

Entreprenadform och teknisk kvalitet i vägprojekt

2: Vägytans jämnhet vid trafiköppning



Jonas Ekblad
Robert Lundström

NCC Industry rapport augusti 2020
BVFF 6084
SBUF 13024

Upplands Väsby 2020

Förord

Redovisningen i detta projekt är delad i 2 rapporter och detta utgör nummer 2 där den första benämns: *Entreprenadform och teknisk kvalitet i vägprojekt: 1: Kontraktsförutsättningar, krav och rekommendationer*. Rapporterna är endast delvis fristående och skall med fördel läsas i ett sammanhang.

Och tack till Marit Boman för framsidans illustration.

Robert Lundström
Risk and R&D manager
NCC Industry, Division asphalt

Sammanfattning

Denna rapport är 2:a delen i en undersökning av inverkan av entreprenadform på nybyggda vägars mätbara tekniska kvalitet. Delrapport 1 undersöker skillnader i kontrakt och kravställning medan denna del sammanfattar och analyserar mätresultat och beskriver en riskmodell för vägyta vid trafiköppning.

Vägens tekniska kvalitet bedöms efter vägytans jämnhet, spår djup och IRI (International Roughness Index). Undersökningen omfattar sammanlagt 33 entreprenader (18 total- och 15 utförandeentreprenader) färdigställda mellan 2007 och 2017. För samtliga entreprenader har riktade vägytemätningar i direkt anslutning till trafiköppning använts. Den huvudsakliga frågeställningen var huruvida vägens trafiköppningsjämnhet skiljer mellan entreprenadformerna.

I hela datamängden är utförandeentreprenader marginellt jämnare än totalentreprenader. Jämförelse på entreprenadbasis (medelvärde och varians för enskilda objekt) visar dock ingen skillnad mellan entreprenadformer varken för medelvärden eller inomgruppsvarianser. Det var tämligen stor variation mellan enskilda entreprenader men mätningarna visar att det är möjligt att bygga mycket jämna vägar närmast utan kravöverträdelser.

INNEHÅLL

1. INLEDNING.....	5
2. MATERIAL OCH METODER	5
2.1. UNDERSÖKTA ENTREPRENADER	5
2.2. VÄGYTEMÄTNING AV GEOMETRISK JÄMNHET.....	7
3. RESULTAT	8
3.1. PRIMÄRDATA JÄMFÖRT MED PMSV3.....	9
3.2. SAMTLIGA MÄTNINGAR: 20 M.....	10
3.3. SAMPLADE FÖRDELNINGAR: 20 M	13
3.4. SAMTLIGA MÄTNINGAR: 400 M	15
3.5. JÄMNHETSINDEX	17
3.6. BÄSTA VS SÄMSTA.....	19
4. RISKER VID TRAFIKÖPPNING.....	21
5. DISKUSSION	26
REFERENSER	29

1. INLEDNING

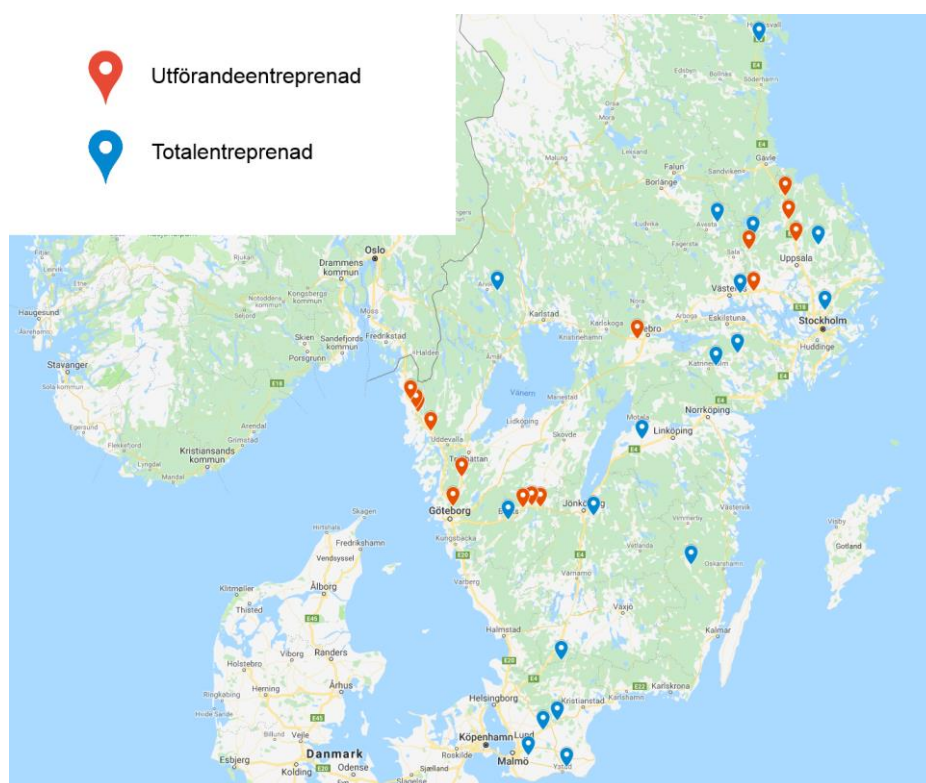
Första delrapporten sammanfattar skillnader och likheter mellan entreprenadformer, främst avseende teknisk kravställning och längd på garantitid, och går igenom förfrågningsunderlag, inklusive kontrakt och administrativa föreskrifter, för ett större antal totalentreprenader förfrågade mellan 2007–2018, för att klargöra vad som krävs och om det eventuellt förändrats över tid. Denna del avhandlar huruvida det sedan i praktiken finns skillnader mellan entreprenadformer avseende uppmätt teknisk kvalitet. Att jämföra entreprenadformer, eller för den delen enskilda vägbyggen, kräver att det finns mätningar som är direkt jämförbara vilket mätningar av vägytans geometriska jämnhet är: spårdjup är samma sak oavsett väg, och inte sällan avgörande för underhållsåtgärd, medan materialspecifikationer, som är vanliga i utförandeentreprenader, är projektspecifika och inte sinsemellan meningsfullt jämförbara.

Denna rapport sammanställer och analyserar vägytans tillstånd vid trafiköppning samt bestämmer riskbedömningsmodeller. Vägytans tillstånd under resterande kontraktstiden analyseras och redovisas i kommande rapport.

2. MATERIAL OCH METODER

2.1. *UNDERSÖKTA ENTREPRENADER*

I detta avsnitt presenteras resultat från 33 entreprenader (18 total- och 15 utförandeentreprenader) avseende uppmätt funktion (spårdjup och IRI) i samband med trafiköppning. Dessa entreprenader utgör en del av de entreprenader som ingick delrapport 1. Övriga totalentreprenader var antingen inte färdigbyggda eller har inte varit möjliga att erhålla data ifrån då sluttidpunkten för studien sattes. De 33 entreprenader som omfattas har valts utgående från tidpunkt för trafikpåsläpp/slutbesiktning och inte minst datatillgänglighet. Totalentreprenader, i den form som nu används, började förfrågas i mitten av 00-talet och de första färdiga vägarna några år därefter. Figur 1 illustrerar var i landet respektive entreprenad ligger.



Figur 1. Karta över undersökta entreprenader delade efter kategori.

Som man kan se är de undersökta entreprenaderna huvudsakligen lokaliserade i södra Sverige, totalentreprenaderna i ett band från Skåne till Stockholmsregionen och utförandeentreprenaderna mellan Göteborg och Stockholm, med ett fåtal undantag. Under studerad period har totalentreprenader i de mellersta och norra delarna av Sverige varit ovanliga.

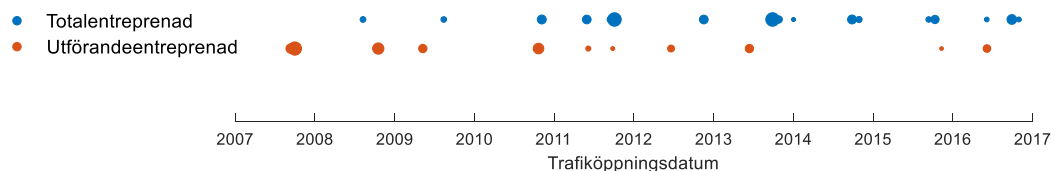
Även om enskilda entreprenader skiljer sig väsentligt åt vad gäller förutsättningar som lokalisering, körfältsindelning (2, 3 eller 4 körfält) och längd så skiljer det sig inte i genomsnitt så mycket mellan de två huvudkategorierna. Tabell 1 sammanfattar statistik avseende sammanlagda körfältslängder för respektive entreprenadtyp. Sammanlagd körfältslängd är summa längd av samtliga körfält i båda riktningarna.

Tabell 1. Antal och längder av olika entreprenadtyper (sammanlagd körfältslängd K1 och K2)

Entreprenadtyp	Antal	Körfältslängd [km]			
		summa	medel	max.	min.
Total	18	598	33	93	8
Utförande	15	540	36	87	7

Sammanlagd väglängd för totalentreprenader är 210 km och för utförandeentreprenader 213 km. Man kan även se i tabellen att det endast är små skillnader mellan grupperna vad gäller medel-, max- och minimilängder.

Entreprenaderna är även relativt jämt fördelade över tid där den första trafiköppnades 2007 och den sista år 2017. Figur 2 sammanfattar tidpunkt för trafiköppning av undersökta entreprenader.



