

Utveckling av nedbrytnings- modeller

Sprickinitiering och sprickpropagering

Lars-Göran Wågberg





VTI meddelande 916 · 2001

Utveckling av nedbrytnings- modeller

Sprickinitiering och sprickpropagering

Lars-Göran Wågberg

<p>Utgivare:</p>  <p>Väg- och transport- forskningsinstitutet 581 95 Linköping</p>	<p>Publikation: VTI meddelande 916</p>	
	<p>Utgivningsår: 2001</p>	<p>Projektnummer: 60610</p>
	<p>Projektamn: Utveckling av prognosmodeller för tillståndsförändring på belagda vägar</p>	
<p>Författare: Lars-Göran Wågberg</p>	<p>Uppdragsgivare: Kommunikationsforskningsberedningen (KFB)</p>	
<p>Titel: Utveckling av nedbrytningsmodeller Sprickinitiering och sprickpropagering</p>		
<p>Referat</p> <p>Målsättningen i detta projekt har varit att utveckla tillståndsförändringsmodeller för initiering av belastningsbetingade sprickor i och omedelbart utanför hjulspåren samt modeller som beskriver med vilken hastighet dessa sprickor därefter propagerar. De modeller som tagits fram i projektet är avsedda att användas i så kallade PM-system (Pavement Management) eller system för underhållsplanering på ren svenska. Informationen om hur våra vägar är uppbyggda, vilka material som använts, materialens egenskaper etc är mycket knapphändig och kan därför inte utgöra indata i modeller av detta slag. All data som utgör underlag för modellutvecklingen har hämtats från det svenska nationella LTPP-projektet (Long Term Pavement Performance) som VTI har drivit på uppdrag av Vägverket under många år. Det är helt avgörande att modeller av detta slag utvecklas med hjälp av högkvalitativa och representativa data. Sveriges medverkan i PARIS-projektet (Performance Analysis of Road Infrastructure, European Commission 1998) har visat att data från det svenska LTPP-projektet håller hög kvalitet.</p> <p>Indata till de sprickinitieringsmodeller som har utvecklats i projektet är antingen Surface Curvature Index 300 (SCI300) eller töjningen i underkant av asfaltlagren (STRAIN) samt antalet ekvivalenta standardaxlar (N100) per år. SCI300 respektive STRAIN beräknas utifrån fallviktsdata.</p> <p>Indata till de sprickpropageringsmodeller som utvecklats är antingen antalet ackumulerade ekvivalenta standardaxlar (N100) eller ackumulerat antal år sedan senaste beläggningsåtgärd vid besiktningstillfället samt sprickindex vid aktuellt besiktningstillfälle.</p>		
<p>ISSN: 0347-6049</p>	<p>Språk: Svenska</p>	<p>Antal sidor: 50</p>

Publisher:  Swedish National Road and Transport Research Institute S-581 95 Linköping Sweden	Publication: VTI meddelande 916	
	Published: 2001	Project code: 60610
	Project: Pavement deterioration	
Author: Lars-Göran Wågberg	Sponsor: Swedish Transport and Communications Research Board (KFB)	
Title: Pavement deterioration Crack initiation and crack propagation models		
Abstract <p>The objective of this study was to develop models for predicting the cumulative number of load applications to the initiation of cracking for flexible pavements and to develop models for predicting crack propagation in flexible pavements. Crack initiation was defined as the first appearance of cracking in the wheel paths. The models are aimed for use in Pavement Management Systems. Data used in the study consisted of data from a Swedish LTPP study where over 600 test sections have been monitored during more than ten years. Every year a detailed distress survey, measurements of rut depth and the longitudinal profile have been carried out at each test section. The database contains information about traffic, climate, pavement structure, surface condition and structural strength. Pavement response based explanatory factors included, among other things, tensile strain at the bottom of the asphalt layer and other deflection based factors (i.e. surface curvature index, curvature basin factor, bearing capacity).</p> <p>The modelling of crack initiation models was carried out using a survival analysis approach. The modelling of crack propagation models was carried out using linear regression analysis. From the data, describing the yearly development of cracks, a Cracking Index was calculated. The same approach of developing crack models was used in the PARIS (Performance analysis of road infrastructure) project carried out within the 4th European Framework Programme Road Transport 1996-1998.</p> <p>Models were successfully developed to predict the cumulative number of traffic loading to the initiation of cracking in the wheel paths. The models included two independent variables to pavement response and ageing (a relationship between a response variable and the annual cumulative number of traffic loading). As response variables Surface Curvature Index 300 or Tensile Strain at the bottom of the asphalt layer can be used in the crack initiation models.</p> <p>Models were also developed to predict crack propagation in the wheel paths. For any given section of road, the slope of the linear model can be estimated from the level of distress at the last distress survey and the age of the pavement surface or the number of ESALs carried by the pavement at that time.</p> <p>All models have been validated against independent data, not used in the development phase. The results of the validation process show that the models meet the requirements for models to be used in Pavement Management Systems.</p>		
ISSN: 0347-6049	Language: Swedish	No. of pages: 50

