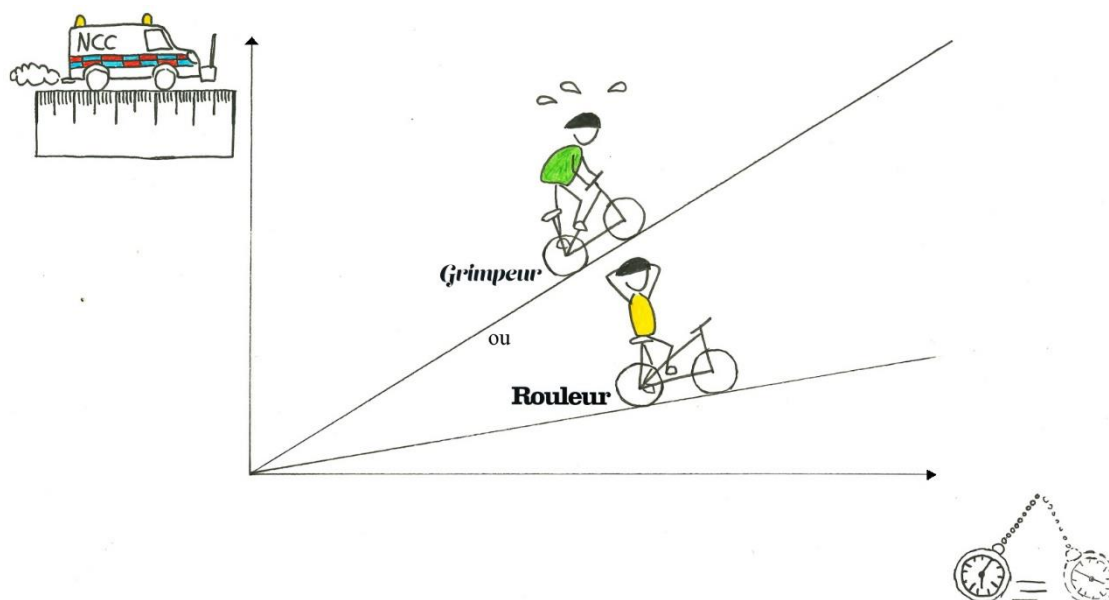


# Entreprenadform och teknisk kvalitet i vägprojekt 3: Jämnhet under garantitid



Jonas Ekblad  
Robert Lundström

NCC Industry rapport januari 2022  
BVFF 6084  
SBUF 13966

## Förord

Denna rapportering utgör den 3:e, och avslutande, i serien kring *Entreprenadform och teknisk kvalitet i vägprojekt*:

*1: Kontraktsförutsättningar, krav och rekommendationer*

*2: Vägytans jämnhet vid trafiköppning*

och nu

*3: Jämnhet under garantitid*

Rapporterna är delvis fristående men kan med fördel läsas i ett sammanhang.

Arbetet har huvudsakligen bedrivits som ett forskningsprojekt inom ramen för våra anställningar vid KTH Kungliga Tekniska Högskolan men, främst i slutskedet, även vid NCC. Trafikverket genom branschprogrammet Bana väg för framtiden (BVFF), Svenska Byggbranschens utvecklingsfond (SBUF) och NCC Industry har i lika delar finansierat, för vilket vi är tacksamma.

Och återigen tackas Marit Boman för framsidans illustration.

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

## Sammanfattning

Detta är 3:e och avslutande delen i projektet kring entreprenadformens inverkan på nybyggda vägars tekniska kvalitet. Rapporten tar vid där delrapport 2 slutade (trafiköppning) och behandlar vägens jämnhet under garantitid eller brukande.

Vägarnas tekniska kvalitet bedöms efter vägytans jämnhet, spårdjup och IRI (International Roughness Index). Undersökningen omfattar sammanlagt 34 entreprenader (19 total- och 15 utförandentreprenader) färdigställda mellan 2007–2017. I projektet har ett stort antal riktade vägytemätningar gjorts, vilka utgör det huvudsakliga dataunderlaget som även kompletterats med Trafikverkets vägnätsmätningar redovisade i pmsv3.

Den huvudsakliga slutsatsen är att avseende vägars jämnhet under brukande så går det inte att se någon direkt skillnad mellan total- och utförandentreprenader för varken IRI eller spårdjup; det är stor skillnad i spårbildning mellan olika entreprenader oavsett entreprenadform trots nominell dimensionering och kontrollerat byggande. Allmänt varierar de statistiska egenskaperna tämligen mycket mellan entreprenader. Baserat på mätningarna bestämdes en riskbedömningsmodell för spårdjup baserad på prediktioner av medelvärde.

# INNEHÅLL

1. INLEDNING.....	5
2. UNDERLAG OCH METODER.....	5
2.1.    UNDERSÖKTA ENTREPRENADER .....	5
2.2.    VÄGYTEMÄTNING AV GEOMETRISK JÄMNHET.....	8
2.3.    STATISTISK ANALYS .....	8
3. RESULTAT .....	9
3.1.    KRAVSTÄLLNING .....	9
3.2.    JÄMNHET I K2.....	10
3.3.    JÄMNHET I K1.....	13
3.4.    JÄMNHET JÄMFÖRT MED KRAV .....	19
3.5.    MÄTVÄRDESFÖRDELNINGAR .....	22
4. RISKER UNDER GARANTITID .....	29
5. DISKUSSION .....	32
REFERENSER .....	35

## 1. INLEDNING

Detta utgör 3:e och avslutande rapporten kring eventuella skillnader i teknisk kvalitet för vägar utförda under olika kontraktstyper, utförande- jämfört med totalentreprenader. Jämförelser baseras på mätningar av vägytans jämnhet, främst spårdjup och IRI, vilka är direkt kvantitativt och kvalitativt jämförbara mellan enskilda vägar och i förlängningen skilda entreprenadformer.

Den första rapporten redogjorde bakgrund för olika entreprenadformer och undersökte skillnader och likheter mellan entreprenadformerna avseende kontraktsinnehåll i vägentreprenader: vad som avtalas och hur. Delrapport 2 jämförde sedan vägnarnas jämnhet vid trafiköppning och utvecklade en riskbedömningsmodell rörande vägytans jämnhet i samband med färdigbyggd väg.

Denna rapport sammanställer och analyserar vägytans utveckling under brukande, d.v.s. under garantitid för totalentreprenader, och jämför med snarlika utförandeentreprenader. I projektet har ett stort antal riktade vägytemätningar gjorts, vilka utgör det huvudsakliga dataunderlaget. Underlaget har även kompletterats med Trafikverkets vägnätsmätningar redovisade i pmsv3-information om belagda vägar<sup>1</sup>.

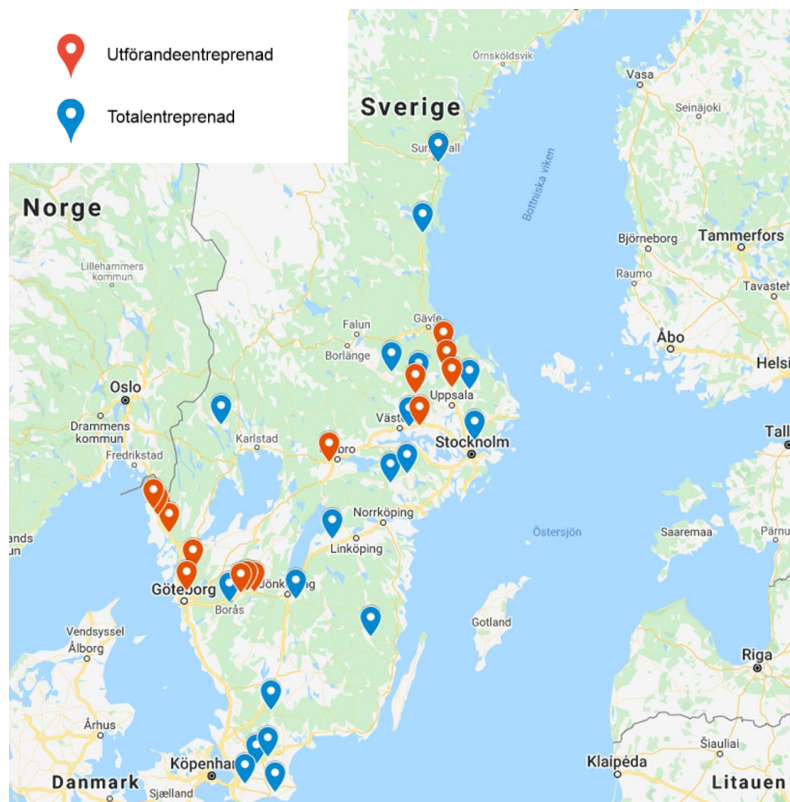
## 2. UNDERLAG OCH METODER

### 2.1. UNDERSÖKTA ENTREPRENADER

Det är huvudsakligen samma entreprenader som utgjorde underlaget i delrapport 2 (trafiköppning) som följts under garantitid och analyseras i denna rapport; 1 totalentreprenad har tillkommit då vi inte hade tillgång till trafiköppningsdata för denna men har nu mätningar under garantitid. Dessa 34 entreprenader (19 total- och 15 utförandeentreprenader) visas på kartan i Figur 1. Entreprenader som omfattas valdes 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. Underlaget i form av entreprenader har inte varit så stort att det gått, på något rimligt sätt, göra slumpmässiga urval, utan styrts av datatillgänglighet.

---

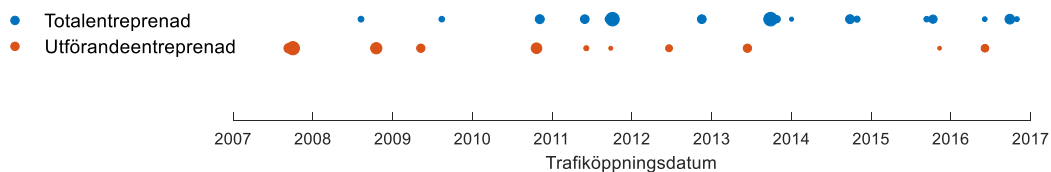
<sup>1</sup> <https://pmsv3.trafikverket.se/>



Figur 1. Karta över undersökta entreprenader delade efter kategori.

Det är tydligt att de undersökta entreprenaderna huvudsakligen finns i södra Sverige, totalentreprenaderna i ett band från Skåne till Stockholmsregionen (några upp till och med Sundsvall) och utförandeentreprenaderna mellan Göteborg och Stockholm. Under studerad period har totalentreprenader i de mellersta och norra delarna av Sverige varit ovanliga.

Entreprenaderna är relativt jämnt fördelade över tid där den första trafiköppnades 2007 och den sista år 2017. Figur 2 sammanfattar trafiköppningstidpunkt för undersökta entreprenader.



Figur 2. Tidslinje för färdigställande. Cirklarnas storlek indikerar respektive entreprenads summerade körfältlängd.

Enskilda entreprenader skiljer sig åt vad gäller förutsättningar som lokalisering, körfältindelning (2, 3 eller 4 körfält) och längd men de två huvudkategorierna täcker var för sig jämförbara grupper. Tabell 1 sammanfattar statistik avseende

sammanlagda körfältslängder för respektive entreprenadtyp. Sammanlagd körfältslängd är summa längd för båda riktningarna.

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

Entreprenadtyp	Antal	Körfält	Körfältslängd [km]			
			summa	medel	max.	min.
<b>Total</b>	19	K1	449	24	55	7
		K2	232	15*	45	4
<b>Utförande</b>	15	K1	273	18	44	4
		K2	267	18	44	1
		<b>Summa:</b>	1 222			

\*av de vägar som har K2

Man kan även se i tabellen att det endast är mindre skillnader mellan grupperna vad gäller medel-, max- och minimilängder och att båda typerna omfattar överlappande inomgruppsvariationer.

I detta skede av analysen, brukandet, är även trafiken, mängd och typ, avgörande. Tabell 2 sammanfattar gruppmedelvärden avseende trafik och geografisk placering för de 2 olika entreprenadtyperna. I analysen behöver vi ett måttetal för dubbdäcksanvändning. Det finns skattningar och mätningar av andelar dubbade fordon men det är inte helt trivialt att översätta dessa till variabler för enskilda vägar. Därför väljer vi latitud, eller nordlighet som ersättningsvariabel (proxy) för skattning av dubbdäcksanvändning.

