steg så att den bakre foten hamnar på den plats den främre befann sig på vid föregående mätning och en ny längslutning avläses. En komplicerad mekanism, styrd av ett av instrumentets bärhjul, gör att balken under mätning ligger stilla på vägytan helt

frikopplad från resten av instrumentet trots att instrumentet skjuts med konstant hastighet. Genom sådana konsekutiva länkade lutningsmätningar fås en ofiltrerad längsprofil samplad med avståndet 241,3 mm.

Rolling Dipstick

Skälet till att PRIMAL valdes som referensinstrument i FILTER-experimentet snarare än Rolling Dipstick, som utnyttjades som referensinstrument i EVEN-experimentet, var som ovan nämnts att funktionssätt och noggrannhet för det sistnämnda instrumentet var okända storheter för den grupp som organiserade FILTER-experimentet. Representanten för det företag som utvecklat och marknadsför Dipstick (The Face Companies, Norfolk, Virginia, USA) var vid ovannämnt förförsök, syftande till att fastställs noggrannheten hos ett antal tänkbara referensinstrument, obenägen att avslöja mätprincipen. Följande information om Rolling Dipstick har emellertid sedermera framkommit.

Instrumentet består i princip av en tvåaxlad, tvåhjulig vagn som vid mätning i normal promenadtakt (högst 3 mph dvs. högst 4,8 km/h) skjuts längs den profil som skall inmätas. I likhet med Swivelling Dipstick mäts med hjälp av en inklinometer längslutningen hos vagnens chassi med jämna intervall. Intervallet är troligen 600 mm vilket är lika med axelavståndet. I vagnens mittpunkt finns emellertid ytterligare ett hjul som är rörligt i vertikalled i chassiet. Genom att mäta höjdläget relativt chassiet, positivt eller negativt, och kombinera denna information med information om chassiets längslutning fås den ofiltrerade profillutningen i steg om 300 mm.

Höghastighetsprofilometri

GM-profilometern

GM-profilometern utvecklades under 1960-talet av General Motors Research Laboratories och består av ett motorfordon, vanligen en personbil eller minibuss, försedd med vissa mätdon samt utrustning för beräkning och lagring av vägprofildata. GM-profilometern är den vanligaste typen av höghastighetsprofilometrar och dessutom den enda typ som används i Sverige.

En GM-profilometer utgörs av ett motorfordon som vid mätning körs i normal trafikhastighet längs den väg vars längsprofil skall mätas. I fordonet finns monterat i huvudsak tre mätdon samt utrustning för strömförsörjning och datainsamling, -bearbetning och -lagring. Ett av mätdonen mäter under mätningen tillryggalagd distans längs vägen, vanligen en pulsgivare monterad på ett icke drivande fordonshjul. Ett annat mätdon utgörs av en anordning som kontinuerligt mäter höjden över vägytan hos en punkt i fordonet. Tillsammans med vägdistansmätaren ger detta sålunda en bild av vägens längdprofil relativt ett i mätfordonet fixt koordinatsystem. En på höjdmätaren monterad accelerometer mäter den vertikala accelerationen hos densamma. Genom att dubbelintegrera denna accelerationssignal fås höjdmätarens av fordonets rörelser påtvingade vertikalrörelser. Genom att subtrahera höjdmätarens vertikalrörelser från den fordonsrelaterade vägprofilen fås slutligen en bild av vägens längdprofil relaterad till ett markfast koordinatsystem. Det ovanstående utgör en principiell beskrivning av mätmetoden. I verkligheten utnyttja normalt förstaderivatan av höjdmätningen tillsammans med vertikalaccelerationen integrerad endast en gång för att ge längdprofilens förstaderivata som utnyttjas för beräkning av jämnhetsmätetalet IRI. Vid behov kan längdprofilens förstaderivata sedan integreras en gång för att ge vägens höjdprofil.