Förord

Målsättningen i detta projekt har varit att utveckla tillståndsförändringsmodeller för initiering av belastningsbetingade sprickor i och omedelbart utanför hjulspåren samt modeller som beskriver med vilken hastighet dessa sprickor därefter propagerar. De modeller som tagits fram i projektet är avsedda att användas i så kallade PM-system (Pavement Management) eller system för underhållsplanering. Projektet har finansierats av KFB (Kommunikationsforskningsberedningen). Dataunderlaget har hämtats från det svenska nationella LTPP-projektet (Long Term Pavement Performance) som VTI har drivit under många år på uppdrag av Vägverket.

Arbetet har bedrivits som ett uppdragsprojekt på VTI där Lars-Göran Wågberg varit projektledare och rapportförfattare medan Nils-Gunnar Göransson förtjänstfullt medverkat vid datainsamling, databearbetning och datasammanställning.

Analys- och modellutvecklingsarbetet har genomförts med mycket värdefull ledning av Harri Spooft på VTT, Statens tekniska forskningscentral, i Finland. Harri Spooft var ansvarig för motsvarande arbete inom PARIS-projektet (Performance Analysis of Road Infrastructure) i EU:s fjärde ramprogram för vägtransporter.

Linköping i april 2001

Lars-Göran Wågberg

Innehållsförteckning		Sid
	Sammanfattning	7
	Summary	9
1	Introduktion	11
2	Målsättning	12
3	Kriterier för val av observationssträckor	13
4	Det nationella LTPP-programmet	14
5	Beskrivning av sträckorna	16
6	Mätprogram	19
6.1	Mätning av vägytan med vägytemätbil	19
6.2	Mätning med fallvikt KUAB-FWD	20
6.3	Mätning av tvärprofil	20
6.4	Okulär bedömning av tillståndet	21
6.5	Mätning av trafikmängden	22
6.6	Databas med mätdata	22
7	Vägkonstruktionens respons på belastning	23
7.1	Surface Curvature Index, SCI	23
7.2	Dragtöjning i asfaltlagrens underkant	24
8	Utveckling av prognosmodeller	27
8.1	Kontroll och analys av data	27
8.1.1	Identifiering av responsvariabler och förklarande variabler	27
8.1.2	Analys av variabler	28
8.1.3	Samband/samverkan mellan variabler	28
8.1.4	Beräkning av sprickindex, S_i	28
8.1.5	Urval av data	31
8.2	Metodik för utveckling av sprickinitieringsmodell	31
8.3	Resultat - sprickinitieringsmodell	34
8.3.1	Sprickinitieringsmodellernas begränsningar	39
8.4	Validering av sprickinitieringsmodellerna	41
8.5	Metodik för utveckling av sprickpropageringsmodell	42
8.5.1	Val av data	42
8.5.2	Val av sprickpropageringens funktionella form	43
8.5.3	Beräkning av lutningskoefficienter för tidsseriedata	43
8.5.4	Identifiering av samband	43
8.6	Validering av sprickpropageringsmodellerna	49
9	Konklusioner	51
10	Litteraturreferenser	52

Utveckling av nedbrytningsmodeller. Sprickinitiering och sprickpropagering

av Lars-Göran Wågberg
Statens väg- och transportforskningsinstitut (VTI)
581 95 Linköping

Sammanfattning

Modellerna klarar kraven för att användas i PM-system

Målsättningen i detta projekt har varit att utveckla tillståndsförändringsmodeller för initiering av belastningsbetingade sprickor i och omedelbart utanför hjulspåren samt modeller som beskriver med vilken hastighet dessa sprickor därefter propagerar. De modeller som tagits fram i projektet är avsedda att användas i så kallade PM-system (Pavement Management) eller system för underhållsplanering på ren svenska. Informationen om hur våra vägar är uppbyggda, vilka material som använts, materialens egenskaper etc. är mycket knapphändig och kan därför inte utgöra indata i modeller av detta slag. All data som utgör underlag för modellutvecklingen har hämtats från det svenska nationella LTPP-projektet (Long Term Pavement Performance), som VTI har drivit på uppdrag av Vägverket under många år. Det är helt avgörande att modeller av detta slag utvecklas med hjälp av högkvalitativa och representativa data. Sveriges medverkan i PARIS-projektet (Performance Analysis of Road Infrastructure, European Commission 1998) har visat att data från det svenska LTPP-projektet håller hög kvalitet.

Indata till de sprickinitieringsmodeller som har utvecklats i projektet är antingen Surface Curvature Index 300 (SCI300) eller töjningen i underkant av asfaltlagren (STRAIN) samt antalet standardaxlar (N100) per år. SCI300 respektive STRAIN beräknas utifrån fallviktsdata.