*Tabell 2. Gruppmedelvärden för resp. entreprenadtyp*

Entreprenadtyp	Trafik, ÅDT [Fordon/dygn]	Hastighet [km/h]	Andel tung [%]	Latitud [°]
Total	4 700	99	16	58,5
Utförande	7 200	107	17	58,9

Även för dessa värden är inomgruppsvariationerna delvisa överlappande. Överlag har dock utförandeentreprenaderna något högre trafikmängder. Entreprenadspecifika trafikdata används sedan i utvärderingsmodellen för att hantera gruppskillnader (se avsnitt 2.3).

Underlaget omfattar vägtyperna vanlig 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 har för de riktade mätningarna mätts med vägytemätningsbil enligt Trafikverkets metodbeskrivning för objektsmätningar tillsammans med beskrivningen av mätstorheter. Dessa objektspecifika mätningar har även kompletteras med datauttag från Trafikverkets databas (pmsv3) där mätningarna utförts enligt metodbeskrivning för vägnätsmätning. Metoderna för vägytemätningen har förändrats något under perioden 2007–2019. 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 beskrivs mer detaljerat i rapport 2.

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 mätbredden 2,6 m 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. Eftersom studien avser jämföra teknisk kvalitet beroende på entreprenadform så likartat som möjligt baseras all vidare jämförelse avseende spårdjup på mätbredden 2,6 m.

## 2.3. STATISTISK ANALYS

För jämförelser är vi främst intresserade av jämnhetens förändringstakt uttryckt som årlig förändring. Grundmodellen för förändringstakt är linjär regression av uppmätt jämnhet som funktion av trafikdagar. Lutningen uttrycks sedan som årlig förändring.

Den egentliga analysen baseras sedan på förändringstakten ( $y$ ) som funktion av trafikvariabler och entreprenadtyp enligt:

$$y = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{adt}_{\text{tot}} + \beta_2 \cdot f_{\text{tung}} + \beta_3 \cdot v + \beta_4 \cdot \text{lat} + \beta_5 \cdot k + \epsilon$$

ekv. (1)

där  $\text{adt}_{\text{tot}}$  är medeldygnstrafik,  $f_{\text{tung}}$  är andel tung trafik,  $v$  är hastighet,  $\text{lat}$  är latitud och, slutligen,  $k$  är entreprenadtyp (0/1). Koefficienterna  $\beta_0$ – $\beta_5$  bestäms genom linjär regression och  $\epsilon$  är slumpfel. Eventuella gruppskillnader (Tabell 2) kontrolleras enligt modellen varefter huvudeffekter och i några fall interaktioner, analyseras.



Senare i resultatdelen analyserar vi spårdjupets rumsliga fördelning och beskriver en riskmodell. Beräkningsmodeller och detaljer kring detta ges tillsammans med resultaten.

### **3. RESULTAT**

I trafiköppningsskedet (rapport 2) bestod primärdatat av mätningar utförda av NCC Industry, Rambøll, Sweco (och Vectura) samt VTI (Statens väg- och transportforskningsinstitut). I bruksskedet är det huvudsakligen mätningar utförda med NCC:s vägytemätbil som utgör primärdata: sammanlagt 154 riktade mätningar. Som komplettering och jämförelse har även mätningar redovisade i Trafikverkets pmsv3 synkroniserats med de riktade mätningarna och sammanställts. Vägnätsmätningarna har då kvalitetsgranskats mot de riktade mätningarna avseende lokalisering och databortfall.

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

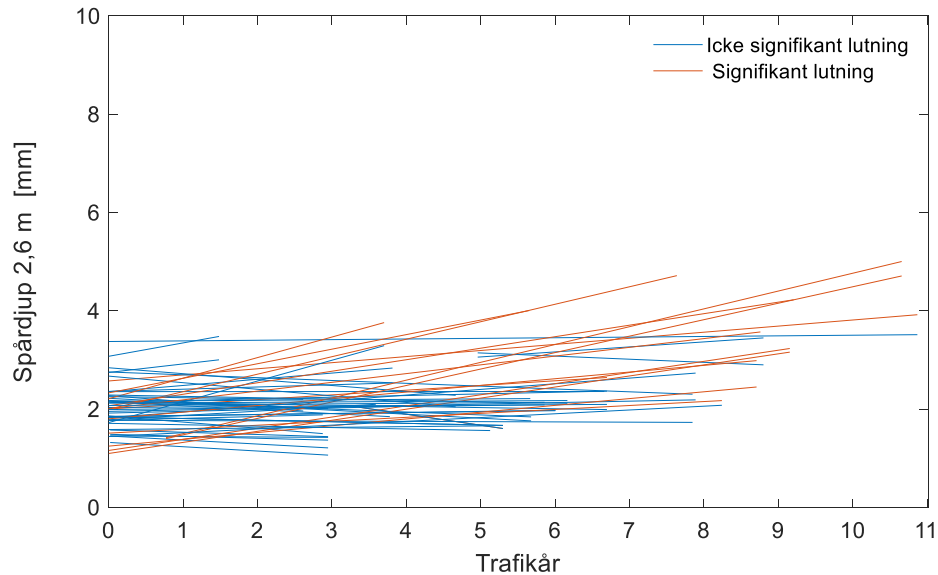
#### **3.1. KRAVSTÄLLNING**

I totalentreprenader ställs explicit krav på vägytans jämnhet under garantiperioden. Det är en av grundpelarna i kontraktsformen såsom den används av Trafikverket. Kravställningen vid trafiköppning och under garantitid sammanställdes i rapport 1. I den rapporten analyserade även trafiköppningskraven och jämfördes mellan entreprenadformer. En sådan jämförelse låter sig inte göras i bruksskedet då det inte finns explicita krav för utförandeentreprenader. Det är även svårare att generalisera då jämnhetskraven är mer anpassade efter vägens användning som t.ex. trafikmängd, viktighet, hastighet och geografi. Trafiköppningskrav är mer likartade både mellan vägar och entreprenadtyper.

Även om nivåerna mellan totalentreprenader varierar efter den enskilda vägens omständigheter kan man konstatera att grundmodellerna varierar på samma sätt som krav vid trafiköppning. I de flesta undersökta entreprenader ställs någon form av percentilkrav i kombination med ett absolut övre gränsvärde (maxkrav). Det vanligaste percentilkravet är att 90 % av 20 m-sträckor skall vara under givet värde men även 80 % och 95 % har använts (för spårdjup). Det förekommer också att kravet avser hela sträckningens medelvärde. Det ställs även i regel krav på 400 m-värden. I tidigare entreprenader fanns det ibland krav på maximal spårdjupsutveckling, ofta 1 mm/år. Bestämningen och uppföljningen av kravet var något diffust beskrivet och det verkar som det i stort inte länge används. En försiktig observation är att det förefaller som att det blir vanligare att, i någon mening, renodla kravställningen till att bara ange ett maximalt värde.

### 3.2. JÄMNHET I K2

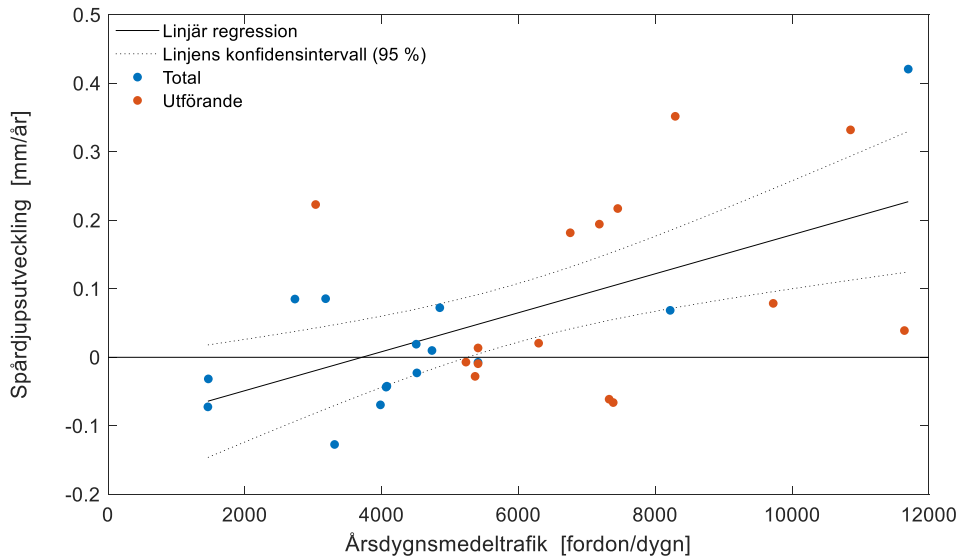
Redovisningen börjar med analys av jämnhetsutvecklingen i K2. Underlaget utgörs främst av NCC:s riktade mätningar då vägnätsmätningar i K2 är avsevärt färre och tidsmässigt glesare än motsvarande K1. Generellt är jämnhetsförändringar i K2 små. Figur 3 visar linjär regression av spårdjup i K2 för samtliga objekt delade efter riktning d.v.s. samtliga mätta enskilda körfält.



Figur 3. Linjepassning av samtliga vägar och riktningar: spårdjup i K2.

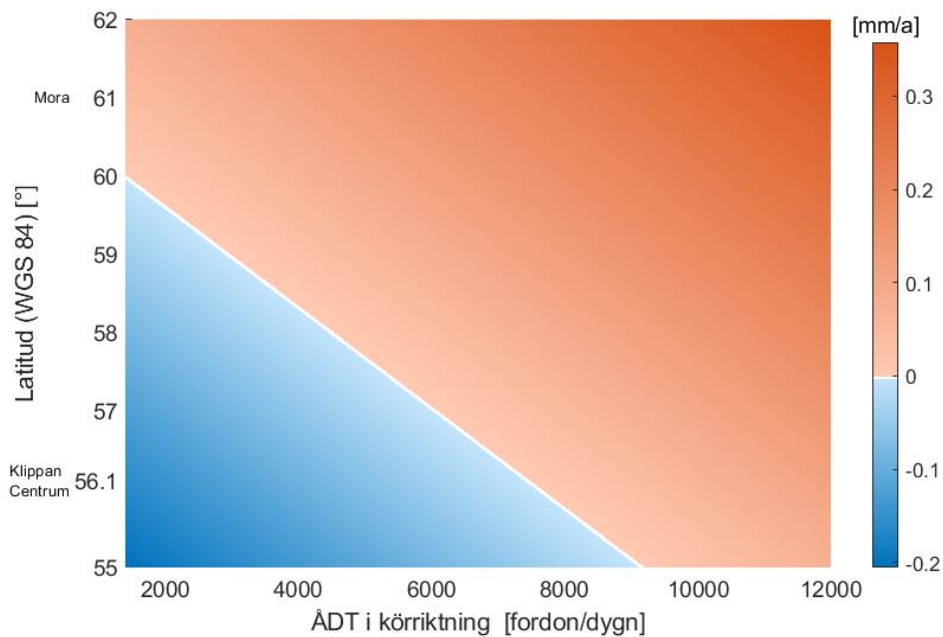
Det är tydligt i Figur 3 att överlag är spårdjup i undersökta K2:or lågt. De högsta spårdjupen är kring knappa 5 mm efter närmare 11 år. De flesta har ingen spårdjupsökning alls. Efter en signifikansjustering på grund av det stora antalet undersökta körfält (57 st.) visar endast 6 K2:or signifikant ökande spårdjup.

Regression enligt modellen i ekvation 1 ger att de enda signifikanta effekterna är total trafikmängd ( $adt_{tot}$ ) och nordlighet ( $lat$ ). Det finns dock ingen signifikant skillnad mellan entreprenadtyper. Figur 4 visar den årliga spårdjupsutvecklingen för samtliga vägar som funktion av trafikmängd i färdriktningen. Det finns inga särskilda mätningar av K2 så det är riktningens samlade trafikmängd som är mätetalet.



Figur 4. Årlig spårdjupsutveckling i K2 som funktion av trafikmängd i körriktningen.