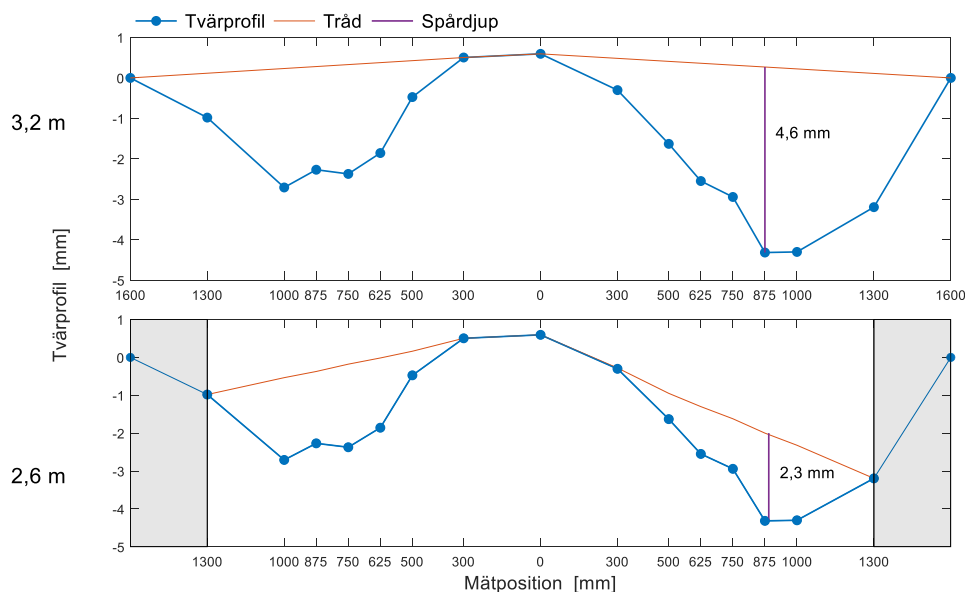
Figur 2. Tidslinje för färdigställande. Cirkulär storlek indikerar respektive entreprenads summerade körfältslängd.

Underlaget omfattar vägtyperna vanliga 2-fältsväg, 2+1 och 2+2 vägar. Samtliga större entreprenörer (NCC, PEAB, Skanska och Svevia) finns representerade med övervikt för NCC.

2.2. VÄGYTEMÄTNING AV GEOMETRISK JÄMNHET

Vägytans jämnhet vid trafiköppning har mätts med vägytemätbil enligt Trafikverkets metodbeskrivning för objektmätning f.n. TDOK (2014a) tillsammans med beskrivningen av mätstorheter, TDOK (2014b)). Dessa objektspecifika mätningar jämförs även med datauttag från Trafikverkets databas (pmsv3) där mätningarna utförts enligt metodbeskrivning för vägnätsmätning. Metoderna för vägytemätningen har förändrats något under perioden 2007–2017. Bedömningen är dock att metod- och prestandamässigt är skillnader mellan och förändringar i mätmetoder försumbara under perioden för undersökningen.

Som redovisats i den 1: a rapporten är det i praktiken främst 2 vägytemått som alltid utvärderas: längsgående- och tvärgående ojämnheter d.v.s. IRI (International Roughness Index) och spårdjup. Längsgående IRI mäts i höger hjulspår enligt sedan länge standardiserad modell, medan det för spårdjup (tvärs) finns en rad olika mått varav de viktigaste är maximalt spårdjup för 3,2 m mätbredd samt för 2,6 m mätbredd. Spårdjupsbestämningen baseras på den s.k. trådmodellen och metodskillnaden mellan 3,2 och 2,6 m illustreras i Figur 3. I praktiken innebär skillnaden att de yttre mätpunkterna inte används vid spårdjupsbestämningen för 2,6 m mätbredd (15 lasrar).



Figur 3. Spårddjupsbestämning vid olika mätbredd: 3,2 m eller 2,6 m (17 eller 15 lasrar).

Anledningen till metodskillnaden är varierande körfältsbredd där man vid mätning av smalare körfält riskerar att mäta utanför själva körfältet t.ex. på vägmarkeringsmassa som tolkas som beläggningsojämnhet, men inte är hänförligt beläggningsarbetet i sig. Effekten är tydlig i Figur 3 där den högraste mätpunkten i den övre figuren kan tänkas ha hamnat på vägmarkeringen och därmed ger upphov till en högpunkt som ger högre beräknat spårddjup jämfört med undre figuren som motsvarar 2,6 m mätbredd.

Många av de vägar som byggts sedan 2007 har något smalare körfält än vad som varit historiskt vanligt. Typisk körfältsbredd är 3,5 m, just där gränsen för vilken under 2,6 m mätbredd är praxis. Körfältsbredder varierar dock mellan entreprenader och även inom entreprenader och längs enskilda körfält: 2+1 vägar kan t.ex. ha olika körfältsbredd för singelkörfält och 2-körfältsdelar. Utöver att vara närmast ogörligt att hålla reda på alla olika körfält och anpassa spårddjupsbestämningen skulle det även innebära att spårddjupet inte bestäms på samma sätt för de olika körfälten och entreprenaderna vilket i sin tur starkt försvårar generell jämförelse. Som även beskrivits i delrapport 1 utvärderas kravställning och avdrag både för medelvärden över 20 och 400 m. Eftersom studien avser jämföra teknisk kvalitet beroende på entreprenadform så objektivt som möjligt baseras all vidare jämförelse avseende spårddjup på mätbredden 2,6 m och som medelvärden över 20 m och 400 m.

3. RESULTAT

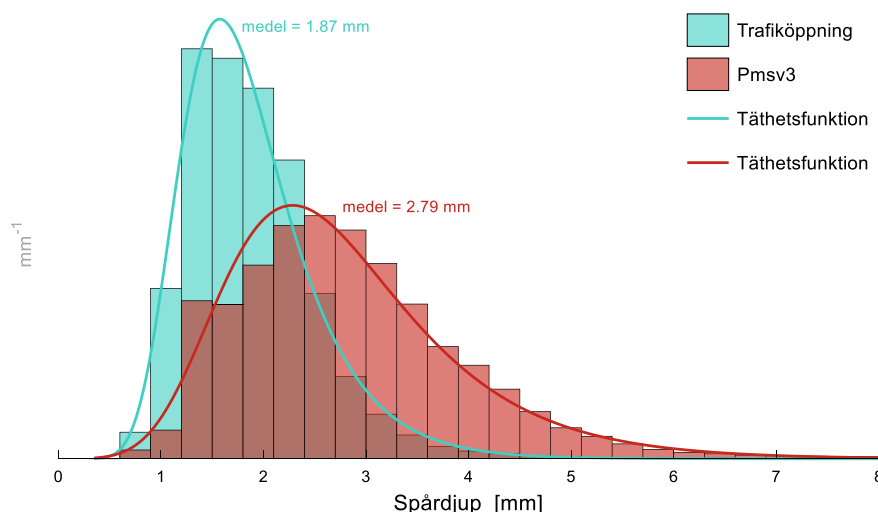
Undersökningens främsta källa är objektsmätningar i direkt anslutning till de enskilda entreprenadernas trafiköppning. Mätt yta är således ofrafikerad eller i några fall utsatt för högst ringa trafik. Sammanställda mätningar har utförts av NCC Industry, Rambøll, Sweco (och Vectura) och VTI (Statens väg- och

transportforskningsinstitut). Dessa mätningar och resultat utgör undersökningens primärdata. Som jämförelse har även mätningar redovisade i Trafikverkets pmsv3 synkroniserats med de enskilda objektmätningarna och sammanställts. Vidare räknas all mätt yta som tillhörande samma population d.v.s. ingen skillnad mellan körfält (K1 eller K2) eller vägriktning (med eller mot) görs.

I de statistiska analyserna är nollhypotesen (H_0) i samtliga fall att ingen skillnad mellan medelvärden föreligger. Vald signifikansnivån (α) är 5 % dvs. vi förkastar nollhypotesen om $p < 0,05$ och konstaterar att det föreligger skillnad.

3.1. PRIMÄRDATA JÄMFÖRT MED PMSV3

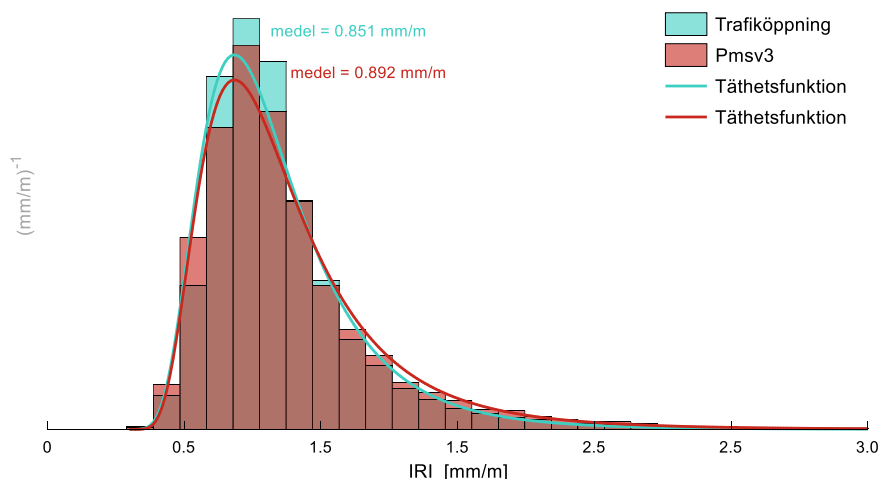
Allmänt är huvudkällan för vägytemätningar Trv:s pmsv3. Det finns emellanåt begränsningar då somligt inte mäts årligen och somligt endast i 1 riktning. En ytterligare begränsning i det här fallet är att mätningarna inte sker i samband med trafiköppning utan i regel först året efter vilket inte ger en direkt bild av nyproducerad vägyta. Figur 4 visar primärdata (objektmätningar i samband med trafiköppning) jämfört med närmast följande vägnätsmätning tillgänglig i pmsv3 för spår djup, 2,6 m mätbredd.



Figur 4. Jämförelse mellan specifik trafiköppningsmätning och närmast efter följande vägnätsmätning avseende spår djup (normaliserat histogram och täthetsfunktion).