Följande i FILTER-experimentet deltagande mätfordonen var av denna typ:

ALFRED
ARAN Laser SDP
DRI Profilograph III
Dynatest 5051 RSP
Harris
Laser RST
Roadmaster
ZAG-VP

Rätskenebaserade profilometrar

Denna mätprincip utvecklades av dåvarande "Transport and Road Research Laboratory" (nuvarande TRL "Transport Research Laboratory") början av 1980-talet. Instrumentet är byggt på en s.k. minivan, alternativt en enaxlad släpvagn med två bärhjul. Fyra avståndsmätande lasrar är vertikalt monterade i rät linje längs fordonet, en i vardera änden av fordonet och en i mitten. Avståndet mellan dessa lasrar är 2,0 m. Den fjärde lasern sitter 0,1 m bakom den främre lasern. Dessa lasrar bildar egentligen två rätskenor, profilometrar, en bestående av lasrarna nummer 1, 3 och 4, räknat från framänden av släpvagnen, och använd för mätning av våglängder överstigande 10 m och en bestående av lasrarna 1, 2 och 4 för mätning av våglängder i området 0,5 till 20 m. Dessa båda profiler kombineras

sedan till att ge en enda profil innehållande det våglängdsområde som mäts av de båda profilometrarna. Mäthastigheten är 5 till 80 km/h och överföringsfunktionen mellan verklig och registrerad vägprofil är oberoende av mäthastigheten medan däremot mätfelet ökar med ökande hastighet. Enligt Still och Jordan (1980) är det maximala mätfelet för våglängder kortare än 3, 10 och 25 m 1,5, 2,0 resp. 4,2 mm. Eftersom mätprincipen förutsätter att alla fyra lasrarna successivt mäter mot samma punkt på vägbanan uppkommer vissa mätfel vid mätning i kurva.

Följande i FILTER-experimentet deltagande mätfordonen var av denna typ:

ARGUS
Multifunction Road Monitor
HRM

APL (Analyseur de Profil en Long)

APL utvecklades av Laboratoire Central des Ponts et Chausse′es (LCPC) i Frankrike. APL består av en enhjulig släpkärra som bogseras vid konstant hastighet i området 6–140 km/h. Mäthjulet som är av cykeltyp är monterat i bakänden av en bakåtriktad arm som via en fjäder och en svängningsdämpare bär släpkärrans ballastade ram. En horisontell lågfrekvent pendel med samma rotationscentrum som mäthjulets arm tjänar som pseudohorisontell referens och den parameter som mäts är vinkeln mellan hjularmen och pendeln. Överföringsfunktion hos APL är lika med ett (1) i frekvensområdet 0,4 till 20 Hz oberoende av vertikalrörelser hos dragfordonet. Detta betyder att APL kan mäta vägprofiler inom ett våglängdsområde som beror av mäthastigheten enligt nedan.

$l_{min} = v/20$ $\qquad$ $l_{max} = v/0{,}4;$

där l = våglängd (m)
v = mäthastighet (m/s)

Det våglängdsområde som är av intresse för mätning kan sålunda enkelt väljas genom val av lämplig mäthastighet. Under mätning måste den valda hastigheten hållas konstant för att mätresultat skall kunna innehålla samma våglängdsområde över hela mätsträckan. Genom en speciell filtreringsprocess skall det dock vara möjligt att restaurera den profildistorsion som orsakats av varierande mäthastighet under en mätning. Det observerade våglängdsområdet blir då:

$l_{min} = v_{max}/20;$ $\qquad$ $l_{min} = v_{min}/0{,}4;$

I syfte att studera egenskaperna hos denna nya APL har ett flertal provningar genomförts såväl på vibrationsbord som på LCPC:s provbana. Man har funnit att mätfelet består av två delar. Ett instrumentfel som visats vara mindre än ±0,5mm och ett slumpmässigt fel i den digitaliserade profilamplituden vilket är normalfördelat och med en standardavvikelse av cirka 3 % av den maximala amplituden.

APL utvecklades ursprungligen för att endast ge ett jämnhetsmått, men sentida studier vid University of Michigan Transportation Research Institute (UMTRI) har visat att det är möjligt att ta fram en geometrisk beskrivning av profilen från den av APL registrerade mätparametern. (Sayers and Gillespie,

1986). Detta är dock inte möjligt att göra direkt vid mätningen utan fordrar vidare bearbetning i laboratoriet efter avslutad mätning.