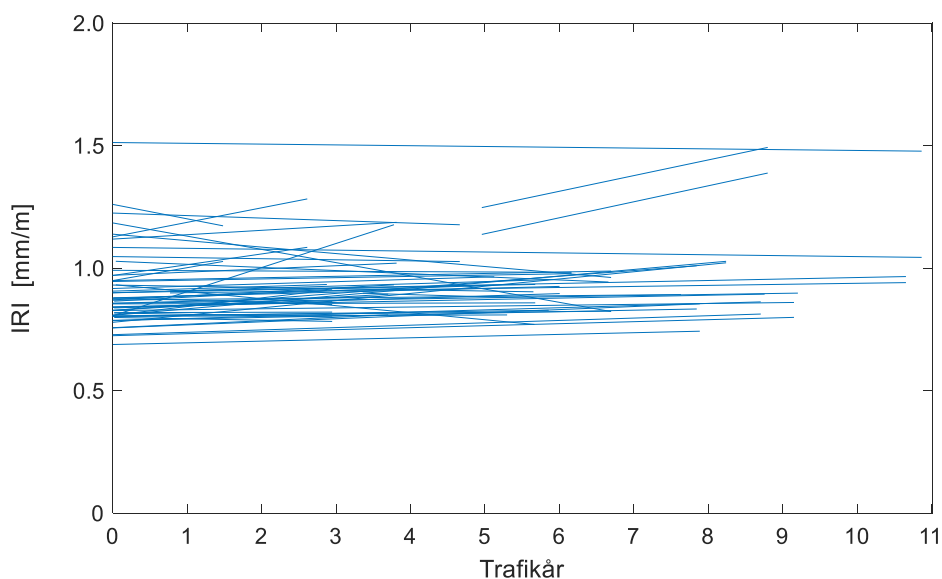
De tämligen stora variationerna är tydliga i Figur 4. I genomsnitt är det först trafikmängder överstigande ca 4 000 fordon per dygn som ger spårdjupstillväxt. Det finns dock ett nordlighetsberoende som inte går att urskilja i Figur 4. De signifikanta variablerna total trafikmängd ( $adt_{tot}$ ) och nordlighet ( $lat$ ) används för att passa en modell som beskriver spårdjupsutvecklingen. Resultatet visas i Figur 5. Då spårdjupsutvecklingen är blygsam och generellt icke-signifikant görs ingen jämförande delning efter entreprenadform utan sammanfattar K2:or generellt.



Figur 5. Spårdjupsökning i K2 som funktion av latitud och ÅDT i körriktningen (summerad för båda körfälten).

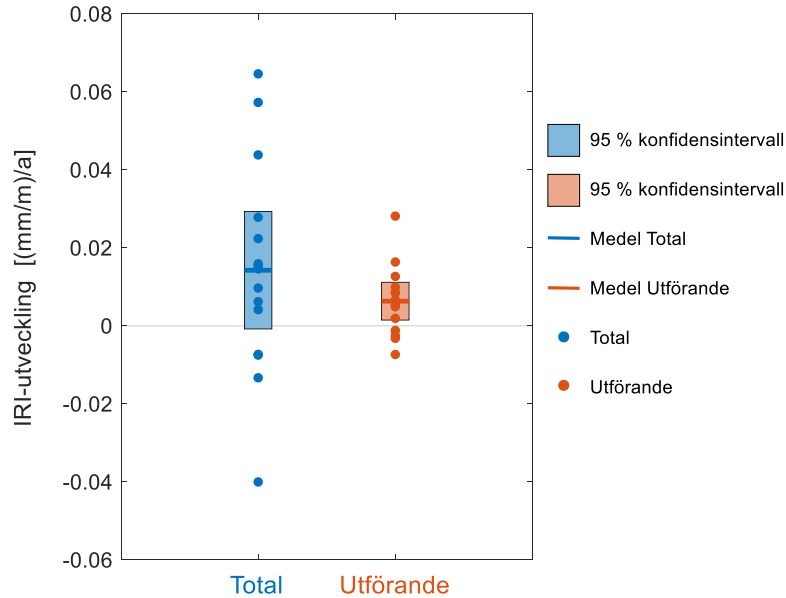
Från spårbildningsmodellen visualiserad i Figur 5 kan det noteras att i södra Sverige krävs trafikmängder över 9 000 fordon per dygn innan det blir någon spårbildning i K2. Rör vi oss norrut, d.v.s. upp längs y-axeln ökar den trafikinducerade spårbildningshastigheten givet samma trafikmängd. Det ska påpekas att det är regressionsmodellen som illustreras och osäkerheterna är relativt stora och absolutnivåerna låga, figuren är kanske mer kvalitativ än absolut. Den huvudsakliga slutsatsen är att för de trafikmängder som ingår i underlaget är spårbildningen i K2 överlag låg.

Det ställs även krav på vägens jämnhet i längsled, IRI. Figur 6 visar regression av årliga mätningar av IRI för samtliga K2:or.



Figur 6. Linjepassning av samtliga vägar och riktningar: IRI i K2.

För IRI är det än mer tydligt, jämfört med spår djup, att förändringar över tid är små, i alla fall för sträckmedelvärden. Efter justering för det stora antalet regressioner har 4 linjer (av 57) signifikant ökande sträckmedelvärden. En analys enligt ekvation 1 visar ingen påverkan av vare sig någon trafikparameter eller nordlighet: körfälten behåller generellt den jämnhet de byggdes med. Beräknade IRI-förändringar sammanfattas därför i Figur 7 delat efter kontraktstyp utan korrigerings effekter enligt ekvation 1.



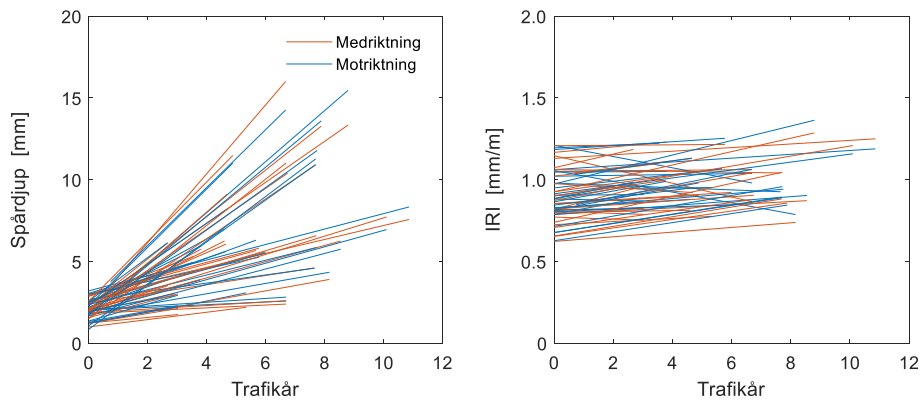
Figur 7. Jämförelse mellan kontraktstyper av årlig tillväxt i långsgående ojämnheter, IRI i K2.

Genomsnittlig förändringstakt oavsett entreprenadtyp i Figur 7 är 0,01 mm/m per år. Det går inte att notera någon egentlig skillnad mellan entreprenadformer. Nivåerna är närmast oförändrade även om vi justerar för skillnader mellan de 2 grupperna avseende trafikförhållanden och nordlighet (d.v.s.  $adt_{tot}$ ,  $f_{tung}$ ,  $v$ ,  $lat$ ).

För att undersöka den begränsade spårbildningens orsaker bestämdes även spårbottenavstånd som för alla K2:or i genomsnitt är 1 550 mm, vilket indikerar dubbslitage som huvudorsak (se Trv, 2011). De absoluta spårdjupen är generellt mycket låga vilket gör spårbottenbestämningen något osäker: det är helt enkelt svårt att entydigt identifiera spårbottenar.

### 3.3. JÄMNHET I K1

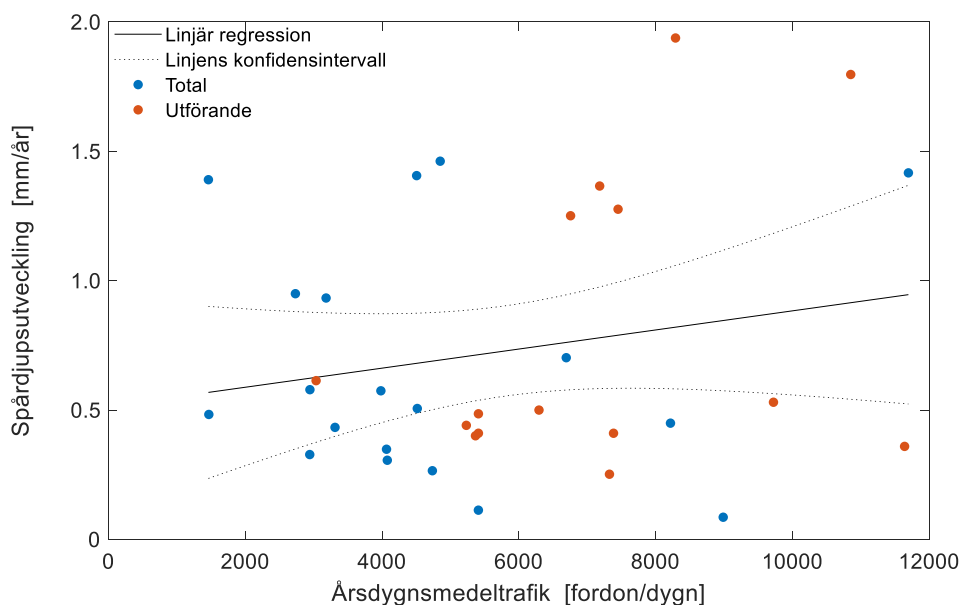
För de trafikmängder som finns representerade i underlaget till den här rapporten är det främst K1 som slits i termer av ökande ojämnheter. Mätningarna har delats efter riktning enligt det system Trafikverket använder och som pmsv3 redovisar efter (med- och motriktning). Det finns systematik i benämningssystemet av vägars riktning vilket eventuellt kan leda till systematiska skillnader i datamaterialet. Figur 8 visar en sammanfattande bild av samtliga mätningar i underlaget för spårdjup och IRI som funktion av brukandetid, delat efter riktning.



Figur 8. Linjepassning av samtliga vägar och riktningar: spår djup och IRI i K1.

Det går inte att identifiera enskilda entreprenader i Figur 8 men det visuella huvudintrycket är att de båda riktningarna i genomsnitt verkar ge snarlika trender. En kontroll av eventuellt riktningensberoende (parvist *t*-test) visar stark korrelation mellan riktningarna och inget objekt avviker starkt. varför den fortsatta analysen delas efter entreprenad med summerade riktningar. Det är dessutom så de flesta totalentreprenader krävställes, per entreprenad och inte delat efter riktning.

Samtliga spår djupslutningar har hög signifikans ( $p < 0,00$ ). För IRI är trenderna något svagare, ungefär hälften av sträckorna visar signifikant IRI-ökning. Den främsta orsaken till spårbildning är förstås trafiken varför Figur 9 visar vägnars årliga spår djupsutveckling som funktion av trafikmängd i körriktningen.



Figur 9. Årlig spår djupsutveckling i K1 som funktion av trafikmängd i körriktningen.

Man kan notera att det inte finns någon tydlig trend; spårbildningen ökar svagt med ökad trafikmängd men variationen är så stor att det kan bero på slumpfel. Då vägar

dimensioneras, främst avseende tjocklek och materialval, kan man argumentera för att det inte ska finnas något trafikmängdsberoende: högre trafikmängder ger i dimensioneringen tjockare asfaltlager och mer slitstark beläggning. Å andra sidan ser vi stor variation vilket inte skulle vara fallet om dimensioneringsprocessen är starkt kontrollerande.