Indata till de sprickpropageringsmodeller som utvecklats är antingen ackumulerade antalet standardaxlar (N100) eller ackumulerat antal år sedan senaste be-läggningensåtgärd vid besiktningstillfället samt sprickindex vid aktuellt besiktningstillfälle.

Samtliga modeller har validerats med hjälp av oberoende data.

Pavement deterioration – Crack initiation and crack propagation models

by Lars-Göran Wågberg

Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI)

SE-581 95 Linköping Sweden

Summary

The models meet the requirements to be used in Pavement Management Systems

The objective of this study was to develop models for predicting the cumulative number of load applications to the initiation of cracking for flexible pavements and to develop models for predicting crack propagation in flexible pavements. Crack initiation was defined as the first appearance of cracking in the wheel paths.

The models are aimed for use in Pavement Management Systems. Data used in the study consisted of data from a Swedish LTPP study where over 600 test sections have been monitored during more than ten years. Every year a detailed distress survey, measurements of rut depth and the longitudinal profile have been carried out at each test section. The database contains information about traffic, climate, pavement structure, surface condition and structural strength. Pavement response based explanatory factors included, among other things, tensile strain at the bottom of the asphalt layer and other deflection based factors (i.e. surface curvature index, curvature basin factor, bearing capacity).

The modelling of crack initiation models was carried out using a survival analysis approach. The results showed that data came from a Weibull distribution with an increasing risk of failure as pavement age increases. The modelling of crack propagation models was carried out using linear regression analysis. From the data, describing the yearly development of cracks, a Cracking Index was calculated. The same approach of developing crack models was used in the PARIS (Performance analysis of road infrastructure) project carried out within the 4th European Framework Programme Road Transport 1996-1998.

Models were successfully developed to predict the cumulative number of traffic loading to the initiation of cracking in the wheel paths. The models included two independent variables to pavement response and ageing (a relationship between a response variable and the annual cumulative number of traffic loading). As response variables Surface Curvature Index 300 or Tensile Strain at the bottom of the asphalt layer can be used in the crack initiation models.

Models were also developed to predict crack propagation in the wheel paths. For any given section of road, the slope of the linear model can be estimated from the level of distress at the last distress survey and the age of the pavement surface or the number of ESALs carried by the pavement at that time.

All models have been validated against independent data, not used in the development phase. The results of the validation process show that the models meet the requirements for models to be used in Pavement Management Systems.

1 Introduktion

Det är ofta svårt för en väghållare att motivera och generera monetära medel för underhåll av befintliga gator och vägar. Det har medfört att en stor del av våra vägar i Sverige uppvisar ett växande eftersatt underhåll. Investering i nya vägar är i grunden ofta politiska beslut som fattas utifrån många aspekter. För att motivera medel till beläggningsunderhåll krävs däremot i regel någon form av konsekvensbeskrivning av det framtida scenariot vid oförändrade, minskade eller uteblivna medel för underhållsåtgärder. Det ställs också höga krav på prioritering och planering för att använda tilldelade medel på ett optimalt sätt.

För att åstadkomma konsekvensbeskrivningar, prioriteringar och planering av underhållsverksamheten behövs ett väl fungerande planeringssystem för underhåll av gator och vägar. Ett planeringssystem består huvudsakligen av två delar; en administrativ del som hanterar beräkningar, prioriteringar, optimeringar, resultatpresentationer m.m. samt en del som består av prognosmodeller för olika vägkonstruktioners tillståndsutveckling och livslängd. Den administrativa delen av ett planeringssystem är av mer allmän karaktär, vilket innebär att systemet inte nödvändigtvis behöver utvecklas inom en specifik region eller land.

Prognosmodellerna, som utgör grunden för ett väl fungerande planeringssystem, måste dock utvecklas av data som är representativa för den region eller nation där planeringssystemet skall användas. För att utveckla prognosmodeller som på ett tillfredsställande sätt beskriver tillståndsförändringen och i ett tidigt skede förutsäger en beläggningsåtgärds eller vägkonstruktions livslängd ställer stora krav, både kvalitativt och kvantitativt, på de data som bildar underlag för modellerna.

Prognosmodeller för svenska förhållanden måste grundas på ett antal delmodeller som beskriver utvecklingen av spår och sprickor samt ojämnheter i vägens längdriktning. Modellerna måste skilja på den spårbildning som orsakas av trafik med dubbdäcksförsedda fordon och av tung lastbilstrafik. Modeller för sprickprognoser bör dels omfatta tidpunkten för den första sprickans tillkomst (sprickinitiering), dels hur sprickorna därefter utvecklas beträffande svårighetsgrad och utbredning (sprickpropagering).