Som man kan se i Figur 4 uppvisar resultaten från pmsv3 högre spår djup vid 1:a mätningen efter trafiköppning än primärkällan, objektmätningarna. En uppenbar förklaring till att trafiköppningsmätningarna har lägre spår djup är att dessa är utförda i nära anslutning till slutbesiktningen och trafiköppningen, medan resultaten i pmsv3 kommer från Trafikverkets årliga mätning som normalt utförs under otjälade barmarksförhållanden d.v.s. företrädesvis senvår och sommar. På så sätt kan enskilda entreprenader i den senare kategorin legat under trafik under vintern och därmed ackumulerat spår genom trafikinducerat slitage och deformationer. Den genomsnittliga trafikerade beläggningens ålder vid vägnätsmätning (pmsv3) var ca 9

månader. För att göra en relevant jämförelse mot ställda krav vid slutbesiktning och jämföra olika entreprenadformer är det viktigt att basera analysen på mätdata tagna i samband med slutbesiktningen varför denna undersökning specifikt inriktats mot objektmätningar i samband med trafiköppning. Figur 5 visar samma jämförelse för ojämnheter i längsled, IRI.



Figur 5. Jämförelse mellan specifik trafiköppningsmätning och närmast efter följande vägnätsmätning avseende IRI.

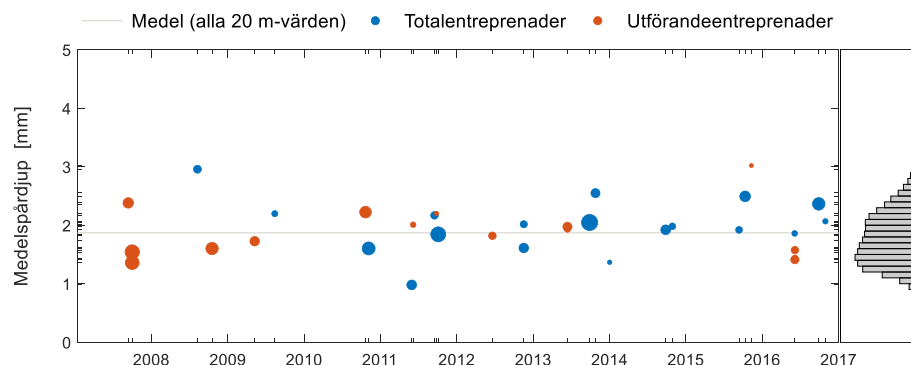
För IRI är skillnaden mellan mätresultat vid trafiköppning och pmsv3 mindre än för spårdjup men även här har mätvärdet tydligt ökat. Sammanfattningsvis kan det konstateras att för riskbedömning av nybyggd vägyta är det viktigt med mätningar i direkt anslutning till trafiköppning.

3.2. SAMTLIGA MÄTNINGAR: 20 M

I den första analysen summeras all mätt vägyta inom respektive entreprenadkategori. Mätningarna i sig är delade i mätriktning (med/mot) och körfält (K1/K2). Givet det stora antalet mätningar och därmed frihetsgrader kan den statistiska analysen påvisa väldigt små skillnader, utan praktisk betydelse eller egentlig förståelig orsak. Det finns en liten skillnad mellan t.ex. mätriktning men det finns ingen rimlig förklaring till varför det skulle variera utan det betraktas som en statistisk artefakt. Likaså skillnad mellan körfält för nyproducerad yta. Följande figurer och analys summerar därför samtliga mätningar inom respektive entreprenadform och ingen vidare delning görs. Beräknade statistiska parametrar, medelvärden och andelar överskridande gränsvärden, baseras på mätdata mängden och inte på den passade täthetsfunktionen för respektive fördelning som främst visas som visuell hjälp. Avsnitt 4 *Risker vid trafiköppning*, modellerar sedan statistiska fördelningar.

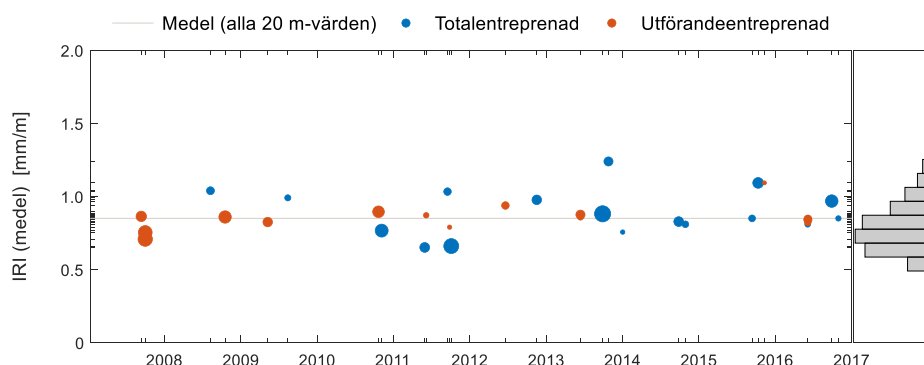
Vi börjar med att undersöka om det finns några generella trender under observationsperioden 2007–2017. Figur 6 sammanfattar entreprenadernas

medelspårdjup över tid delat per entreprenadform och i Figur 7 samma jämförelse för IRI.



Figur 6. Medelspårdjup för enskilda entreprenader som funktion av tid. Cirk-lar-nas storlek indikerar respektive entreprenads summerade körfältslängd.

Visuellt synes det inte vara någon skillnad var sig över tid eller mellan entreprenadform. En statistisk jämförelse bekräftar detta: skillnader över tid och mellan entreprenadformer kan bero på slumpfel. Detta gäller oavsett om jämförelserna viktas per objekt eller efter väglängd.

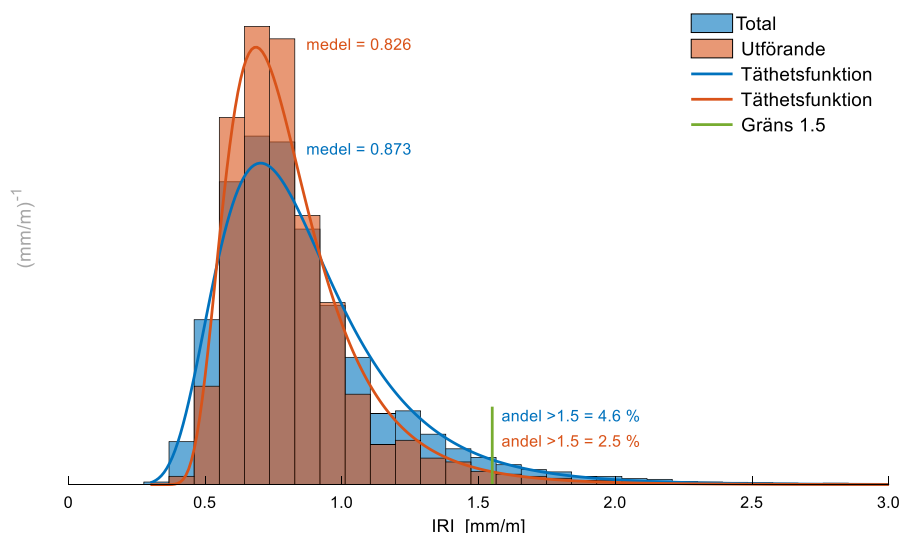


Figur 7. Medel av längsgående ojämnhet, IRI, för enskilda entreprenader som funktion av tid. Cirk-lar-nas storlek indikerar respektive entreprenads summerade körfältslängd.

För IRI summerat i Figur 7, kan samma slutsatser dras med undantaget att väglängdsviktade utförandeentreprenader har en svagt uppåtgående trend. Ojämnhetsökningen är måttlig och utan direkt praktisk betydelse och beror delvis på de ganska jämna och stora entreprenaderna 2007 som påverkar regressionen. I praktiken är det ingen skillnad vare sig över tid eller mellan entreprenadformer. Givet resultaten i Figur 6 och Figur 7 betraktar vi alla entreprenader inom respektive entreprenadform som tillhörande samma population och summerar alla mätningar utan tidskorrigering.

Figur 8 sammanfattar all mätt och nyproducerad yta avseende IRI. I figuren har även en typisk gräns på 1,5 mm/m lagts in som jämförelse. Gränser för IRI varierar

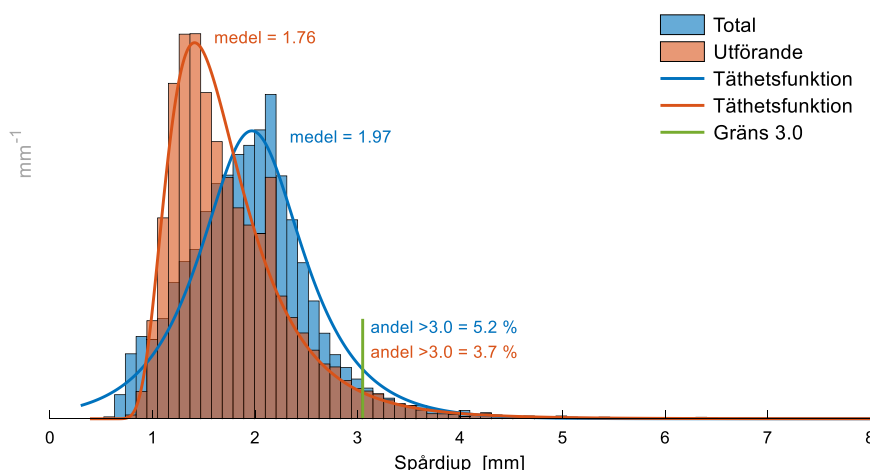
mellan entreprenader främst beroende på skyltad hastighet och trafikmängd (jämför Figur 6 i delrapport 1).



Figur 8. Jämförelse mellan total- och utförandeentreprenad avseende IRI vid trafiköppning (normaliserat histogram, $n_{total} = 29\,984$; $n_{utförande} = 26\,989$).

Utförandeentreprenaderna har i detta underlag varit något jämnare i längsled, i genomsnitt 0,05 mm/m lägre värde vid trafiköppning. Även andelar överskridande gränsvärden, i figuren 1,5 mm, är lägre för utförandeentreprenader: 2,5 % jämfört med 4,6 % för totalentreprenader.