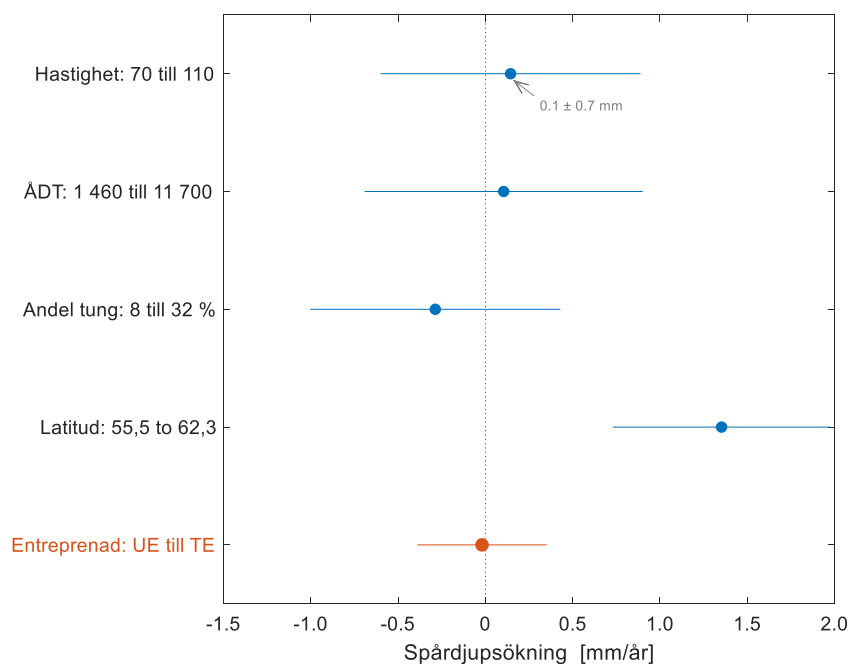
Figuren ovan var en illustration av trafikmängdens påverkan. Resultat av en mer fullständig analys enligt effektmodellen i ekvation 1 ( $adt_{tot}$ ,  $f_{tung}$ ,  $v$ ,  $lat$ ) sammanfattas i Tabell 3. I första skedet undersöktes även om det fanns signifikant samverkan mellan effekterna vilket det inte gjorde varför redovisningen i tabellen följer modellen som den (förenklat) visas i ekvation 1. Redovisade parametrar är  $p$ -värde d.v.s. sannolikheten för att den skillnad vi noterar uppkommit genom slumpfel (givet att nollhypotesen är sann) och eta-kvadrat som är ett mått på hur mycket av skillnaderna vi ser som förklaras av just den faktorn (skillnader från medelvärdet).

Tabell 3. Statistisk utvärdering av huvudfaktorer i försöksmodell, fet blå indikerar signifikant effekt

Parameter	eta-kvadrat ( $\eta^2$ )	$p$ -värde
ÅDT	0,00	0,79
Andel tung	0,01	0,42
Hastighet	0,00	0,69
Latitud	0,41	<b>0,00</b>
Entreprenadtyp	0,00	0,92

Förklaringsgraden ( $R^2$ ) för hela modellen är 44 %. Latitud är den enda signifikanta faktorn och förklarar i stort sett allt i modellen (men modellen i sig bara 0,44).

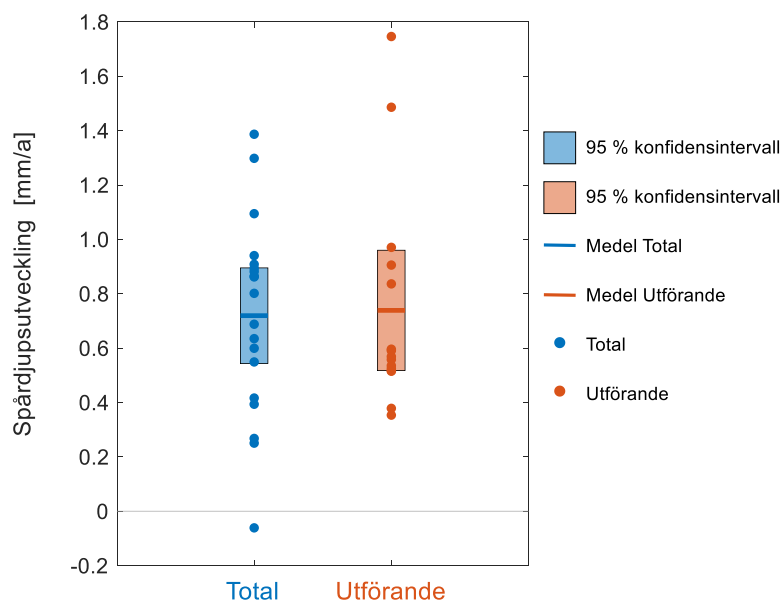
Ett annat sätt att visualisera resultatet är att visa marginaleffekter för respektive huvudfaktor: hur mycket förändras spårdjupsökningstakten i genomsnitt om man förändrar respektive faktor inom de intervall som finns representerade i underlaget (Figur 10). Utöver eventuell signifikans ger det även en bild av effektens storlek.



Figur 10. Effekt av förändring av huvudfaktorer inom underlagets spann: medelförändring (punkter) och 95 % konfidensintervall (linjer), (marginaleffekter).

För att förklara resultatet i Figur 10 exemplifierar vi med hastighet. I underlaget varierar vägarnas skyltade hastighet mellan 70 och 110 km/h. Om vi, i modellen, ökar hastigheten inom detta intervall, från 70 till 110, ökar spårdjupsbildningen i genomsnitt med ca 0,1 mm/år ( $\pm 0,7$  mm); vi kan notera att det är en ökning men att skattningen också har en stor felmarginal. Effekten kan alltså bero på slumpfel givet den risknivå vi ansätter, 5 %. Återigen syns den svaga effekten av trafikmängd och att spårdjupsökningen sjunker med ökad andel tung trafik; effekten är dock inte signifikant utan kan bero på slumpfel. Den enda tydliga faktorn är nordlighet: från den sydligaste entreprenaden till den nordligaste ökar spårbildningen med i genomsnitt 1,4 mm per år. Effekten av entreprenadtyp är väldigt nära 0 mm per år. Slutligen visar Figur 11 skillnader mellan entreprenadtyper för årlig spårdjupsökning när vi kompenserar för gruppskillnader enligt Tabell 2.





Figur 11. Spårdjupsutveckling för olika kontraktstyper justerat för årsdygnsmedeltrafik, andel tunga fordon, hastighet och latitud.

I Figur 11 framgår det tydligt, vilket redan indikerats av analyserna, spårdjupsökningen är oberoende entreprenadform: medelvärden är på samma nivå men med hygglig spridning. Analysen har även omfattat delningar efter vägtyper: 2+2; 2+1; landsväg. Det har inte visat några mönster men då ska man betänka att analysens frihetsgrader minskar desto fler delningar vi gör då det totala antalet entreprenader är begränsat.

I rapport 2 undersöktes om vägarnas jämnhet vid trafiköppning har förändrats under observationstiden med trafiköppningar mellan 2007 till 2017. Samma jämförelse visas i Figur 12 för justerade värden (enligt Figur 11) sammanställt efter trafiköppningsdatum och delat efter entreprenadtyp.

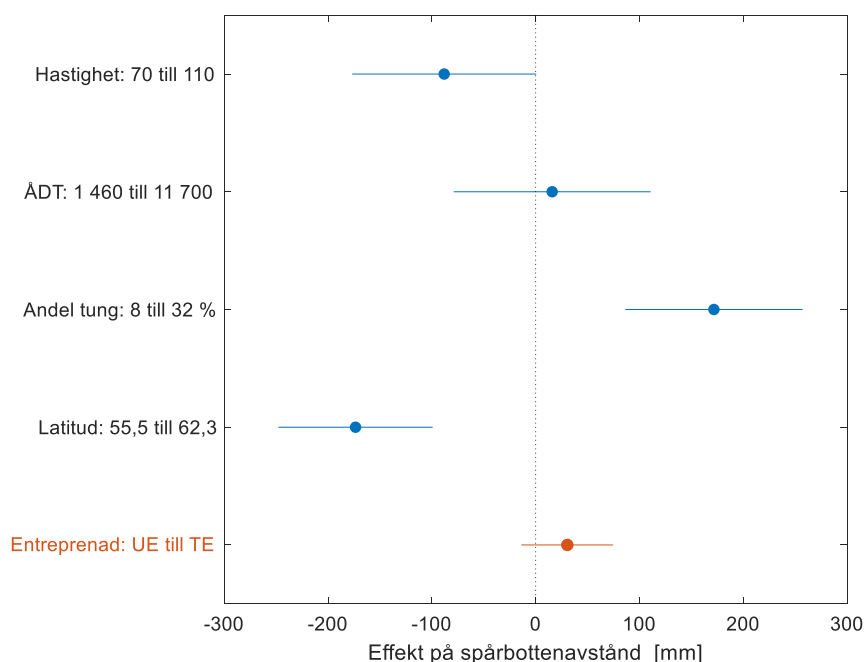


Figur 12. Spårdjupsutveckling för olika kontraktstyper efter trafiköppningsdatum (justerat för årsdygnsmedeltrafik, andel tunga fordon, hastighet och latitud).

För vi in trafiköppningstillfälle som faktor i ekvation 1 är den inte signifikant: det går inte att se någon förändrad spårbildning över tid. Visuellt i Figur 12 är det tydligt att för totalentreprenader är det i stort sett ingen förändring alls medan det för utförandeentreprenader finns en svagt sjunkande tendens. Det bör påpekas att trafiköppningstidpunkt inte generellt är signifikant utan skillnader kan bero på slumpfel och att för utförandeentreprenader finns det lite klusterliknande mönster avseende vägar i undersökningen.

När det gäller långsgående jämnhet, IRI, är de årliga förändringarna mindre och sprider mer; det finns även entreprenader som kontinuerligt blir mindre ojämna d.v.s. IRI sjunker (se Figur 8). En regression enligt ekvation 1 ger ungefär samma resultat som för spår djup, det är bara nordlighet som påverkar. Den årliga IRI-förändringen ökar svagt norrut: genomsnitt med 0,03 mm/a från den södraste till den norraste vägen. Och hela regressionens förklaringsgrad är låg,  $R^2$  kring 0,3.

Spårbottenavstånd är inget kontraktsskrav men indikativt för spårbildningens orsaker. Det är heller inget mått på hur stark spårbildningen är och det finns inget egentligt bättre eller sämre värde, utan bara ett mätetal som kan anses ge information kring spårbildningens orsaker: permanenta deformationer av tung trafik eller dubbdäcksslitage. Figur 13 visar marginaleffekter för faktorerna i ekvation 1.



Figur 13. Effekt av förändring huvudfaktorer inom underlagets omfattning: medelförändring och 95 % konfidensintervall (marginaleffekter).

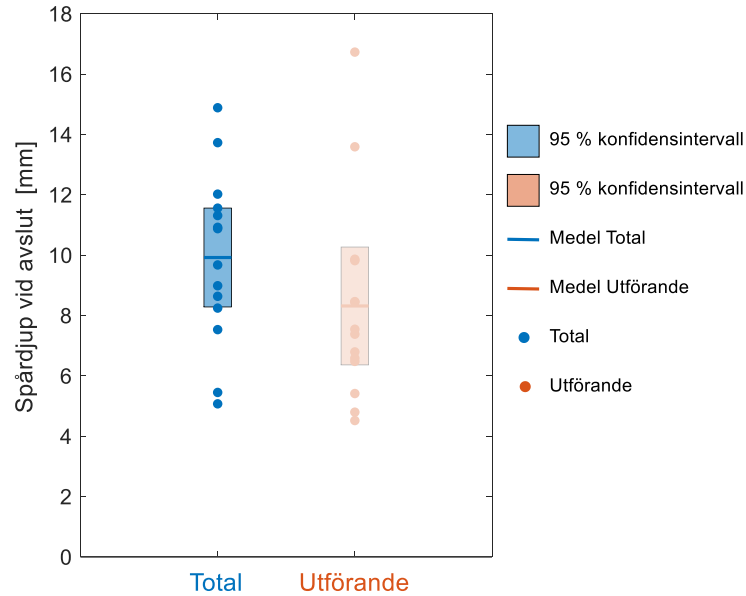
För spårbottenavstånd (Figur 13) syns 2 signifikanta faktorer. Spårbottenavståndet påverkas av andelen tung trafik, det ökar med ökad andel tung trafik, och nordlighet, det minskar med ökad nordlighet. Båda effekterna får väl anses som förväntade och logiska.

Om man tillåter sig en sammanfattande tolkning av Figur 10 (spårdjup) och Figur 13 (spårbottenavstånd) så ökar spårbildningen norrut och det är dubbslitaget som står för ökningen (snävare spårbottenavstånd). Dubbdäcksslitaget är en starkt påverkande faktor och mycket av påverkan styrs av stenmaterialkvalitet. Vid slitlagerdimensionering förmår inte tillgängliga stenkvaliteter att helt balansera det varierande dubbslitaget.