2 Målsättning

Målsättningen med det forskningsarbete som beskrivs i denna rapport har varit att utveckla prognosmodeller som beskriver den strukturella nedbrytningen, i form av sprickinitiering och sprickpropagering. Modellerna gäller för vägkonstruktioner med grus/bitumenöverbyggnad (GBÖ). Eftersom modellerna är tänkta att användas i system för planering av förstärknings- och underhållsåtgärder är det mycket viktigt att de variabler som ingår i modellerna är kända eller relativt lätt tillgängliga. Detaljerade data om specifika materials olika egenskaper eller detaljer om asfaltbeläggningarnas sammansättning och egenskaper är normalt inte tillgängliga eller mycket kostsamma att fastställa.

Denna studie omfattar endast sprickor som orsakats av tung trafik. Modellerna har utvecklats med data från det nationella svenska LTPP-projektet (Long Term Pavement Performance).

Den specifika målsättningarna i denna studie har varit att:

- Undersöka effekten av förklarande variabler (vägkonstruktionens strukturella styrka, undergrundstyp, tung trafik, klimat mm) på den strukturella nedbrytningen av vägkonstruktioner med asfaltöverbyggnad.
- Utveckla nya nedbrytningsmodeller (sprickinitiering respektive sprickpropagering) för asfaltkonstruktioner.
- Validera nedbrytningsmodellerna med hjälp av oberoende data.

3 Kriterier för val av observationssträckor

All data har hämtats från de observationssträckor som ingår i det svenska nationella LTPP-programmet. De vägkonstruktioner som ingår i modellutvecklingen består av varmtillverkad asfaltbeläggning på obunden grusöverbyggnad. Observationssträckorna är 100 meter långa och uppföljningen omfattar båda körriktningarna. Normalt finns 8–12 observationssträckor på samma vägobjekt. Följande kriterier har styrat val och lokalisering av observationssträckorna:

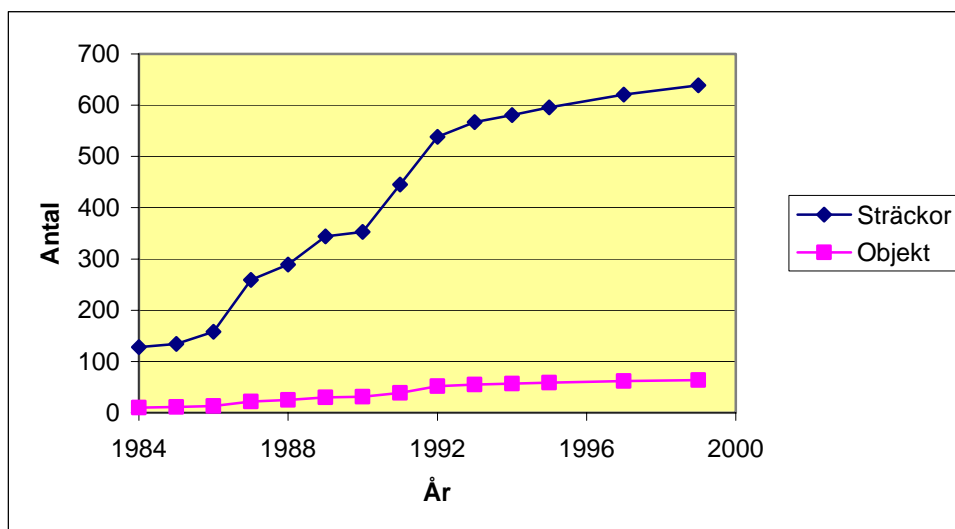
- Vägkonstruktionen skall vara byggd enligt vägverkets råd och anvisningar (BYA-76, BYA-84 respektive VÄG 94).
- Inga störande korsningar, ramper eller andra installationer som kan påverka trafikens rörelsemönster över sträckan får finnas.
- Inga större trummor får finnas på sträckan.
- Sträckorna skall i sin helhet ligga antingen på bank eller i skärning.
- Sträckor som har breddats eller på annat sätt byggts om har undvikits.

Målsättningen med detta arbete har varit att utveckla nedbrytningsmodeller som omfattar en bred variation på byggda vägar beträffande design, trafikbelastningar och klimatförhållanden. De faktorer som i första hand har bedömts vara intressanta och som bedömdes vara relevanta för vägkonstruktioners nedbrytning är:

- Tung trafik (antal ekvivalenta standardaxlar (N100) per år)
- Asfaltkonstruktionens tjocklek
- Vägkonstruktionens strukturella styrka (deflektionsdata)
- Undergrundstyp
- Klimat

4 Det nationella LTPP-programmet

Tillståndsdata har hämtats från det svenska nationella LTPP-programmet som startades år 1984 med ett begränsat antal observationssträckor. Under åren har antalet utökats kontinuerligt och uppgår, vid årsskiftet 1999/2000, till 639 st. fördelade över 64 objekt, figur 1. Placering av objekten och deras namn samt antal ingående sträckor framgår av figur 2.