Figur 9 sammanfattar på motsvarande sätt all uppmätt vägyta för spår djup delat per entreprenadform.



Figur 9. Jämförelse mellan total- och utförandeentreprenad avseende spår djup vid trafiköppning (normaliserat histogram, $n_{total} = 29\,889$; $n_{utförande} = 27\,021$).

För spårdjup är möjligen skillnaden något större till utförandeentreprenadens fördel. Framförallt har fördelningen ett något annat utseende jämfört med de övriga tämligen log-normalliknande täthetsfunktionerna: medelvärdet för totalentreprenaderna är förskjutet mot högre spårdjupsvärden men överskridande värden (högersvansen) faller något snabbare. Likväl är andelen över det närmast allennärådande nybyggnadsgränsvärdet 3,0 mm (oavsett entreprenadform) något högre för totalentreprenaden.

Fördelningarna i Figur 8 och Figur 9 kan användas för att beräkna den monetära risken vid trafiköppning uttryckt som avdrag (SEK) per km körfält för respektive jämnhetsmått. Avdragen baseras på Trafikverkets regler för avdrag (TDOK, 2017b). Tabell 2 sammanfattar avdrag för några typfall beräknade på 2 sätt: dels för samtliga mätningar dels som medelvärdet för avdrag summerat per enskild entreprenad.

Tabell 2. Genomsnittligt avdrag per km körfält vid trafiköppning för resp. entreprenadform. Kravgräns IRI = 1,5 mm/m; Spår_{2,6 m} = 3,0 mm

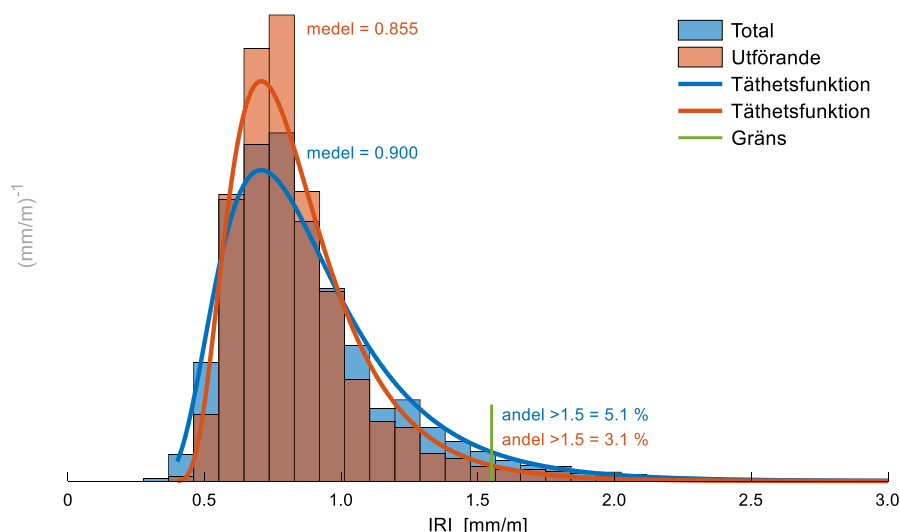
Entreprenadform	IRI [SEK/km]	Spår _{2,6 m} [SEK/km]	Σ [SEK/km]
Samtliga 20 m-mätningar			
Total	4 600	5 100	9 700
Utförande	2 500	3 700	6 200
Summerat per entreprenad			
Total	5 000	6 600	11 500
Utförande	3 100	5 500	8 600

I det 1:a fallet med samtliga mätningar är skillnaden mellan entreprenadtypernas medelvärden signifikant (*t*-test och icke-parametrisk Mann-Whitney *U*). Det bör noteras att signifikansen till stor del beror på det stora antalet mätningar och därmed stort antal frihetsgrader i den statistiska analysen, vilket ger möjlighet att urskilja mycket små skillnader. För den andra jämförelsen, avdrag summerade per entreprenad och sedan beräknat medelvärde för respektive entreprenadtyp, finns det ingen statistisk signifikant skillnad: skillnader kan bero på slumpfel (*t*-test och icke-parametrisk Mann-Whitney *U*). Kravgränsen för IRI, 1,5 mm/m, är givet som ett typiskt exempel medan gränsen för spårdjup (3,0 mm) närmast är generell för nybyggd vägyta. Spridningen mellan entreprenader är avsevärd och snarlik inom respektive entreprenadform: summa avdrag från 0 SEK/km till dryga 50 000 SEK/km. Monetära risker behandlas mer utförligt i avsnitt 4 *Risker vid trafiköppning*.

3.3. SAMPLADE FÖRDELNINGAR: 20 M

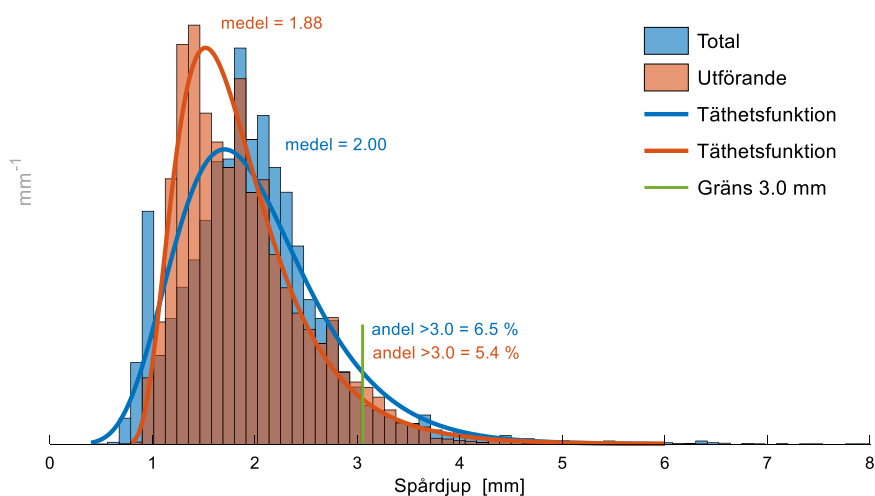
I föregående avsnitt summerades all uppmätt vägyta inom respektive kategori. Då skillnaden i körfältslängden är tämligen stor mellan olika entreprenader, ungefär en faktor 10 inom respektive entreprenadform, från ca 8 km till ca 90 km

(se Tabell 1), och det är tydliga skillnader mellan somliga entreprenader (se t.ex. Figur 17), görs även en sammanställning där varje enskild entreprenad ges samma vikt. Från varje entreprenads objektmätning tas 300 slumpmässiga stickprov och sammanställs per entreprenadform. För att minska skillnaden mellan olika slumpmässiga stickprovningar summeras sammanlagt 5 slumpmässiga provningsomgångar (d.v.s. 5×300). Figur 10 sammanfattar resultat för IRI med den typiska kravgränsen 1,5 mm/m för jämförelse och Figur 11 visar spårdjup med gränsen 3,0 mm.



Figur 10. Stickprovad jämförelse mellan total- och utförandeentreprenad avseende IRI vid trafiköppning (normaliserat histogram och täthetsfunktion).

Skillnaden mellan samtliga mätningar och stickprovade mätningar är tämligen liten, något högre värden för stickprovade för både medelvärden och överskridande andelar.



Figur 11. Samplad jämförelse mellan total- och utförandeentreprenad avseende spårdjup vid trafiköppning (normaliserat histogram och täthetsfunktion).

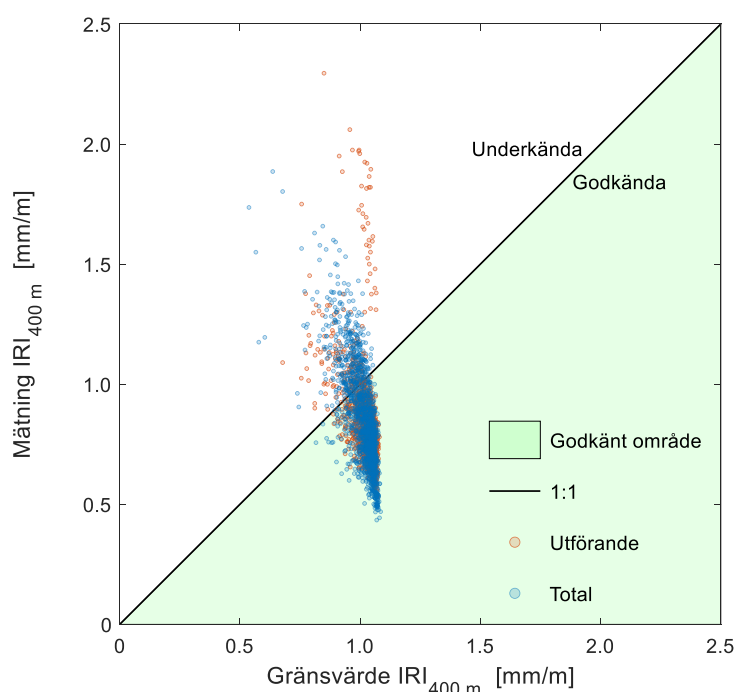
Inte heller för spår djup är skillnaden gentemot samtliga mätningar (se Figur 9) särskilt stor. För spår djup har dock skillnaden mellan entreprenadformer blivit mindre och täthetsfunktionen för totalentreprenader något mer lognormalformad.