ARAN

ARAN (Automatic Road ANalyzer) har utvecklat av ett kanadensiskt företag som numera heter Roadware Corporation beläget i Paris, Ontario, Kanada. Den ursprungliga versionen av ARAN har ett mätsystem som består av ett eller två par accelerometrar som används för mätning av vertikalaccelerationen hos bakaxel resp. fordonskarosseri. Vägens längsprofil beräknas ur accelerometersignalerna med hjälp av en matematisk modell av mätfordonets fjädringssystem. Accelerometersignalerna samplas med intervallet 2" (~50 mm) längs vägen och profilvärden beräknas med intervallet 6" (~150 mm). Om endast ett par accelerometrar används monteras en accelerometer mitt på bakaxeln och en i bilens karosseri rakt ovanför den axelmonterade accelerometern. Den matematiska fordonsmodellen är i detta fall en s.k. "Half-car model" dvs. modellen innehåller information om bakaxelfjädringens fjädrings- och dämpningsegenskaper, bakdäckens fjädringsegenskaper, bakaxelns massa samt om den del av karosseriets massa som anses vara associerad till fjädringsrörelsen hos mätfordonets bakre del. Detta är sålunda en matematisk modell av samma typ som den som används vid beräkning av IRI från en uppmätt vägprofil.

Vid användning av två par accelerometrar monteras en i vardera änden av bakaxeln och de andra två i fordonskarosseriet ovanför dessa. I detta fall används två identiska matematiska modeller för beräkning av två längsprofiler där de ingående fordonsdata torde ha halva värdet jämfört med modellen enligt ovan. Dessa modeller är sålunda av typen "Quarter-car model". I det förstnämnda fallet fås sålunda en profil som är medelvärdet av profilerna i de två hjulspåren medan i det senare fallet profilen i vardera hjulspåret registreras separat.

Noggrannheten hos denna profilmätningsmetod är något tveksam. Den största osäkerhetskällan torde vara valet av massor som skall anses vara associerade till karosseriets fjädringsrörelser. De fordonsmodeller som används synes förutsätta att fordonet består av två respektive fyra av varandra oberoende massor uppburna av de fyra hjulfjädrarna dvs. utan koppling mellan massorna. Det är inte känt vilka massor som utnyttjas i modellerna men det är troligt att de motsvarar statisk bakaxel- respektive bakhjulslast.

Även om uttryck för fordonsfjädringens egenskaper inte behövs i beräkningen av profilen erfordras dock kännedom om däckens fjädringsegenskaper. Däcken har även en viss dämpning som försummas, vilket kanske kan anses vara tillåtet, och fjäderkarakteristiken betraktas som linjär och bestäms genom statisk mätning.

Tillverkaren av ARAN har sedermera utvecklat ett nytt mätsystem för längsprofilmätning. Denna nya ARAN (ARAN Laser SDP) är en GM-profilometer och en sådan deltog som ovan nämnts i FILTER-experimentet. Övriga exemplar av ARAN som deltog i experimentet var av här beskriven äldre modell.

Översikt, bedömningssträckor

Delsträcka nr	Avstånd i km från start	Medel IRI	Standavv$_{IRI}$
1	1,7	3,25	0,82
2	3,0	2,04	0,72
3	4,1	5,60	1,87
4	5,1	2,78	0,86
5	7,5	1,62	0,34
6	8,7	0,95	0,08
7	9,6	0,82	0,18
8	10,8	1,26	0,22
9	12,0	1,39	0,21
10	13,7	1,09	0,17
11	14,9	1,21	0,48
12	16,0	1,55	0,56
13	17,0	2,30	0,68
14	19,1	2,65	1,77
15	20,2	1,80	0,40
16	21,5	1,15	0,24
17	22,7	1,75	0,38
18	24,1	1,96	0,54
19	25,2	1,05	0,29
20	26,3	1,36	0,36
21	27,3	1,12	0,15
22	28,5	1,01	0,19
23	30,1	2,58	0,64
24	31,8	0,67	0,14
25	33,2	1,50	0,42
26	34,6	0,64	0,15
27	36,4	1,17	0,31
28	37,5	2,00	0,61
29	38,9	1,02	0,27
30	40,0	0,51	0,10
31	41,5	0,56	0,07
32	42,6	1,46	0,21
33	43,6	1,31	0,22
34	44,9	0,79	0,08
35	46,5	0,62	0,15
36	48,1	0,89	0,20
37	49,2	0,72	0,16
38	50,2	1,67	0,42
39	51,2	1,91	0,55
40	52,3	2,14	0,79
41	54,2	2,99	0,70
42	55,2	4,89	2,22
43	56,4	1,86	0,53
44	58,1	4,02	0,70
45	59,1	3,45	0,72
Ref	0,7 / 59,5	6,24	2,70

Instruktion – Vägytebedömning

Med hjälp av modern teknologi kan man idag mäta upp och kvalitetsgradera vägytor med en sådan precision och noggrannhet att människans urskiljningsförmåga vida överträffas. Frågan blir då till slut om de vägbyggnadstekniska kraven också överstiger vad som bilförare eller passagerare kan känna skillnad på. Din uppgift idag är att hjälpa oss att ta reda på hur en riktigt jämn väg känns, och även att beskriva hur ojämn en mera skrovlig och guppig väg känns.