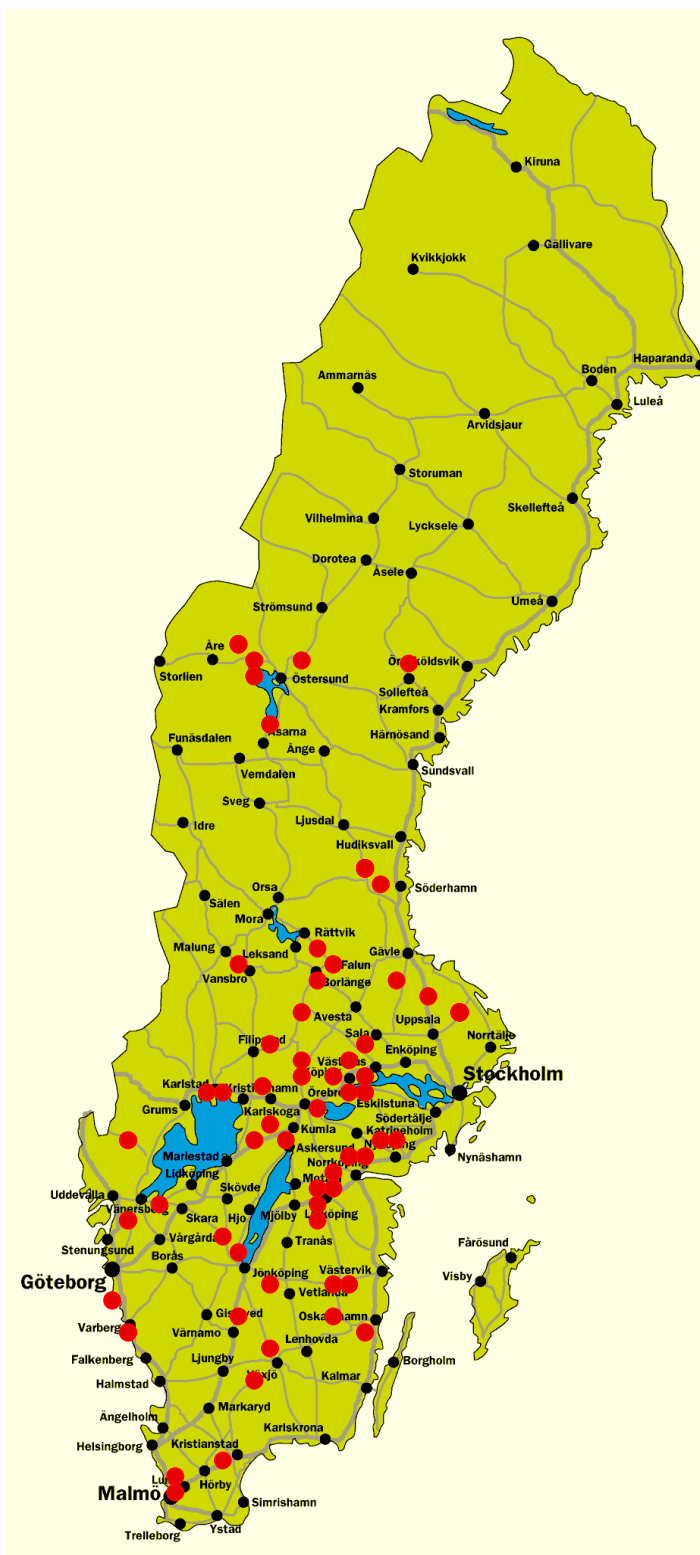


Figur 1 Antal observationssträckor respektive objekt för under åren projektet har pågått.

De tidigaste observationssträckorna var lokaliserade till norra Götaland och södra Svealand. Under årens lopp har dock spridningen över landet förbättrats något med sträckor i södra Götaland, norra Svealand och ett mindre antal i mellersta Norrland.

Eftersom dubbdäcksslitage ofta var anledningen till en underhållsåtgärd på det högtrafikerade vägnätet under 1980-talet undveks vägar av detta slag. Under senare delen av 1990-talet har dubbslitaget minskat avsevärt så det är nu möjligt att även följa upp sträckor på relativt högtrafikerade vägar.

I figur 2 på nästa sida visar de röda punkterna var i Sverige de olika uppföljningsobjekten är lokaliserade.