3.4. SAMTLIGA MÄTNINGAR: 400 M

För båda entreprenadformerna ställs normalt även krav på 400 m-sträckor: medelvärde och standardavvikelse för IRI och medelvärde för spår djup. Standardavvikelse för IRI och medelvärde för spår djup är enkla konstanta gränsvärden medan medelvärde för $IRI_{400\text{ m}}$ är en funktion av standardavvikelsen för varje enskild 400 m-sträcka, vilket medför att kravvärdet varierar och därmed inte går att sammanfatta i ett fördelningsdiagram med konstant mätvärde. Kravgränsen varierar också mellan entreprenader baserat på hastighet och trafikmängd. Som jämförelsebas har därför den vanligaste vägtypen i kategorin totalentreprenader valts: 100 km/h och ÅDT större än 4000 fordon/dygn. För dessa bestäms kravgränsen för 400 m-sträckor enligt:

$$\bar{x} \leq 1,1 - 0,4s \quad 1$$

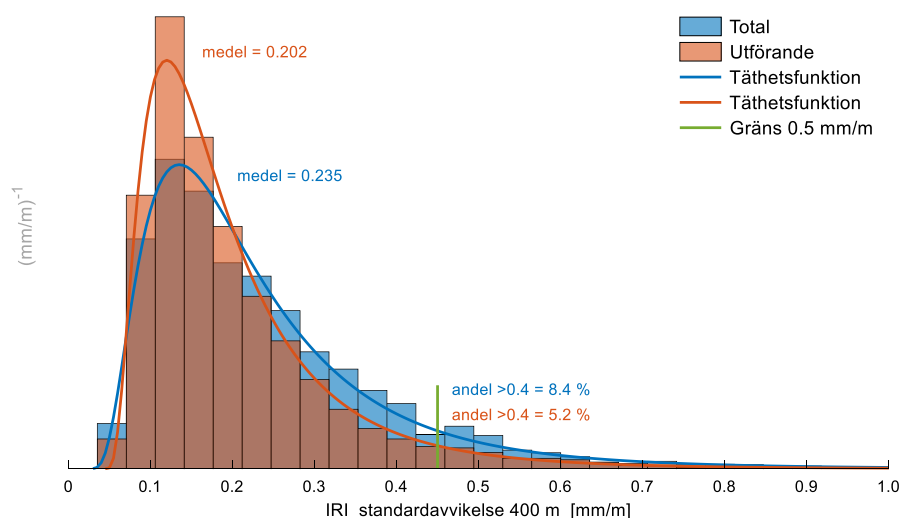
där $\bar{x}$ är medelvärde för 20 på varandra följande 20 m-sträckor och s är standardavvikelsen. Figur 12 sammanfattar samtliga 400 m-medelvärden i undersökningen som funktion av beräknat gränsvärde enligt ekvation 1: för varje 400 m-sträcka beräknas uppmätt medelvärde och motsvarande beräknade gränsvärde.



Figur 12. Jämförelse mellan total- och utförandeentreprenad avseende krav på medelvärde 400 m ($\bar{x}$) vid trafiköppning: uppmätt medelvärde som funktion av gränsvärde för enskilda 400 m-sträckor (ekvation 1).

Resultat i den nedre högra (grönmarkerade) triangeln är godkända och resultat som hamnar ovanför 1:1-linjen är underkända d.v.s. mätvärdet är större än gränsvärdet. Jämförelsekravgränsen ger en relativt stor del andel underkända sträckor: 21 % för total- och 13 % för utförandeentreprenader. Skillnaden är statistiskt signifikant till utförandeentreprenadens fördel (*t*-test och icke-parametrisk Mann-Whitney *U*).

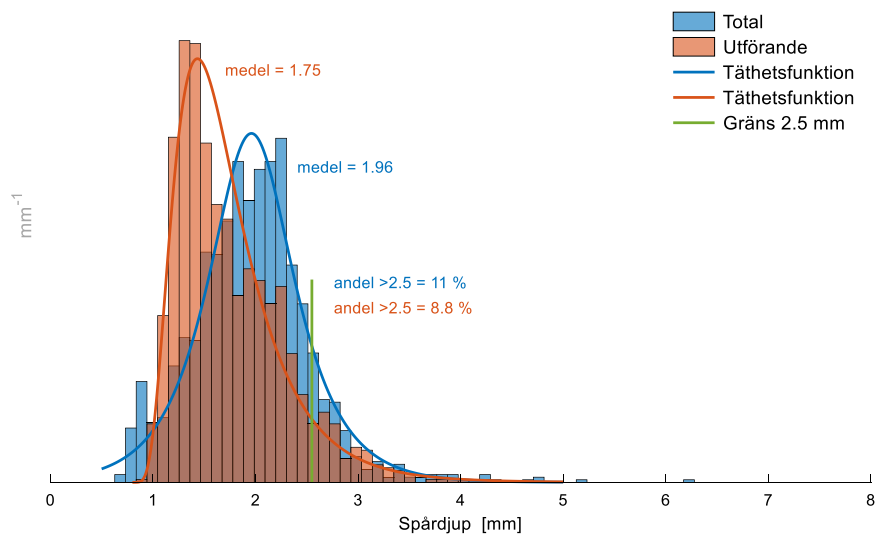
Avseende IRI ställs det även krav på 400 m-sträckornas standardavvikelse. Figur 13 sammanfattar samtliga mätta 400 m-sträckor delade efter entreprenadform. Kravvärden sammanfattade i rapport 1 varierade mellan 0,3–0,7 mm/m och som jämförelse är gränsvärdet 0,4 mm/m inlagt i figuren i enlighet med jämförelsen ovan (100 km/h; ÅDT $\geq$ 4000 fordon/dygn).



Figur 13. Jämförelse mellan total- och utförandeentreprenad avseende standardavvikelse för IRI över 400 m vid trafiköppning (normaliserat histogram).

Totalentreprenaderna har i genomsnitt något högre standardavvikelse och även andel överskridande jämförelsegränsvärdet.

Kravgränsen för medelvärdet över 400 m för spårdjup är typiskt 2,5 mm som är inlagd i Figur 14 tillsammans med fördelningar av samtliga mätningar delade efter entreprenadform.



Figur 14. Jämförelse mellan total- och utförandeentreprenad avseende medel-spår djup över 400 m vid trafiköppning (normaliserat histogram och täthetsfunktion).

Resultatet för medelvärde är som förväntat likt det för 20 m-värden men då kravgränsen är något lägre medför det högre andel underkända.

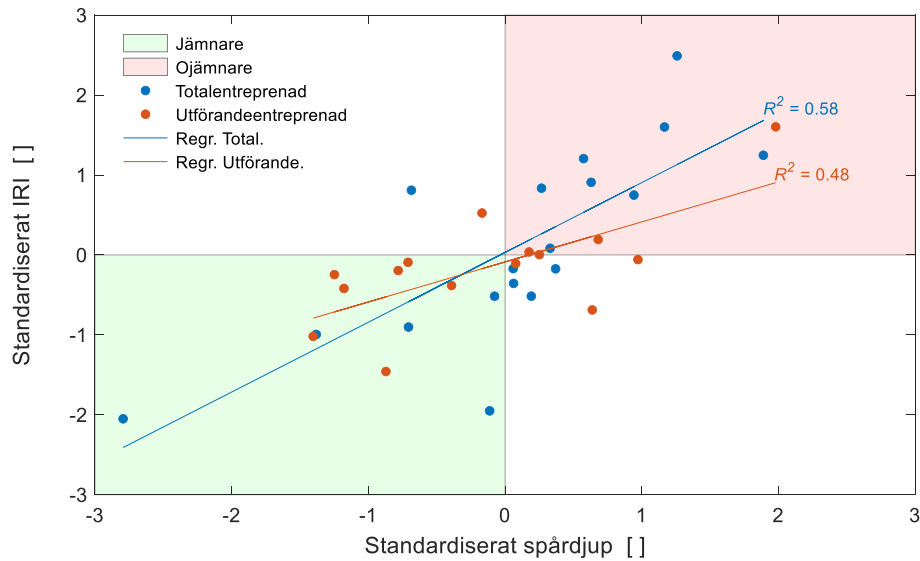
Då antalet 400 m-sträckor är mycket färre än 20 m-sträckor, genomförs ingen samplad jämförelse.

3.5. JÄMNHETSINDEX

Vägars jämnhet karaktäriseras som nämnts främst genom IRI och spår djup. För att kunna sammanfatta och jämföra olika vägars generella jämnhet definieras ett sammanvägt jämnhetsindex som summan av standardiserade ojämnheter. Standardiseringen innebär att uppmätta jämnhetsmått transformeras till jämförbar och samma skala med medelvärdet 0 och standardavvikelsen 1. För detta beräknar vi s.k. z-score enligt:

$$z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{s} \quad 2$$

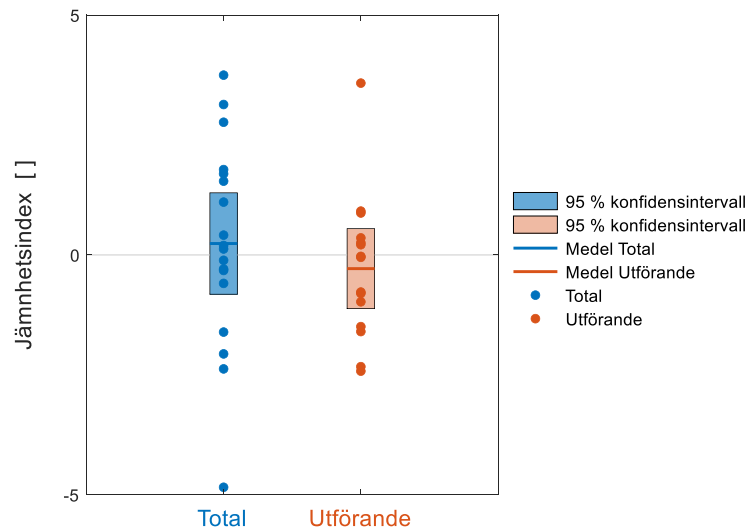
där z_i är standardiserad parameter för den enskilda vägen, x_i är logaritmen för uppmätt parameter, $\ln(x)$ för enskilda vägar, $\bar{x}$ och s är medelvärde och standardavvikelse för samtliga vägar (logariterade mätvärden). Beräknade z-score för alla vägar sammanfattas i Figur 15 för z_{IRI} visad som funktion av $z_{spår djup}$.



Figur 15. Standardiserat IRI som funktion av standardiserat spårdjup för respektive entreprenadkategori.