Vi kommer att köra en sväng på vägarna söder om Linköping, och litet då och då kommer vi att be dig att bedöma hur ojämn vägen är på den delsträcka vi just åker på.

Vi kommer att börja med att åka på en provsträcka, som har en ojämnhet som motsvarar vad som är den maximala ojämnheten på de vägsträckor som ska bedömas. Denna ojämnhet säger vi är 100 %. Ett annat jämförelsevärde, som du dock inte får känna på utan bara tänka dig, är ojämnheten hos en väg som är jämn och slät som ett dansbanegolv. En sådan sträcka, där man alltså inte kan känna några ojämnheter alls, skall förstås ha ojämnhetsbedömningen 0 %.

Alla delsträckor, som du skall bedöma, är 100 meter och de skall bedömas i förhållande till dessa två utgångsvärden. Det innebär att om en sträcka känns hälften så ojämn som den maximalt ojämna, så bör den få en bedömning kring 50 %; om ojämnheten är knappt märkbar bör bedömningen bli låg – kanske bara några få procent – om ojämnheten är mera kraftig bör också din bedömning bli högre. Om du någon gång tycker att ojämnheten är kraftigare än på referenssträckan med värdet 100, så bör du givetvis ge en bedömning som är större än 100 % – t.ex. 200 om ojämnheten känns dubbelt så kraftig, eller kanske värden som 105–110 om teststräckan bara känns en aning mera ojämn än referenssträckan.

Du avger dina bedömningar genom att rita ett kort men tydligt lodrätt streck tvärs över den horisontella ledlinjen på raden för respektive delsträcka. De vertikala hjälplinjerna är inritade för att markera läget för 25 %, 50 % respektive 75 % i förhållande till 0 % och 100 % bedömningar. Om du vill ange bedömningar som är större än 100 % får du utnyttja marginalen. Om marginalen är för smal så får du skriva din bedömning med siffror.

Du bör också anstränga dig att skilja mellan alla de olika teststräckorna. Använd inte bara jämna 10-tal i dina bedömningar utan även ental, eller t.o.m. decimaler. Om du t.ex. gett bedömningen 62 % till en sträcka och sedan tycker att en annan sträcka är en liten, liten aning mera ojämn så kan du alltså ge den en bedömning på 63 %, eller kanske även 62,5 om du tycker skillnaden är riktigt hårfin och du klarar att dra strecket så noggrant.

Strax före varje bedömningssträcka kommer försöksledaren att säga till att det snart är dags för en bedömning. Då skall du sätta dig tillrätta så att du sitter normalt, bekvämt och framåtvänd och avbryta alla aktiviteter som samtal, radiolyssnande eller annat som kan störa din koncentration. Sedan säger försöksledaren ”Börja … NU”. Då ska du koncentrera dig på att känna efter hur jämn eller ojämn vägen känns just då, i just den stol du sitter i. Blunda gärna, eller titta upp i himlen för att inte störas av synintryck. När försöksledaren efter några sekunder säger “Slut”, så gör du en helhetsbedömning av hur sträckan kändes i förhållande till referensvärdena 0 % och 100 % och gör din markering. I några fall är det ganska korta avstånd mellan teststräckorna så du bör avge din bedömning snabbt och

spontant. Om en sträcka är obedömbar på grund av t.ex. vägarbeten, så kryssar du över ledlinjen tydligt.

Det finns inget som är rätt eller fel i dessa bedömningar. Din känsla av hur en vägsträcka känns är vår sanning, om du bara anstränger dig och ger dina upp-riktiga bedömningar.

Innan vi börjar det riktiga testet, så kommer vi att köra några träningssträckor så att du hinner vänja dig vid uppgiften och procedurerna. Några frågor nu?