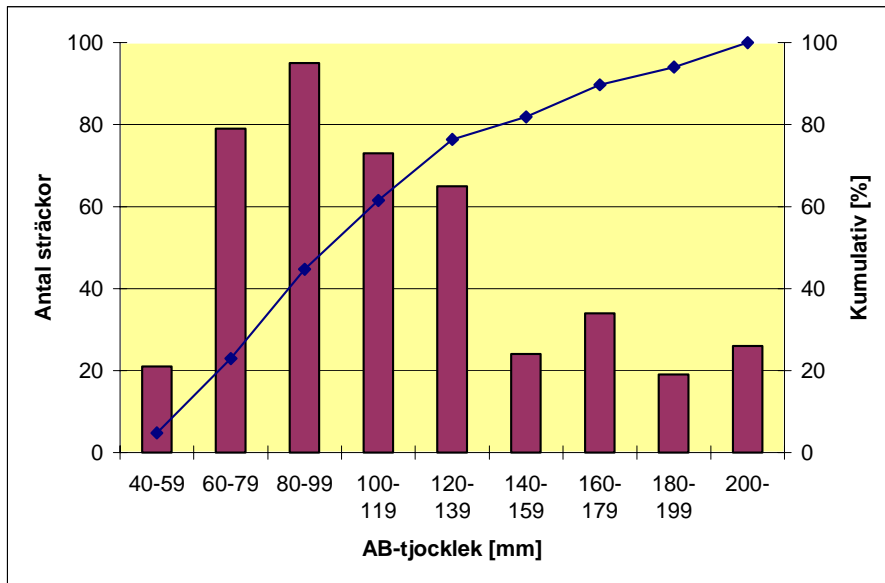


Län	Väg	Objekt	Antal
C	292	Gimo	9
C	E4	Månkarbo	10
D	20	Eskilstuna	14
D	53	Kvicksund	18
D	53	Nyköping	10
E	34	Brokind	16
E	E4	Herrbeta	17
E	1173	Rejmyre	9
E	34	Skeda Udde	15
E	34	Skeda Udde	1
E	215/1153	Skärblacka	6
E	36	Tift	12
E	55	Åby	7
F	195	Bankeryd	13
F	31	Nässjö	11
F	E4	Värnamo	21
F	E4	Värnamo	8
G	126	Moheda	11
G	23	Ålmhult	11
H	33	Ankarsrum	10
H	34	Mälilla	10
H	E22	Oskarshamn	11
H	33	Vimmerby	12
L	E22	Linderöd	12
M	103	Lund	6
M	11	Staffanstorp	9
N	E6	Frillesås	14
N	E6	Tvååker	10
P	166	Dals Ed	6
P	45	Lilla Edet	12
P	46	Trädet	9
R	44	Grästorp	10
R	E20	Hova	8
S	E18	Karlstad	13
S	E18	Kristinehamn	10
S	63	Saxån	14
T	50	Askersund	6
T	207	Hjälmarsberg	11
T	205	Laxå	8
T	205	Gällersåsen	10
T	60	Lindesberg	10
T	68	Lindesberg	11
U	252	Hallsthammar	9
U	53	Kvicksund	11
U	580	Köping	8
U	67	Sala	10
W	80	Bjursås	10
W	60	Borlänge	1
W	60	Borlänge	10
W	60	Borlänge	1
W	850	Falun	1
W	60	Ludvika	10
W	880	Svärdsjö	1
W	266	Sörbo	12
W	71	Äppelbo	7
X	83	Arbrå	10
X	301	Bollnäs	13
X	67	Hedesunda	11
Y	90	Sollefteå	8
Z	675	Kaxås	12
Z	45	Lit	10
Z	321	Mattmar	12
Z	E14	Mattmar	10
Z	45	Svenstavik	11