Standardiserade värden under 0 innebär att vägen är jämnare än genomsnittet och över följaktligen mer ojämn. Vägar i den nedre vänstra kvadranten i Figur 15 är jämnare än genomsnittet för båda jämnhetsmått och den övre högra mer ojämna. Generellt finns det samband mellan jämnhetsmått: en jämn väg är i snitt jämnare avseende både längs- och tvärgående jämnhet. Sambandet är måttligt starkt men de flesta entreprenaderna hamnar i någon av de färgade kvadraterna d.v.s. jämnheterna följs åt.

Genom att summera de standardiserade måtten erhålls ett kvalitetsmått för respektive entreprenad: jämnhetsindex (summan av standardiserat IRI och standardiserat spårdjup). Figur 16 sammanfattar jämnhetsindex för samtliga entreprenader delat efter entreprenadform.

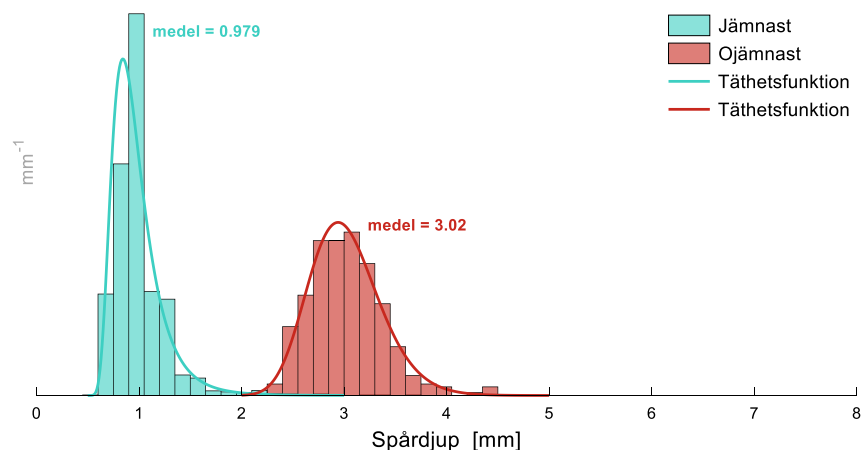


Figur 16. Sammanfattning av jämnhetsindex för individuella entreprenader: medelvärden och 95 % konfidensintervall för medelvärden för resp. entreprenadform.

Det är tydligt i Figur 16 att det inte finns någon signifikant skillnad mellan entreprenadformer givet den närmast obetydliga skillnaden i medelvärden och överlappande konfidensintervall. Variationen inom gruppen totalentreprenader är större än för utförandeentreprenader: både den jämnaste (<0) och minst jämna (>0) vägen återfinns inom totalentreprenaderna. Det finns dock ingen statistiskt säkerställd skillnad i varians mellan de 2 grupperna (F -test).

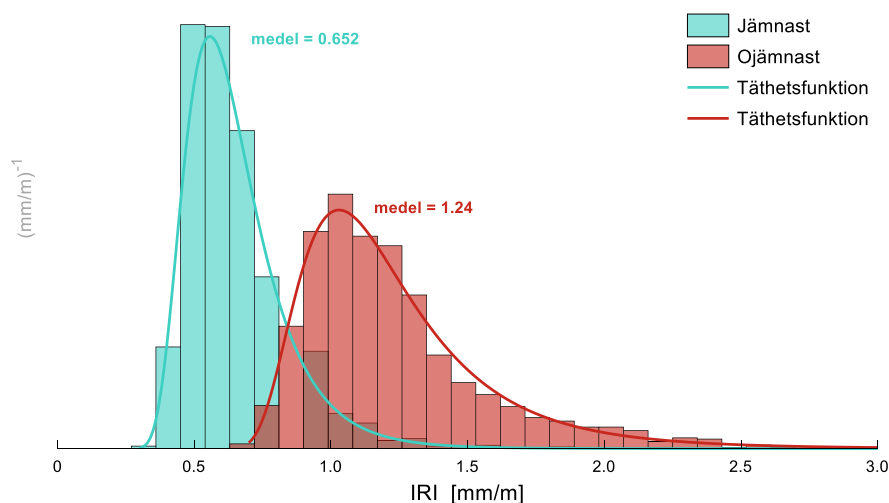
3.6. BÄSTA VS SÄMSTA

I föregående avsnitt noterade vi att den jämnaste och ojämnnaste vägen båda återfinns bland totalentreprenaderna. För den jämnaste vägen är det tydligt att jämnheten längs- och tvärs är korrelerade då den är jämnast för båda måtten. Som ojämnnast exempel är det dock olika entreprenader för IRI och spårdjup. Spårdjupsmätningar för bästa och sämsta vägen sammanfattas i Figur 17 och IRI i Figur 18.



Figur 17. Jämförelse mellan bästa och sämsta avseende spår djup (2,6 m) vid trafiköppning (normaliserat histogram och täthetsfunktion).

För spår djup är det 2 distinkt skilda populationer. De bästa delarna av den ojämna vägen är sämre än de sämsta delarna för den jämna vägen. Skillnaden är helt produktionsrelaterad där man i det ena fallet förmodligen haft kunskap om och varit uppmärksam på, vikten av låga initiala spår djup, i kombination med god produktionsstyrning, t.ex. screedinställning och beläggningsskarvar.



Figur 18. Jämförelse mellan bästa och sämsta avseende IRI vid trafiköppning (normaliserat histogram och täthetsfunktion).

För IRI, i Figur 18, är det större grad av överlapp mellan bästa och sämsta men fortfarande klart skilda. Längsgående jämnhet är mer känsligt för hur beläggningsarbetet framdrivs, i långa etapper eller i mer splittrade smådelar samt om specialutrustning använts vid läggningen. Detta vet vi dock inget om. För många av de nybyggnationer som studeras i denna undersökning finns i alla fall möjligheten att planera för längre beläggningsetapper. Huruvida det sedan är möjligt, eller utnyttjas, i enskilda projekt är okänt.

Sammantaget visar jämförelsen mellan bästa och sämsta väg att det, i många fall, finns potential att med noggrant utförande bygga jämnare vägar. Det finns ingen tydlig yttre orsak, annat än noggrannhet, till att de olika nybyggda vägarna egentligen skall skilja vad avser jämnhet.

4. RISKER VID TRAFIKÖPPNING

Riskhantering är ett vittomfattande begrepp men omfattar generellt systematiska processer för att identifiera, bedöma och prioritera risker förenade med den verksamhet som bedrivs. Litteraturstudien i delrapport 1 går igenom risker i vägbyggnadsprojekt. I detta avsnitt genomförs en riskbedömning (riskanalys) avseende den huvudsakliga tekniska risken för totalentreprenader, vägens jämnhet. Huvuddragen i riskbedömningen, såsom vi definierar den, är:

- identifiera riskkällan
- beräkna sannolikheter
- bestämma konsekvenser
- beräkna risker
- (förebyggande åtgärder)

De primära riskkällorna är identifierade i delrapport 1 och är spårdjup och IRI. Tidigare avsnitt sammanfattade faktiska mätningar av vägens jämnhet vid trafiköppning. För att kunna prediktera risker behöver vi uttrycka dessa mätningar i statistiska funktioner eller modeller. Rörande konsekvenser av kravöverträdelser vid trafiköppning, är det i tidiga totalentreprenader inte helt tydligt vari dessa består. För utförandeentreprenader och senare totalentreprenader, är Trafikverkets regler för avdrag (TDOK, 2017b) del av kontraktshandlingarna varför överträdelser avseende jämnhet direkt kan översättas till pengar. I denna rapport kommer konsekvensmodellen att bygga på Trafikverkets avdragsregler men baserat på predikterade sannolikheter skulle en kostnad motsvarande ombyggnation kunna beräknas. Slutligen definieras risk enligt den intuitiva ekvationen:

$$\text{riskkostnad} = \text{sannolikhet} \times \text{konsekvens} \quad 3$$

d.v.s. i genomsnitt är riskkostnaden en enkel funktion av sannolikheten och kostnaden vid utfall.

I avsnitten ovan redovisas en stor mängd empirisk data som kan användas för att passa statistiska modeller för att generalisera risker vid trafiköppning. Modellpassningen baseras på primärdata enligt avsnitt 3.3 (samplade fördelningar). En rad sannolikhetsfördelningar provades för att bestämma lämplig modell. Mätvärdesfördelningarna är i regel skeva åt höger samtidigt som vi är mest intresserade av fördelning långt ut i den högra svansen. Använd statistisk täthetsfunktion benämns ”generalized extreme value” och uttrycks enligt:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma} e^{-\left(1 + k \frac{x-\mu}{\sigma}\right)^{\frac{1}{k}}} \cdot \left(1 + k \frac{x-\mu}{\sigma}\right)^{-1 - \frac{1}{k}} \quad 4$$

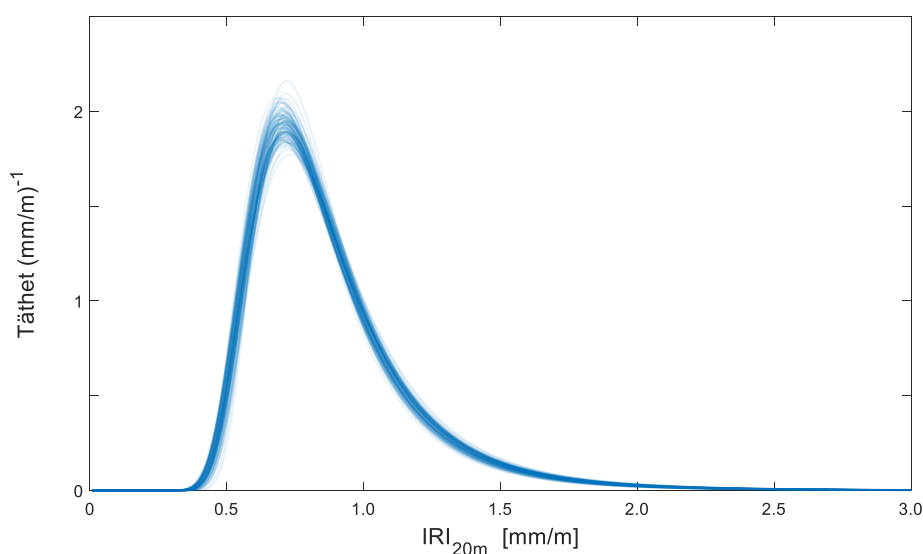
där k , μ och σ är koefficienter (form, läge och skala) som bestäms genom numerisk optimering. Beräkningar av jämnhetsindex visar att det inte finns några tydliga generella skillnader mellan entreprenadformer varför riskmodellerna baseras på samtliga entreprenader oaktat entreprenadform.