### **3.4. JÄMNHET JÄMFÖRT MED KRAV**

Totalentreprenader byggs efter absoluta krav under en fastställd tidsrymd; för entreprenören gäller det att klara kraven under garantitid men inte just mer. Utförandentreprenader byggs inte med så explicita krav. Det är därför inte helt lätt att direkt jämföra entreprenadformerna mot givna krav då de inte byggs efter samma premisser. I praktiken är dock skillnaderna förmodligen mindre än vad kontraktsvillkoren skulle tillåta. Vägars dimensionering (det som kallas bärighetsdimensionering) diskuteras i detalj i rapport 1. En snabb sammanfattning ger att kunskapsnivån inte tillåter byggande med en säkert bestämd prestanda: vi kan inte helt enkelt inte prediktera spårdjup och IRI över tid med någon större precision. Vägskada är alltför komplex och framtida påverkan, trafik och klimat, alltför okänd. Trafikverket ställer dessutom krav på dimensioneringen av totalentreprenader vilket i sig verkar riktande mot traditionell dimensionering med dess brister avseende prediktion av vägens jämnhet.

Som nämnts är garantitiden känd och spårdjupsutvecklingen har bestämts för de enskilda entreprenaderna. Det är då enkelt att för jämförelse beräkna spårdjup vid garantitidens slut vilket sammanfattas i Figur 14 för entreprenader med 8–10 års garantitid. Entreprenader med avvikande korta eller långa garantitider tas inte med i jämförelsen. Det finns dock inget direkt sätt att jämföra med utförandentreprenader på. Som ersättningsvariabel för garantitid för utförandentreprenader använder vi genomsnittliga livslängdsskattningar från Svenson (2014). Svenson ger skattade livslängder (tid till åtgärd) delat efter trafikmängdsklasser. Det visar sig att de skattade livslängderna för utförandentreprenaderna i denna undersökning är i paritet med garantitiderna för de valda totalentreprenader med ett spann från 9 till 12 år. Det bör dock starkt påpekas att det inte går att göra en rättvis direkt jämförelse mellan entreprenadformerna. Utförandentreprenader byggs efter något skilda premisser och jämförelsetalen beräknas annorlunda. Jämförelserna visade i Figur 14 är högst översiktliga och mest bara informativa; det går inte att dra slutsatser kring entreprenadformer.



Figur 14. Spårdjup vid avslut för totalentreprenader och vid genomsnittligt underhållsintervall för utförandeentreprenader (justerat för årsdygnsmedeltrafik, andel tunga fordon, hastighet och latitud).

I båda fallen handlar det om prediktioner: vid garantitidens slut för totalentreprenader och vid genomsnittlig livslängd för utförande. Och i båda fallen kan det vara så att de måste underhållas innan sluttiderna nås. Mönstret i Figur 14 indikerar något högre spårdjup vid garantiperiodens slut än vad motsvarande utförandeentreprenader normalt underhålls vid. Som redan påpekats går det inte att direkt jämföra de olika grupperna. I gruppen totalentreprenader finns det vägar som tveklöst kommer att behöva underhåll för att klara funktionskraven vilket i sig kommer att sänka de värden som bestämts i figuren då dessa enbart är prognoser. Och för gruppen utförandeentreprenader baseras beräkningar på genomsnittliga livslängder oaktat orsak för underhåll. Med viss försiktighet stärks bilden av att det inte går att se skillnader mellan grupperna och att entreprenadformerna presterar snarlikt.

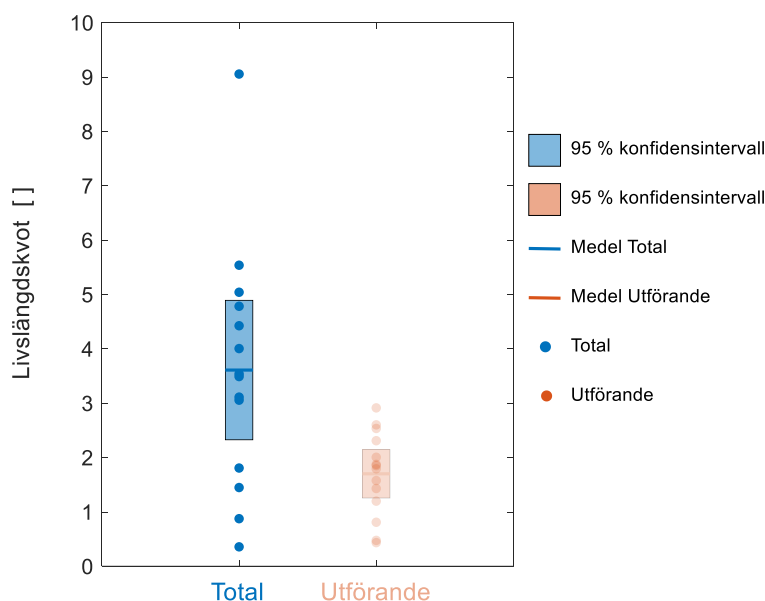
Ett annat sätt att betrakta den tekniska prestandan på är att beräkna nominell livslängd med spårdjup som den enda avgörande faktorn. Livslängd ( $t_l$ ), tid tills spårdjupet når kravnivån, bestäms då som:

$$t_l = \frac{s_{krav} - s_{ini}}{\dot{s}} \quad \text{ekv. (2)}$$

$s_{krav}$  är kravnivå,  $s_{ini}$  är spårdjup vid trafiköppning och  $\dot{s}$  är årlig spårdjupsutveckling. Livslängdskvot ( $k_{ll}$ ), definieras som beräknad livslängd relativt garantitid enligt:

$$k_{ll} = \frac{t_l}{t_g} \quad \text{ekv. (3)}$$

där  $t_g$  är garantitidens längd. Måttet beskriver hur mycket längre än garantitiden vägen håller (för spårdjup). Även denna jämförelse haltar något då premisserna skiljer mellan entreprenadformer: för totalentreprenaden är den framtida prestandan i någon mening fastställd (genom angivna krav) medan utförandeentreprenader är mer variabla. För jämförelsen väljer vi för utförandeentreprenaderna kravnivåer ( $s_{krav}$ ) från Trv:s underhållsstandard (Trv, 2011) och tiden ( $t_g$ ) från Svensons analys (Svenson, 2014) på samma sätt som ovan. Notera även att beräkningarna baseras på medelvärden vilket innebär att ungefär halva vägen har värden över kravgränsen. Beräkningen ger trots detta en bild av hur vägarna i genomsnitt presterar.



Figur 15. Livslängdskvot avseende spårdjup (justerat för årsdygnsmedeltrafik, andel tunga fordon, hastighet och latitud). Notera att randvillkoren skiljer mellan entreprenadformer.

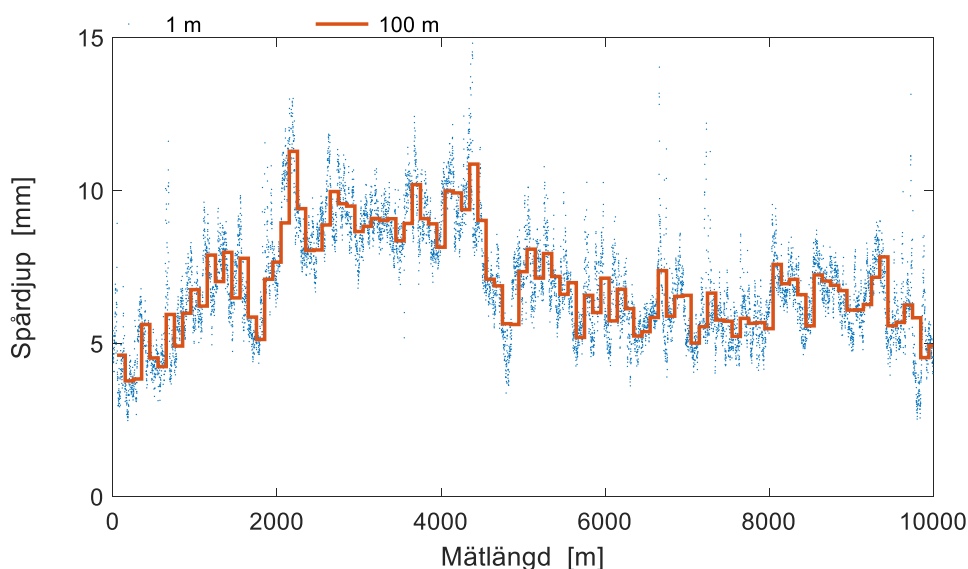
Livslängdskvoterna för totalentreprenader är i genomsnitt kring 3,5 d.v.s. vägens livslängd, vore det bara spårdjup som avgjorde, är 3,5 gånger garantitiden. Medelvärdet påverkas dock relativt starkt av vägen med livslängdskvot kring 9; exkluderas den blir medelvärdet 3,2. Vi kan samtidigt se att spridningen är avsevärd. För entreprenörer vore det ekonomiskt fördelaktigt om livslängdskvoterna var mer samlade kring 1. Att det inte är så beror förmodligen på brister i dimensioneringsmodeller, Trafikverkets övriga kontraktsvillkor och de enskilda entreprenörernas riskhantering. För de vägar med väldigt hög livslängdskvot är det troligt att annan vägskada, bristande beständighet eller sprickbildning, kommer att avgöra livslängden. Det kan även vara så att det kommer att krävas underhåll i vissa entreprenader för att upprätthålla kraven (och därmed indirekt även livslängdskvoten).

Hittills har redovisningen baserats på medelvärden. I regel, särskilt i totalentreprenader, är det dock fördelningar och andelar överträdelser som är avgörande. Det är förstås även välkänt att spårdjup varierar över enskilda

vägsträckor. Följande avsnitt undersöker mätvärdespridning och -fördelningar. Detta leder sedan även till någon typ av riskbedömning i nästföljande avsnitt.

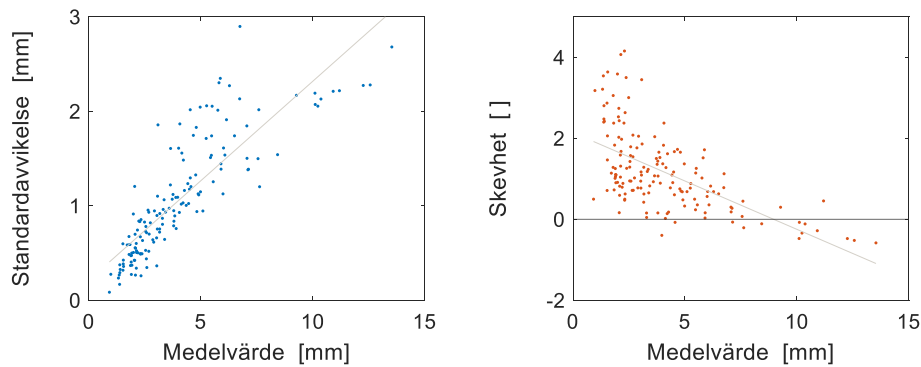
### 3.5. MÄTVÄRDESFÖRDELNINGAR

I många totalentreprenadskontrakt ställs explicita krav på mätvärdens fördelning, som t.ex. andel godkänd vägyta (t.ex. 90 %). I andra fall ställs krav på maximala värden. Då faller det på entreprenörens riskvärdering att bedöma fördelningar. Vi vet av erfarenhet att t.ex. spårdjup sprider om man betraktar längre sträckor: alla delar kommer inte att överträda gränsvärden utan bara delar av vägen. I detta avsnitt sammanfattas allmänt beskrivande mått, medelvärde, standardavvikelse och skevhet, tillsammans med en grafisk beskrivning av den rumsliga variationen med s.k. variogram. I analysen används endast de riktade mätningarna då mätkvaliteten i dessa är högre. Figur 16 visar ett typiskt exempel på spårdjupsmätningar efter ett antal års trafik som 1 m-värden och sedan medelvärdesbildat över 100 m. Vägsträckan är homogen avseende trafikmängd och hastighet.