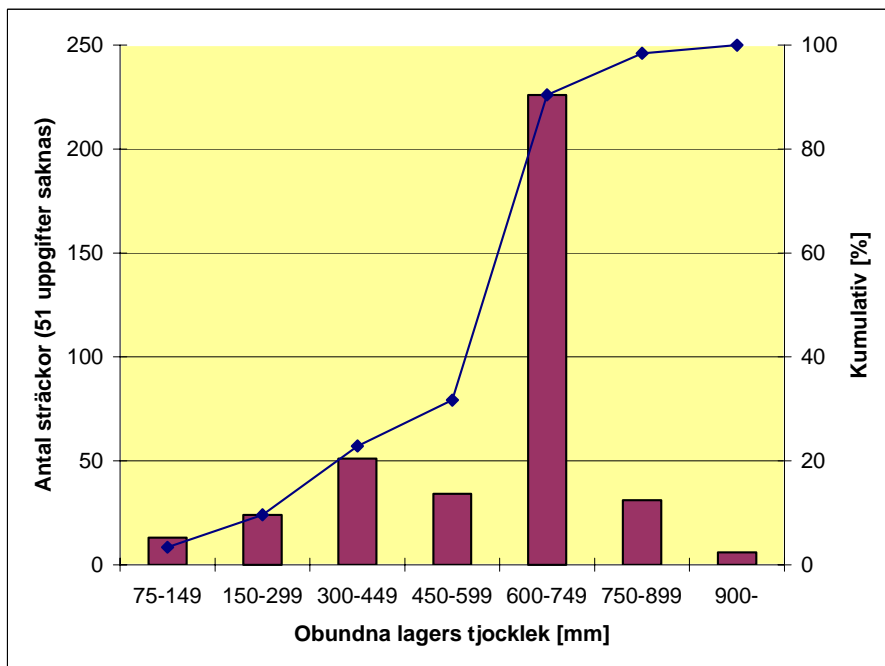
Figur 2 Observationsobjektens läge

5 Beskrivning av sträckorna

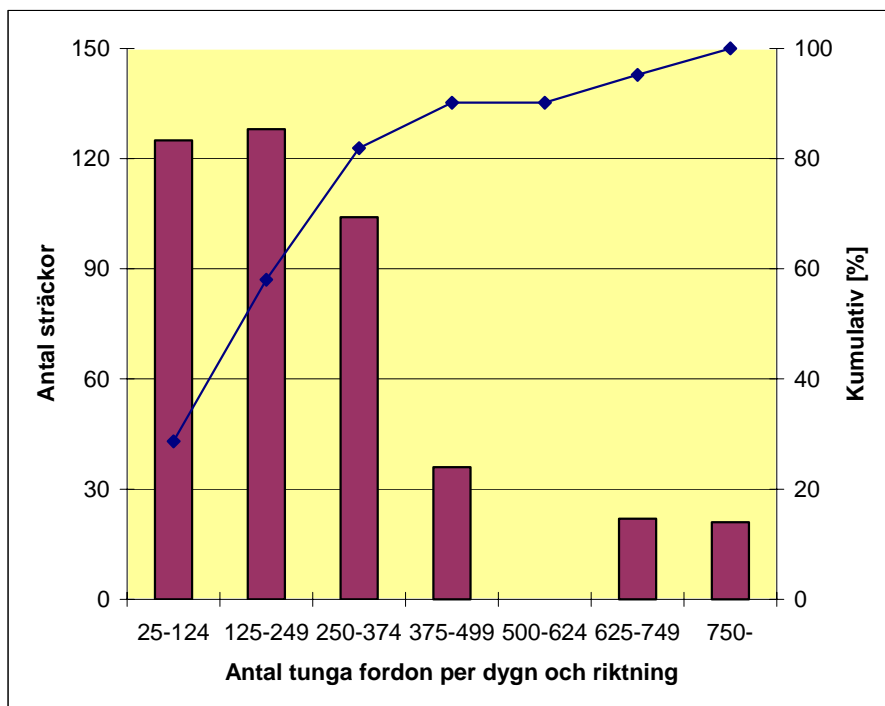
På vissa av objekten har undersökning av materiallager och materialegenskaper gjorts med hjälp av den så kallade "Underlättaren" (Vägverket Konsult). På övriga objekt har uppgifter om lagertjocklekar hämtats från bygghandlingarna. I Sverige består vanliga vägkonstruktioner av tjocka obundna lager med relativt tunna asfaltkonstruktioner. Detta förhållande illustreras av figur 3 och 4 som visar fördelningen av lagertjocklekarna på de sträckor som ingår i modellutveckling och modellvalidering.



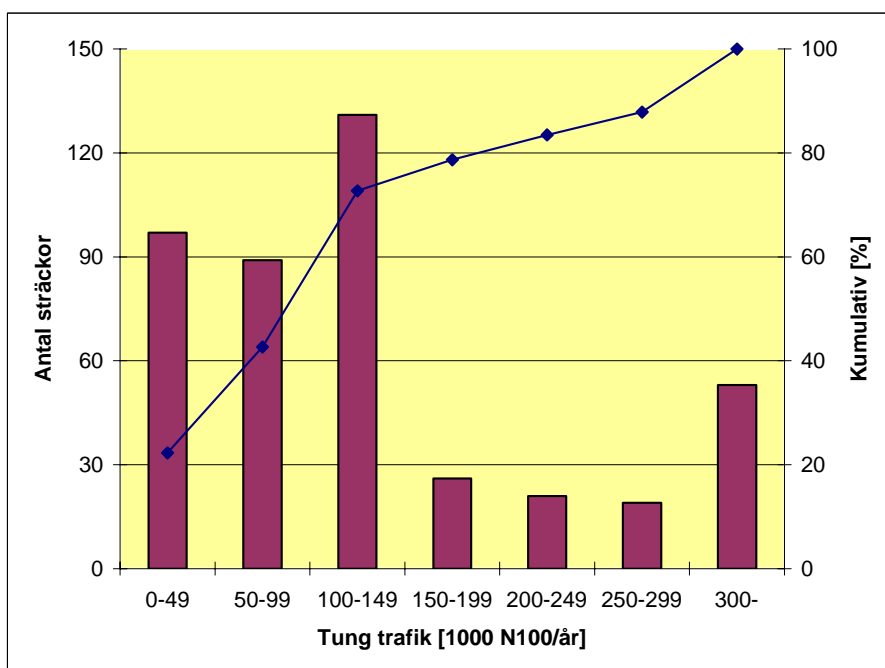
Figur 3 Asfaltlagrens tjocklek på observationssträckorna.