Idealt, om man har tillgång till stort antal undersökningsobjekt, utför man kalibrering (numerisk bestämning av k , μ och σ) på en del av datamängden som man sedan validerar (hur väl stämmer prediktioner) mot resterande datamängd, som alltså inte varit del av modellkalibreringen, för att bestämma prediktionsfelet. I detta fall är antalet vägar begränsat varför en s.k. korsvalidering genomförs enligt följande steg:

1. dela vägarna i 3 grupper (11 i varje grupp)
2. kalibrera modellparametrar (k , μ och σ) med grupp 1 och 2
prediktera värden och validera mot grupp 3
3. kalibrera modellparametrar med grupp 1 och 3
prediktera värden och validera mot grupp 2
4. kalibrera modellparametrar med grupp 2 och 3
prediktera värden och validera mot grupp 1.

Normalt är vi mest intresserade av att prediktera värden långt ut i högra svansen, typiskt hur stor andel som överstiger ett visst gränsvärde. Valideringen utförs genom att jämföra modellpredikterat värde på andel överstigande kravvärde, med faktiskt empiriskt utfall för valideringsdatagruppen. Detta utförs för ett antal typiska kravvärden. Varje korsvalidering (steg 1–4 enligt ovan) utförs 100 gånger med slumpvis delning av grupper i 1:a steget.

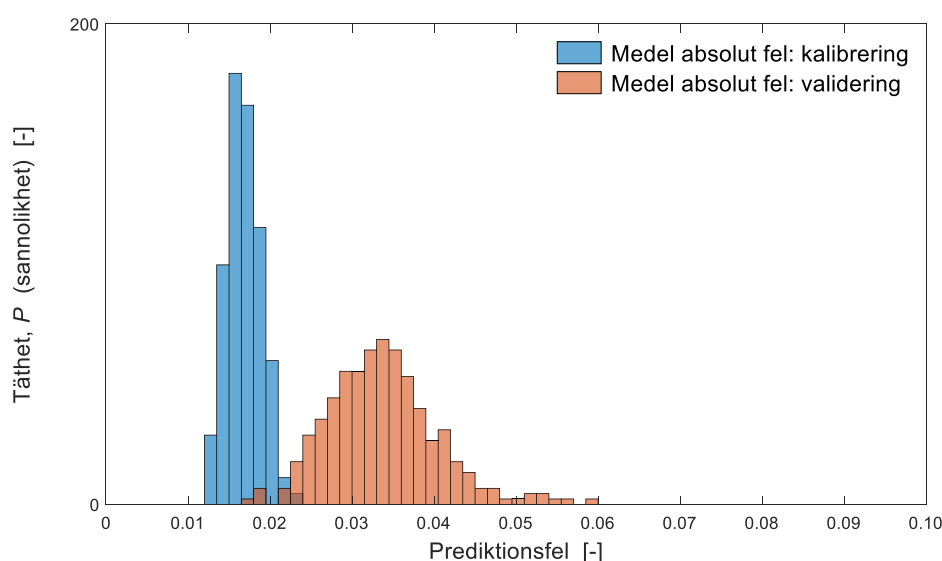
Som ett exempel på variation av de slumpmässiga modellkalibreringarna visar Figur 19 sammanlagt 100 olika slumpmässiga kalibreringar av täthetsfunktionen för IRI_{20m} .



Figur 19. Kalibrerade täthetsfunktioner för IRI_{20m} efter repeterad korsvalidering (100 st.).

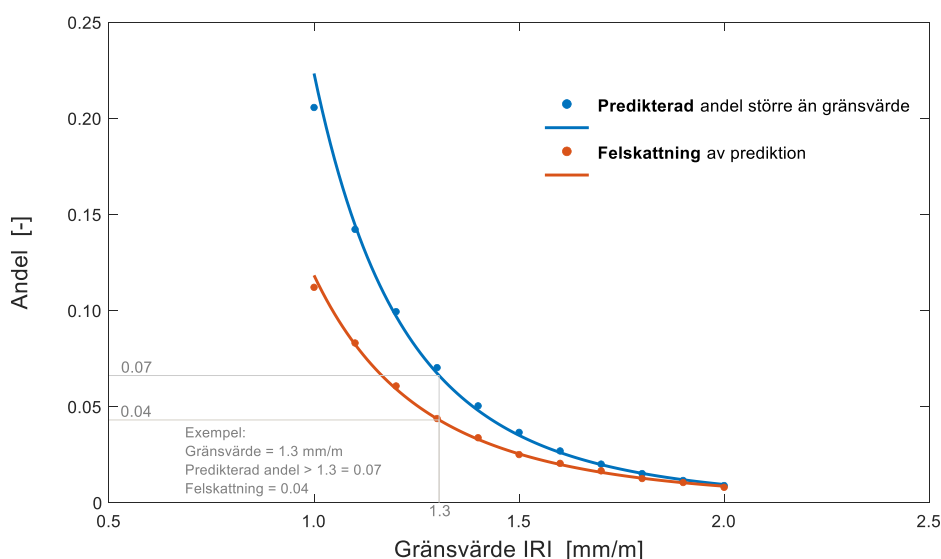
Varje enskild kurva i Figur 19 baseras på passning av 22 slumpmässigt valda vägar av de sammanlagt 33 i underlaget. Variationen är tämligen begränsad vilket betyder att modellkalibreringen inte är starkt beroende av hur delningen slumpmässigt råkat vara. Detsamma gäller bestämningen av de statistiska koefficienterna (k , σ och μ).

Som tidigare nämnts genomfördes 300 slumpmässiga korsvalideringar för att bestämma prediktionsfelet som typisk är större än felet i själva modellpassningen (regressionen). Skattningen av modellpassningsfelet baseras på hela kurvan och är minimerat för det specifika datasetet. I detta fall är det prediktioner ute i högra svansen på vägar som inte ingått i kalibreringsunderlaget som är av intresse. För att exemplifiera detta visar Figur 20 både absolutvärden av modellpassningsfelet (benämnt kalibrering) och prediktionsfelet för andelen överstigande 1,4 mm/m (IRI_{20m}) för valideringsgruppen.



Figur 20. Histogram för beräknade felskattningar av sannolikhetsprediktioner efter repeterade korsvalideringar andel av validering med IRI_{20m} större än 1,4 mm/m.

Notera att Figur 20 visar absolutbelopp för medelfel d.v.s. fel utan tecken. I själva verket förekommer både positiva och negativa fel. Medelfelet är i båda fallen nära 0 d.v.s. både modellpassningen och prediktionen är i genomsnitt rätt, utan bias (systematisk förskjutning). Det finns däremot en variation och det prediktionsfel som är av intresse är, som förväntat, större än det generella modellpassningsfelet som är kring 0,017 oberoende av nivå medan prediktionsfelet varierar med den kravnivå vi vill prediktera. Figur 21 visar predikterade värden och felskattningar som funktion av kravnivån för IRI.



Figur 21. Predikterad andel överstigande gränsvärde med felskattning som funktion av gränsvärde samt exempel för andel överstigande 1,3 mm/m med felskattning.

Exemplet illustrerat i Figur 21 visar en prediktion av andel mätvärden som överstiger 1,3 mm/m för nyproducerad yta: 7 % $\pm$ 4 % (0,07 $\pm$ 0,04), notera också att andelen ökar exponentiellt med högre krav (lägre gränsvärde).

Samma kalibrerings- och valideringsprocedur genomfördes för parametrarna Spår_{20m}, Spår_{400m} och standardavvikelse för IRI_{400m}. I samtliga fall är medelfelet kring 0 d.v.s. modellerna är utan systematiska fel (icke-biased) och prediktionsfelen för praktiskt intressanta jämförelser större än modellpassningsfelet. Dessa kalibreringar, med passade koefficienter, och prediktionsfelskattningar sammanfattas i Tabell 3. Notera att felskattningen inte är konstant utan en funktion av predikterat värde (pv).

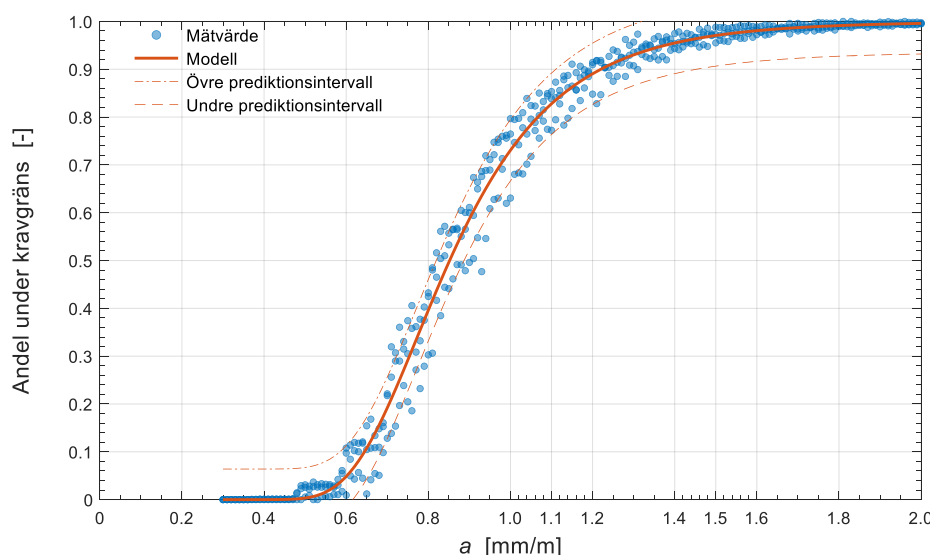
Tabell 3. Koefficienter till riskmodeller samt prediktionsfelskattningar (s = standardavvikelse; pv = predikterat värde)