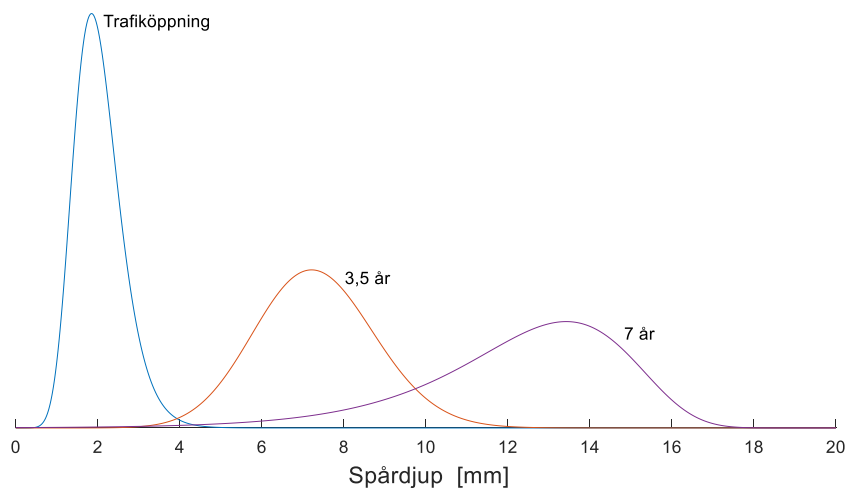
Figur 16. Spårdjup över en typisk vägsträcka.

Vid trafiköppning var alla 100 m-sträckor under 3,4 mm med ett medelvärde på 2,4 mm. Efter 4 års trafik är högsta värdet nu 11,3 mm och lägsta värdet 3,8 mm vilket innebär att vissa 100 m-sträckor har haft relativt hög spårdjupsutveckling ( $> 2$  mm/a) medan andra är närmast opåverkade. Detta är ett ganska normalt mönster: medelvärdet ökar och spridningen inom sträckan ökar. Beskrivande statistik för samtliga entreprenader och mättidpunkter visas i Figur 17 som visar standardavvikelse och fördelningarnas skevhet (skewness) som funktion av den enskilda mätningens medelvärde. Medelvärdet beskriver mätvärdesfördelningens läge, standardavvikelse dess spridning och skevheten, fördelningens form.



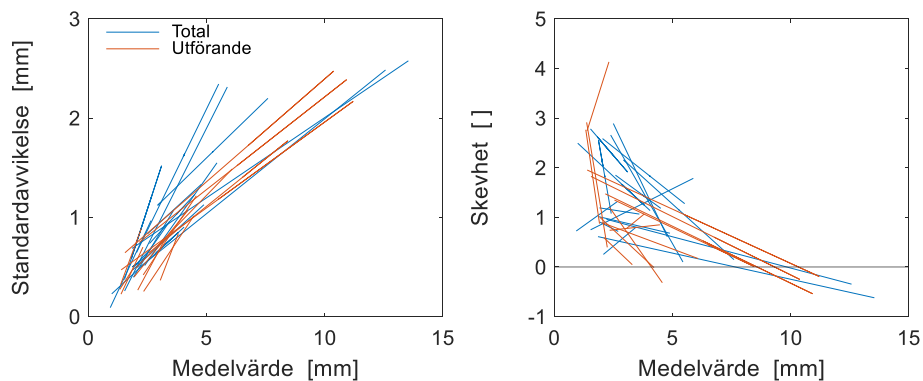
Figur 17. Spårdjup: standardavvikelse och skevhet som funktion av vägens medelvärde vid respektive mättillfälle.

I Figur 17 är det tydligt att de statistiska egenskaperna markant förändras med ökat medelvärde, standardavvikelsen är klart ökande medan den generella trenden är att skevheten minskar även om spridningen är ganska stor. Positiv skevhet innebär att fördelningen är skev åt höger och negativ, skev åt vänster. Fördelningarnas generella mönster illustreras i Figur 18 som visar spårdjupsfördelningar för en väg vid 3 olika tidpunkter.



Figur 18. Generell förändring av täthetsfördelningar för spårdjup vid olika vägåldrar (notera dock att variationen mellan entreprenader är stor).

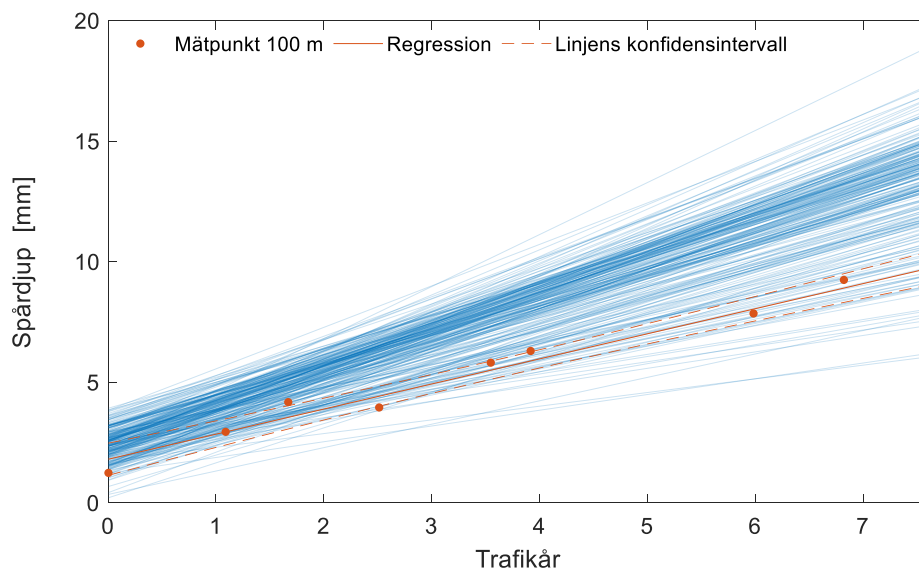
Vid trafiköppning är spårdjupet väl samlat kring medelvärdet 2 mm med data lite skevande åt höger. Efter 3 år är fördelningen nära normalfördelad och spridningen har ökat väsentligt. Slutligen, efter 7 år är spridningen än större och fördelningen är nu skev åt vänster. Vi ser dock tydligt i Figur 17 att generellt är spridningen av de statistiska måtten relativt stor varför Figur 18 endast är schematiskt beskrivande. Emellertid, för enskilda entreprenader följer fördelningens förändring i regel relativt nära linjära samband, vilket visas i nedanstående Figur 19 där standardavvikelse och skevhet bestäms som linjära funktioner av medelvärde för alla enskilda entreprenader var för sig.



Figur 19. Standardavvikelse och skevhet som funktion av vägens medelvärde vid mättillfälle; linjär regression för respektive väg och mättillfälle (31 vägar sammanlagt 154 mättillfällen).

Enskilda linjer har i regel relativt hög förklaringsgrad men de varierar mellan entreprenader på ett synbarligen närmast slumpartat sätt. Det har inte gått att hitta underliggande mönster för linjernas lutningar. För skevhet är det mer tydligt att fördelningens form varierar starkt mellan entreprenader även om det finns något av en generell trend.

Spridningsbilden över enskilda sträckor är inte helt slumpmässig, något som antyds redan i Figur 16: spårdjup utvecklas olika för olika delar av vägen. I Figur 20 visas detta för spårdjupsutvecklingen under 7 år för 240 på varandra följande 100 m-sträckor samt mätpunkter för en av dessa 100 m-sträckor.

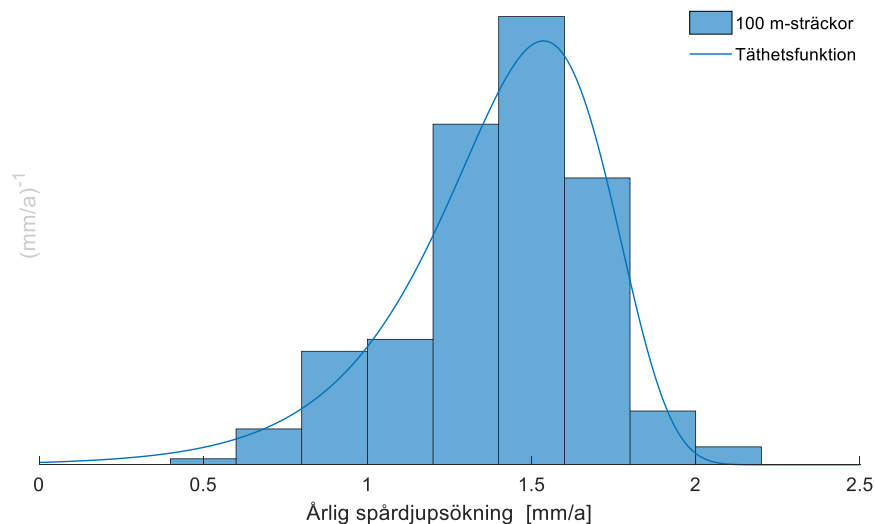


Figur 20. Spårdjupsutveckling för enskilda 100 m-sträckor (240 st.); mätning och regression visas för en enskild 100 m-sträcka.

Regressioner för de enskilda 100 m-sträckorna är typiskt starka med hög grad av linjäritet likt exemplet givet i Figur 20. Det är tydliga och konstanta skillnader mellan olika delar av vägen. De direkta orsakerna till spridningen över sträckan är



okända annat än i generella termer som att förmodligen varierar terrassförhållanden och mikroklimat (temperatur och vatten) samt att väggeometri och omgivning ger upphov till skiftande sidläges körmönster. Linjernas lutningar, årlig spårbildning, sammanfattas i Figur 21.



Figur 21. Fördelning av årlig spår djupsökning för enskilda 100 m-sträckor (normaliserat histogram  $n = 240$ ).

I någon mån kan man betrakta spridningen i Figur 21 som grundläggande eller karaktäristisk för denna sträcka. I detta fall, med hög mätdatakvalitet, är de slumpmässiga mätfelen små: det är så här spår djupsutvecklingen fördelar sig för denna sträcka.

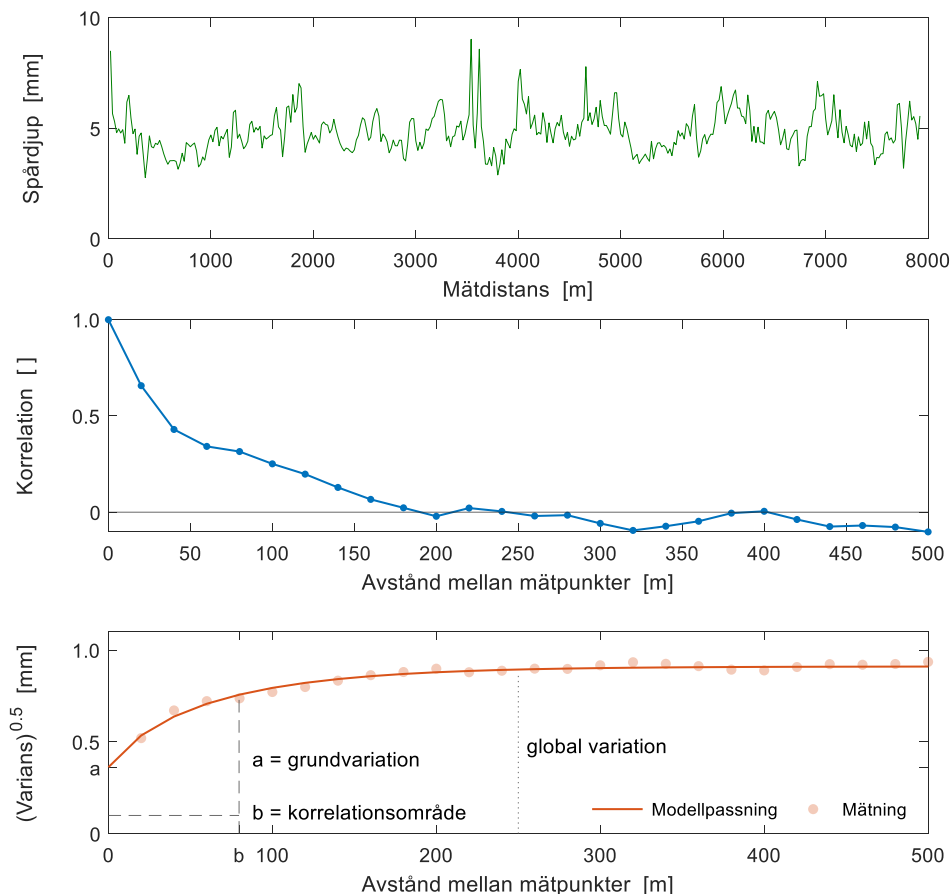
Att den rumsliga spridningen för spår djup inte är helt slumpmässig framgår redan i Figur 16 och Figur 20. Detta fenomen exemplifieras mer tydligt i Figur 22 (för en annan entreprenad) där spår djupmätningar visas på karta och färgläggs efter storlek.