Vägytemått	k	σ	μ	Felskattning
Spår _{20m}	0,0051	0,5310	1,635	$\sim 1 \times pv$
IRI _{20m}	0,1455	0,1932	0,7338	$\sim 0,6 \times pv$
Spår _{400m}	-0,0473	0,4715	1,614	$\sim 1,1 \times pv$
S (IRI _{400m})	0,3088	0,0723	0,1501	$\sim 0,6 \times pv$

För IRI-medelvärde över 400 m finns det inte entydiga konstanta gränser då kravgränsen (medelvärde) är en funktion av standardavvikelsen över samma 400 m enligt:

$$\overline{IRI}_{400m} \leq a - 0,4s \quad 5$$

där a varierar mellan 1,0 till 1,8 mm/m i genomgången av totalentreprenader redovisad i rapport 1, vilket är samma variation som tabelleras i TDOK (2017a). Ekvation 5 innebär att alla enskilda 400 m-sträcka har något olika medelvärdeskrav. Det går då inte att bestämma en riskmodell genom att bestämma täthetsfunktionen (enligt ovan) och direkt applicera en kravgräns. Vi kan då förfara på ett något annorlunda sätt genom att simulera ett antal kravgränser gentemot underlaget och bestämma andelen godkända 400 m-sträckor för varje kravgräns. Delen i ekvation 5 som beror av standardavvikelsen är samma för samtliga funna kravgränser både i totalentreprenadunderlaget och i TDOK (2017a): $0,4 \times s$. Andelen godkända kan då plottas som en funktion av a som är den faktor som varierar. Simuleringen utförs genom att, på samma sätt som tidigare, dela entreprenaderna i 3 grupper varefter kraven appliceras på grupp 1 och 2, sedan på 1 och 3, och slutligen 2 och 3. Variabeln a ökas stegvis från 0,3 till 2,1 mm/m i steg om 0,01 mm/m. Resultatet av denna godkänd/underkänd-simulering sammanfattas i Figur 22 där blå cirklar markerar resultatet av 540 simuleringar som en funktion av faktorn a : för att exemplifiera, vid $a = 1,0$ i Figur 22 har 400 m-medelvärdet jämförts med $1,0+0,4s$ och någonstans mellan 60–80 % av 400 m-medelvärden klarar denna nivå.



Figur 22. Andel 400 m-sträckor som klarar krav som funktion av faktorn a i ekvationen $a-0,4s$ (ekv. 4).

För varje nivå på a har 3 slumpvisa uttag ur datamängden gjorts varför resultat i Figur 22 även ger en bild av spridningen, eller bestämningsfelet. Figuren visar även en passning till riskmodellen som beskrivs av:

$$cdf = e^{-\left(1+k\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^{-1/k}} \quad 6$$

vilket är den kumulativa funktionen av tidigare använd fördelningsmodell enligt ekvation 3: cdf är den kumulativa fördelningsfunktionen ("cumulative distribution function") och k , x , μ och σ enligt tidigare definition. Denna funktion ($k = 0,0803$;

$\sigma = 0,1759$; $\mu = 0,7864$) visas i Figur 22 tillsammans med prediktionsintervall (95 % säkerhet).

Det 3:e steget i riskmodelleringen är att beräkna konsekvenserna enligt ekvation 3. Sannolikheterna ges av de statistiska funktioner som bestämts ovan och konsekvenser av överträdelser ges av Trafikverkets regelverk för avdrag vid besiktning (TDOK, 2017b)¹. Baserat på antagandet att inget fel anses så allvarligt att korrigerande åtgärds krävs och att ingen diskontering för kostnader som uppstår efter kontraktets ingående görs så kan riskkostnaden uttryckas som avdrag (SEK) per km körfält för respektive jämnhetsmått. Tabell 4 sammanfattar riskkostnader för några typiska krav.

Tabell 4. Genomsnittliga avdrag vid trafiköppning

Mätlängd [m]	Jämnhetsmått	Gränsvärde	Kostnad [SEK/km]
20	Spår _{2,6m}	3,0 mm	6 800
	IRI	1,5 mm/m	3 600
	Summa:		10 500
400	Spår _{2,6m}	2,5 mm	4 400
	IRI stdavv.	0,5 mm/m	1 460
	IRI	1,2-0,4s	3 300
	Summa:		7 700*

* IRI underkänns på standardavvikelse eller medelvärde: summan utgör medelvärde spår och IRI.

Notera att avdrag görs för antingen 20 m eller 400 m beroende vilket som ger högst utfall på varje 400 m-sträcka.

Angående den avslutande delen i riskbedömningen, korrigerande åtgärder, noteras i avsnitt 3.6 att det går att lägga asfaltbeläggning mycket jämnt med närmare 0 SEK/km i avdrag. Arbeten kräver noggrant utförande, rätt utrustning och kontinuerlig kontroll av resultatet, samt vetskap om betydelsen av jämnhet.

5. DISKUSSION

En begränsning i undersökningen som vi av praktiska skäl tvingats göra rör urvalet av entreprenader. Det har inte funnits en stor mängd entreprenader av olika typer att fritt kunna slumpa undersökningsobjekt ur. Alla entreprenader är inte heller lämpliga för generella studier då de kan vara särskilt unika i någon mening. Urvalet har skett efter objektens lämplighet och tillgång till kvalitetssäkrad primärdata. När det gäller lämplighet har väldigt korta vägar inte bedömts lämpliga och inte heller vägar med mycket trafikplatser, cirkulationsplatser eller konstbyggnader. Främst har tillgången på primärdata begränsat. För utförandeentreprenader har det t.ex. funnits fall där mätningar inte verkar ha utförts eller att de arkiverats på okänt sätt.

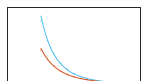
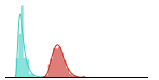


¹ 2 000 SEK per underkänt 20 m-värde eller 15 000 SEK per 400 m-värde.

Totalentreprenader mäts alltid men i vissa fall förefaller man på entreprenörssidan osäker på om man vill att mätresultaten ska tillgängliggöras. Historiskt har mätningar inom entreprenader varit av ringa allmänt värde då det främst varit materialspecifikationer. Detta gäller inte vägytemätningar som är direkt jämförbara mellan projekt. Denna osäkerhet gäller inte Trafikverket som direkt förmedlat mätningar i den mån de stått att finna. De mätningar som vi haft tillgång till har även kvalitetsbedömts. Emellanåt har vi inte kunnat bedöma i vilken grad av färdigställande vägen haft eller om trafikpåsläpp har skett kontinuerligt, vilket inte är ovanligt, och i så fall på vilka delar och hur länge har de trafikerats innan mätning. Sammantaget har detta lett till att det finns en relativ övervikt av NCC-entreprenader. Det finns dock inget starkt skäl till att tro att NCC i alla produktionsdelar systematiskt avviker från andra entreprenörer. Underlaget omfattar dock tämligen många entreprenader med geografisk och tidsmässig spridning som gett 2 liknande grupper: 18 totalentreprenader och 15 utförandeentreprenader. De många källorna och svårigheter vi noterat bidrar i sig till slumpmässighet.

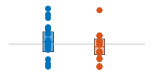
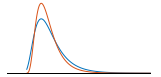
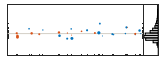
Avsnittet med *Bästa vs sämsta* visar att det går att bygga mycket jämna vägar. Detta dock på en nivå som inte är direkt funktionellt märkbar för trafikanter men kan påverka det ekonomiska utfallet i både total- och utförentreprenader såväl direkt vid slutbesiktning som senare genom att fördröja tiden till underhållsåtgärd. Det finns således ekonomiskt incitament att bygga jämna vägar och det är förmodligen varken teknisk eller organisatoriskt speciellt kostsamt: det kostar närmast ingenting att noggrant kontrollera screedinställningen. Trots dessa uppenbara fördelar syns ingen förbättring över tid som faktisk täcker hela tiden sedan totalentreprenaderna började användas i större omfattning i mitten av 00-talet. Även om det generellt är låga nivåer som inte påverkar funktionen borde det vara ekonomiskt rationellt att bygga jämnare vägar även om det då inte direkt är tekniskt motiverat ur trafikantperspektivet.

Spridningen mellan entreprenader vid trafiköppning medför att riskbedömningsmodellen för spår djup har ett prediktionsfel i nivå med prediktionen i sig. För IRI är felet mindre. Prediktionerna är i genomsnitt rätt då modellerna visar mycket små systematiska fel dock med viss osäkerhet. Det finns en generell svårighet med att prediktera värden långt ute i svansen d.v.s. prediktera mer ovanliga händelser.



Baserat på resultat erhållna i denna undersökning kan följande slutsatser dras:

- i genomsnitt är jämnheten oförändrad under perioden för undersökningen 2007–2017
- i hela datamängden är utförandeentreprenader marginellt jämnare än totalentreprenader
- jämförelse på entreprenadbasis visar ingen skillnad mellan entreprenadformer varken för medelvärden eller inomgruppsvarianser
- mätningar för enskilda vägar visar att det är möjligt att bygga mycket jämna vägar närmast utan kravöverträdelser.



I tillägg till detta har riskbedömningsmodeller för de vanligaste jämnhetsmåten bestämts.

REFERENSER

TDOK. 2014a. *Vägytemätning Objekt*. Trafikverket TDOK 2014:0005.

TDOK. 2014b. *Vägytemätning Mätstorheter*. Trafikverket TDOK 2014:0003.

TDOK. 2017a. *Krav. Bitumenbundna lager*. Trafikverket TDOK 2013:0529 version 3.

TDOK. 2017b. *Trafikverkets regler för reglering av beläggningsarbeten*. Trafikverket TDOK 2014:0565 version 3.