Figur 22. Rumslig fördelning av spår djup längs en väg.

Inte heller för denna del finns det någon direkt given eller känd orsak till skillnaderna, trafikmängden är den samma över hela delen. I den södraste delen finns ett parti med varierande spårdjup men på en generellt lite högre nivå (synligt som mer rött). Efter detta följer en del med (synbarligen) mer slumpmässighet för att i den norra delen övergå i ett distinkt parti med lägre spårdjup. Man kan spekulera i att ett mer noggrant och adaptivt byggande och starkare dimensioneringsmetoder skulle ge upphov till ett mer enhetligt mönster. Detta kunde vara ett argument för att det kan vara skillnader mellan entreprenadformer, att entreprenadform, eller snarare underliggande dimensionering och byggande, bättre eller sämre kontrollerar den rumsliga spridningen. I ett försök att kvantifiera och jämföra eventuella skillnader avseende den rumsliga fördelningen analyserades ett urval av mätningarna med s.k. variogram. Dessa kan även användas för att mer generellt skatta det rumsliga spårmonstret d.v.s. om det finns korrelationer i längsled.

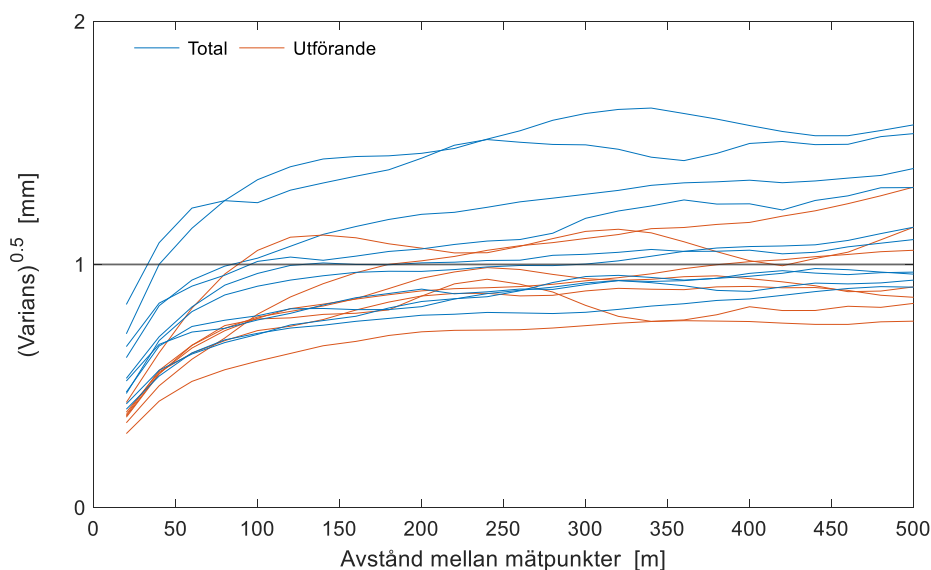
Figur 23 beskriver hur den rumsliga fördelningen presenteras och bestäms med hjälp av variogram som beskriver olikheten mellan mätpunkter som funktion av avståndet dem emellan. Exempelvägen innehåller inga tydliga diskontinuiteter som större korsningar eller starkt skiftande terräng.



Figur 23. Beskrivning av rumslig fördelning av spårdjup (20 m): med början uppifrån, spårdjup över sträckan; korrelogram, korrelation mellan mätpunkter som funktion av mätpunktsavstånd ; variogram, varians mellan mätpunkter som funktion av mätpunktsavstånd.

Det översta diagrammet i Figur 23 visar spårdjupsmätningen. I det mittrre diagrammet visas ett s.k. korrelogram som bestäms som mätningens korrelation till sig själv med den ena mätningen förskjuten i olika steg till den andra. Förskjutningen avsätts på x-axeln. Den första punkten i korrelogram är således mätningens korrelation till samma mätning, följaktligen med korrelationen 1. Den andra punkten visar korrelationen om den ena mätningen förskjutits 1 mätlängd, i detta fall 20 m. Då faller korrelationen till 0,65. I nästföljande punkt bestäms korrelationen mellan mätpunkter förskjutna 2 mätlängder d.v.s. 40 m. Korrelationen bestäms vidare med succesivt ökande förskjutningar mellan mätpunkter. Korrelationen mellan mätpunkter faller ju längre avståndet mellan dem är. Vid knappa 200 m är korrelation 0. Det understa diagrammet är variogrammet som bär likheter med korrelogrammet men bestämmer varianser mellan mätpunkter d.v.s. olikheter; hur mycket varierar spårdjupet mellan mätpunkter efter en viss sträcka. Den första mätpunkten är den genomsnittliga variansen (skillnaden i kvadrat) mellan alla på varandra följande mätpunkter: den genomsnittliga variansen mellan mätpunkter med 20 m avstånd. Nästa punkt bestäms för 40 m och så vidare. I Figur 23 visas roten ur variansen för att enheten skall bli i mm (standardavvikelse). Bestämningarna av variansen som funktion av mätpunktsavståndet passas i regel till en modell som typiskt delas i 3 parametrar givna i variogrammet ovan. Den första är mätdataets grundvariation ("nugget") som är modellens skärningspunkt vid avståndet 0. Avvikelser från 0 för grundvariationen anses vara slumpfel och varianser med kortare utsträckning än punktavståndet. Korrelationsområdet ("range") är avståndet till när variansen når sitt slutliga värde (eller nära) som i sin tur är den globala variansen ("sill").

I denna rapport görs ingen mer fullständig eller djupare analys av de rumsliga fördelningarna utan empiriska variogram (bestämningar direkt från mätningar) används för visuella kvalitativa jämförelser, dels mellan entreprenadformer dels eventuellt generella mönster för spårdjupsvariationer. Vi har ett stort antal mätningar med högst varierande statistiska egenskaper (jämför Figur 17). Figur 24 gör ett utsnitt av entreprenader och mättillfällen med medelvärden kring 5 mm ( $5 \pm 1$  mm); spårdjup kring 5 mm är tydligt mätbara med begränsat mätbrus och det finns relativt många exempel kring 5 mm: 10 total- och 7 utförandeentreprenader.



Figur 24. Empiriska variogram, varians mellan mätpunkter som funktion av mätpunktsavstånd.

Det generella intrycket av den rumsliga variansen sammanfattad i Figur 24, är att den rumsliga spridningen i sig visar relativt stor variation; de statistiska egenskaperna skiljer relativt mycket även om urvalet är begränsat till vägar med ungefärligen samma populationsmedelvärden. Det bör påpekas att det för spårdjupsvariation inte finns något självklart bra eller dåligt, utan variogrammen används för att se eventuella skillnader eller möjligen relativt konstanta egenskaper. Man ska också komma ihåg att det finns skillnader mellan entreprenadformerna avseende trafik och nordlighet, vilket vi inte kan kontrollera för i den här delen av analysen. Allmänt kan vi konstatera att redan efter 20 m (1 mätpunkt) är variationen kring 0,5-1 mm. Och det är stora skillnader i korrelationsområde och global variation. Modellpassningar<sup>2</sup> ger grundvariationer mellan 0–1,2 mm, korrelationsområden mellan 80–1 060 m och slutligen globala variationer mellan 0,8 till 2 mm. De rumsliga egenskaperna varierar.

Sammanfattningsvis kan det sägas att för mätvärdesfördelningar är det svårt att notera några skillnader alls mellan entreprenadformer samtidigt som vägentreprenader präglas av relativt stora spridningar; mätvärdesfördelningarnas bredd och form varierar mycket mellan enskilda entreprenader även om det finns generella mönster. Även den rumsliga fördelningen varierar, kanske inte förvånande, mellan vägar på ett sätt som inte går att generalisera baserat på de variabler som används i denna undersökning, trafik, nordlighet, kontrakts- och vägtyp.

<sup>2</sup> I geostatistik vanligen benämnd exponentiell modell för variogram.

## 4. RISKER UNDER GARANTITID

Riskhantering omfattar generellt systematiska processer för att identifiera, bedöma och prioritera risker förenade med den verksamhet som bedrivs. Huvuddragen i vår definition av riskbedömning är:

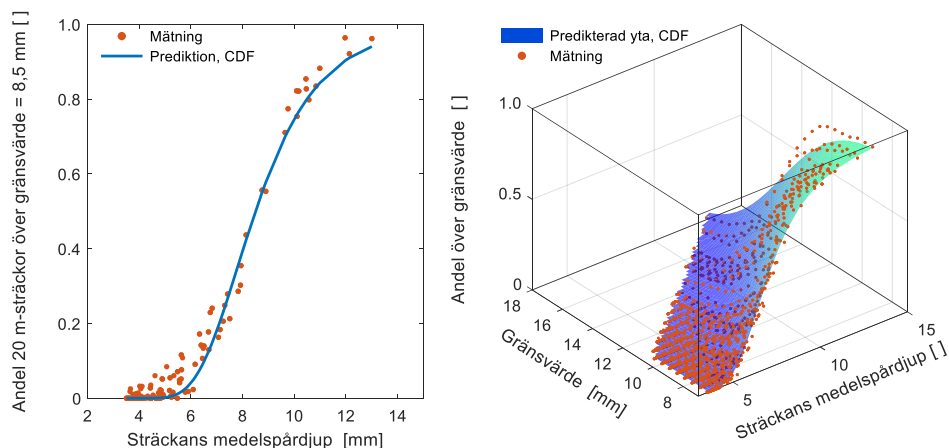
- identifiera riskkällan
- beräkna sannolikheter
- bestämma konsekvenser
- beräkna risker
- (förebyggande åtgärder)

De huvudsakliga riskkällorna i totalentreprenader identifierades i delrapport 1 och är spårdjup och IRI. Delrapport 2 beskrev riskmodeller vid trafiköppning. I denna rapport begränsas riskmodellen till spårdjup. Erfarenhetsmässigt är det spårdjup som får mycket fokus för hela vägsträckor. IRI är ofta mer lokaliserade till kända diskontinuiteter som broar. Det är också så att det är avsevärt svårare att generellt beskriva IRI-utveckling över tid jämfört med spårutveckling som, vi såg tidigare, närmast alltid är tydliga och enkelt linjära med tid. Generellt definieras risk enligt den intuitiva ekvationen:

$$\text{riskkostnad} = \text{sannolikhet} \times \text{konsekvens} \quad \text{ekv (4)}$$

d.v.s. i genomsnitt är riskkostnaden en enkel funktion av sannolikheten och kostnaden vid utfall. För att kunna prediktera risker behöver vi uttrycka sannolikhet i statistiska funktioner eller modeller. I fallet med kravöverträdelser under garantitid antar vi att konsekvensen är åtgärder som förstås kan variera mycket i kostnad, vilket vi inte kan uttrycka i en enkel modell. Så riskkostnaden får definieras som sannolikheten för åtgärd eller, uttryckt på ett annat sätt, andelen underkänd vägyta för en vägsträcka vid kontrolltillfället.

I avsnitten ovan redovisas en stor mängd empirisk data som kan användas för att bestämma en modell. Vi baserar modellen på spårdjupets medelvärde för enskilda entreprenader. Spårdjupsmedelvärdet är, som nämnts, närmast alltid en linjär funktion av tid, dessutom ofta med hög förklaringsgrad vilket ger relativt precisa prediktioner av framtida medelvärden vid t.ex. garantibesiktningar. Som underlag används de 154 riktade mätningarna med hög datakvalitet och som alltid omfattar hela entreprenader d.v.s. mätningar i båda riktningarna. Det visar sig att om man för dessa 154 dataset ansätter ett gränsvärde (kravnivå) och bestämmer andelen av vägen med spårdjup över detta gränsvärde och avsätter dessa som funktion av medelvärdet uppträder ett mönster. Ett exempel på denna rent empiriska bestämning visas i Figur 25 där den vänstra figuren visar bestämningar för gränsvärdet 8,5 mm, medan den högra visar den yta som bildas om detta repeteras för ett stort antal olika gränsvärden. Förfarings sättet är likt det som finns redovisat i rapport 2 för IRI över 400 m-sträckor. Beräkningsmetoden simulerar ett antal kravgränser gentemot underlaget.



Figur 25. Andelar överstigande gränsvärde: vänstra figuren, andelar överstigande gränsvärdet 8,5 mm som funktion av hela sträckans medelvärde; högra, andelar som funktion av hela sträckans medelvärde och ansatt gränsvärden.

I den vänstra figuren finns även en passad modell baserad på normalfördelningen men uttryckt som den kumulativa normalfördelningen. Normalfördelningen förefaller ge rimlig bild av de faktiska mätningarna. Vi formulerar då en modell för andelen överstigande vägyta ( $fex$ ) för en bestämd kravnivå ( $l$ ):

$$fex = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left( \frac{l - \bar{x}}{s \sqrt{2}} \right) \quad \text{ekv. 5}$$

där erf är den s.k. felfunktionen (error function) som används för att beskriva den kumulativa normalfördelningen,  $l$  är gränsvärde,  $\bar{x}$  är predikterat medelvärde för den specifika vägen baserat på mätningar. Standardavvikelsen ( $s$ ) bestäms som en funktion av medelvärdet ( $\bar{x}$ ) enligt:

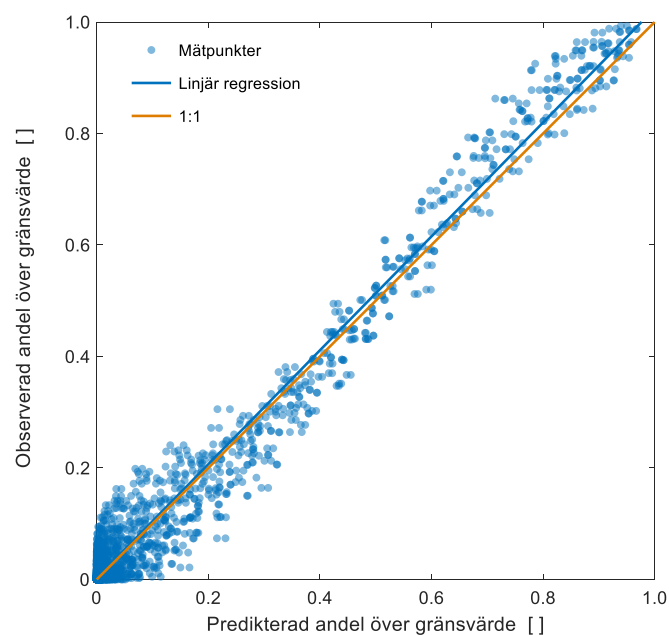
$$s = a + b \bar{x} \quad \text{ekv. 6}$$

Grunden för ekvation 6 är redovisad i Figur 17 där det är tydligt att förhållandet mellan populationsmedelvärdet och motsvarande standardavvikelse är generellt relativt starkt men med ganska stor spridning. Ekvation 5, andelen underkända, behöver ingen passning utöver den som görs i ekvation 6 men vars bestämning kan bero på urvalet entreprenader den baseras på. I denna rapport har vi samma problem vid validering som beskrevs i rapport 2 då det sammanlagda antalet entreprenader inte är så stort att underlaget kan delas i en kalibreringsdel som sedan valideras mot en delmängd som inte var del av kalibreringsunderlaget. I denna del av undersökningen sorterades 3 entreprenader bort då spårmedelvärdet vid de riktade mätningarna var för lågt för att bidra med data angående andelar över de simulerade gränserna.

För att bestämma prediktionsfelet genomförs en slumpad korsvalidering enligt följande:

1. entreprenaderna delas slumpmässigt i 2 delar:  
20 stycken för kalibrering, 11 för validering
2. för kalibreringsgruppen bestäms koefficienterna  $a$  och  $b$  i ekvation 6
3. den kalibrerade funktionen används sedan i ekvation 5 för att prediktera andelar underkända i valideringsgruppen
4. prediktionerna jämförs med mätningarna i valideringsgruppen
5. proceduren upprepas 10 gånger.

Resultatet från valideringen visas i Figur 26 som observerade värden mot predikterade. En bra modell faller nära 1:1-linjen med snäv spridning.



Figur 26. Andelar över gränsvärde : observerade värden mot modellpredikterade.

Prediktionsmodellen i ekvation 6 ger i genomsnitt rätt resultat utan systematisk förskjutning: lutningen för resultatkurvan är väldigt nära 1 och skär genom origo (0,0). Det finns en viss överlagrad tendens för residualerna, vid låga värden är prediktionerna möjligen något höga och vid högre andelar underkända, tvärtom. Däremot är det viss spridning. Prediktionsfelet för valideringen är 0,04 (root mean squared error). I det empiriska underlaget finns det en ansamling av värden upp till knappa 0,1. Om dessa värden ( $< 0,1$ ) undantas valideringen förblir resultatet närmast helt opåverkat. Slutligen bestäms ekvation 6 för hela underlaget:

$$a = 0,198 \text{ mm}$$

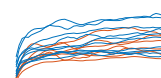
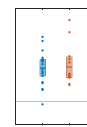
$$b = 0,207.$$

## 5. DISKUSSION

Det står tidigt klart att spridningen mellan enskilda vägar, oaktat entreprenadtyp, är relativt stor varför det blir svårt att se effekter av just entreprenadtyp. Mycket av rapporten blir en ganska pedantisk övning i resultatpresentation. Det är ändå slående hur lika entreprenadtyperna i genomsnitt är och det finns inga starka tecken på att totalentreprenader håller sämre än utförandeentreprenader trots den i förväg kända ansvarstiden, vanligen 10 år, vilket i vägperspektiv är relativt kort. Man kan förstås också vända på perspektivet, att det inte heller finns något som talar för att byggkvaliteten förbättrats. Det finns kontrollmekanismer i totalentreprenader som t.ex. nominell dimensioneringsperiod och inte minst explicita krav på jämnhet under hela garantitiden. Samtidigt är det så att kända dimensioneringsmetoder är trubbiga, framför allt när det gäller just explicita vägytekrav. Det är förmodligen närmast ogörligt att riskfritt reducera (eller dimensionera) vägens livslängd till att bara omfatta garantitiden. Vägars nedbrytning är komplex och vägbyggande är erfarenhetsbaserat; i allt väsentligt byggs vägar efter vad man tidigare erfarit fungerar (på ett känt sätt i genomsnitt, bör det påpekas, då variationerna är relativt stora). I fallet totalentreprenader känner vi inte dimensioneringen för de enskilda entreprenaderna. Det är däremot rimligt att anta att utförandeentreprenaderna dimensionerats i DK 2 (dimensioneringsklass 2, se även rapport 1) d.v.s. relativt styrt. Trots detta finns det uppenbarligen relativt stora skillnader även mellan utförandeentreprenader. Dimensioneringens syfte i DK 2 är att kompensera för skillnader i förutsättningar och få likvärdig prestanda. Totalentreprenader uppträder i genomsnitt på samma sätt som utförandeentreprenader och med ungefärligen samma spridningar varför det är rimligt att byggsättet i mycket är likartat. Man kan spekulera kring att det är mycket det vi ser även när upphandlingsformen något förändras, vilket mer förskjuter riskhanteringen från beställaren till utföraren än påverkar den grundläggande vägbyggnadskonsten. Eventuellt kan det förstås vara så att utförare sökt hitta förbilligande lösningar som inte på ett avgörande sätt påverkar den tekniska prestandan.

Urvalet av entreprenader som en potentiell felkälla diskuterade tämligen ingående i rapport 2. Eftersom det är samma entreprenader som följts under garantitid (brukandet) kvarstår problemet. Det fanns inte en stor mängd entreprenader av olika typer att fritt kunna slumpa undersökningsobjekt ur. Valet styrdes mer av datatillgänglighet. I det första skedet var det väsentligt att mätningar på otrafikerad vägyta fanns tillgängliga. Likväl är det ett hyggligt antal entreprenader i de båda grupperna och de är tidsmässigt och geografiskt utspridda även om det finns lite klusterliknande geografiska mönster.

Undersökning av den rumsliga spridningen genom variogram påverkas i en del fall av att det finns kända diskontinuiteter längs vägen som t.ex. större korsningar, vilket kan uppträda i variogrammen som ökat korrelationsområde och möjligen även som ökad global varians. De flesta av entreprenaderna är dock relativt homogena i detta avseende. I urvalet av entreprenader i rapport 2 valdes en del entreprenader bort då de innehöll alltför många störande moment som t.ex. korsningar och

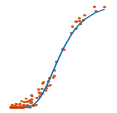




konstbyggnader. De valda entreprenaderna är i regel homogena. För 2+1-vägar kan det också finnas överlagrade effekter som beror på alternerande dubbla och enkla körfält. Samtidigt är det så vägar ser ut; ingen väg är fri från potentiella störningar. För att kunna generalisera måste vi acceptera en del påverkande och filtrerande effekter, annars kvarstår bara att betrakta varje entreprenad enskilt i efterhand. Detta gäller generellt för de analyser som görs i denna rapport och inte bara variogrammen. Och att bara använda närmast idealiserade delsträckor är inte heller meningsfullt då vår bedömning är att det blir alltför artificiellt, analysen fångar inte normala spridningar. En tolkning av den rumsliga fördelningen är att det är svårt att bygga vägar med enhetligt uppträdande: dimensionering och byggande förmår inte kontrollera för varierande förhållanden och förutsättningar.

Avsnittet om prestandan jämfört med krav är egentligen bara tillämplig för totalentreprenader. Det kan inte nog understrykas att såväl kontraktsvillkor som beräkningarna delvis grundas på olika premisser. Har man detta i åtanke fungerar bestämningarna för utförandentreprenader som orienterande måttstock. Men inte mer än så.

En målsättning med undersökningen var att utveckla en riskbedömningsmodell. Det är svårt att tänka sig att det finns något bra sätt att helt utan empirisk återkoppling d.v.s. mätning, prediktera framtida prestanda. Vi valde då att använda uppmätta medelvärden i en riskmodell. Medelvärden har i praktiken visat sig följa enkla linjära samband med relativt små fel. De statistiska egenskaperna för de enskilda mätningarna varierar dock, såväl mellan entreprenader som över tid som rumsligen inom entreprenader. Valet föll då på att använda normalfördelning som grund för modellen. Utfallet synes vara i genomsnitt rätt d.v.s. utan systematiska förskjutningar. Valideringen gav även en felskattning av prediktioner.

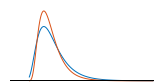


Eftersom detta är den avslutande rapporten rekapitulerar vi de viktigaste punkterna från de 2 tidigare rapporten innan denna rapport summeras. I delrapport 1 gavs ett antal rekommendationer kring kontraktsumformning i totalentreprenader bl.a.:

*Det kanske mest eftersträvansvärda är enhetlighet mellan totalentreprenadskontrakt då de varierar avseende såväl kravställning som övriga kontraktsförutsättningar som t.ex. indexreglering.*

Och i delrapport 2, som redovisade jämnhet vid trafiköppning, konstaterades bl.a. följande

*I hela datamängden är utförandentreprenader 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.*



**Baserat på resultat erhållna i denna undersökning, delrapport 3, kan följande slutsatser dras:**

- avseende vägars jämnhet under brukande så går det inte se någon direkt skillnad mellan total- och utförandentreprenader för varken IRI eller spårdjup
- det är stor skillnad i spårbildning mellan olika entreprenader oavsett entreprenadform trots nominell dimensionering och kontrollerat byggande
- spårdjupsökningen i K2 är mycket begränsad för trafikmängder upp till 11 000 fordon per dygn som var den högsta trafikmängden i underlaget; så även IRI-förändringar
- allmänt varierar de statistiska egenskaperna tämligen mycket mellan entreprenader både vad gäller generella deskriptiva statistiska mått som medelvärde, standardavvikelse och skevhet, och vad gäller den rumsliga fördelningen inom respektive entreprenad
- de statistiska egenskaperna förändras även över tid (eller med ackumulerad trafik) för de enskilda entreprenaderna.

Och i tillägg till detta formulerades en riskbedömningsmodell för spårdjup baserad på prediktioner av medelvärde.

## REFERENSER

Svenson, K. 2014. Estimated Lifetimes of Road Pavements in Sweden Using Time-to-Event Analysis. *Journal of Transportation Engineering* 140(11). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000712](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000712).

Trv. 2011. *Underhållsstandard belagd väg 2011*. 2012:074. Trafikverket, Borlänge.