Figur 4 De obundna lagrens tjocklek på observationssträckorna.



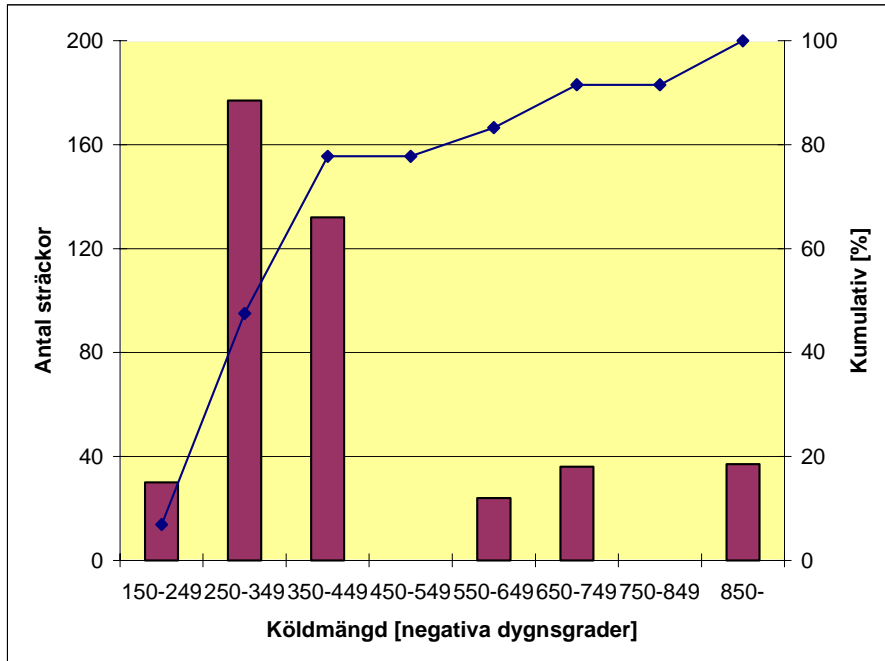
Figur 5 *Fördelningen av antal tunga fordon per dygn och riktning.*



Figur 6 *Fördelningen av antalet ekvivalenta standardaxlar (N100) på observationssträckorna.*

Figur 6 visar fördelningen av ackumulerade antalet ekvivalenta standardaxlar (N100).

Köldmängden mäts i negativa dygnsgrader och uppgifterna har hämtats från SMHI. Som framgår av figur 7 har de flesta vägobjekten mellan 150 och 450 negativa dygnsgrader (Götaland och södra Svealand). Några vägobjekt i norra Sverige har en köldmängd som ligger mellan 500 och 850 negativa dygnsgrader (norra Svealand och mellersta Norrland).



Figur 7 Köldmängden angiven i negativa dygnsgrader på observationssträckorna.

6 Mätprogram

Mätning med vägytemätbil och okulär besiktning görs minst en gång om året på alla sträckor inom LTPP-programmet. Fallviktsmätning och tvärprofilmätning görs före och efter varje beläggningsåtgärd. Målsättningen är att genomföra en trafikmätning på varje vägobjekt minst en gång vart fjärde år.

6.1 Mätning av vägytan med vägytemätbil



Figur 8 VTI:s vägytemätbil som används för vägytemätningar i det svenska LTPP-programmet.

VTI:s vägytemätbil har i standardversionen 17 st. avståndsmätande lasrar som används för att registrera ojämnheter i tvärled. Med VTI:s vägytemätbil finns dessutom möjligheten att använda 19 st. fast monterade lasrar. Mätbredden med 17 st. lasrar är 3,2 m, medan 19 st. lasrar ger 3,6 meters mätbredd. En registrering av tvärprofilen sker var 10:e cm i färdriktningen, varefter bl.a. spårdjupet beräknas med hjälp av den så kallade trådprincipen. Medelvärde för respektive sträcka och körriktning erhålls. Dessutom videofilmas mätobjektet samtidigt som mätning sker. Kameran är placerad ovanpå mätbilen och riktad framåt. Bilden visar samtidigt ett urval mätdata.

Från och med hösten 1995 utökades den insamlade mängden data som beskriver ojämnheter i längdled till att även omfatta hela längdprofilen, med registrering var 10:e cm. Tidigare beräknades endast IRI.

Den ordinarie mätningen utförs normalt på hösten medan de objekt som ska åtgärdas även mäts på våren. Sträckorna mäts alltid minst två gånger med 17 st. lasrar, varefter spårdjupet beräknas med data från 11 respektive 17 st. lasrar. Drygt hälften av sträckorna mäts dessutom minst två gånger med 19 st. lasrar, varefter spårdjupet beräknas med data från 15 respektive 19 st. lasrar. Vid utvärderingen jämförs data från mätningarna och riktigheten kontrolleras. I databasen sparas de mätningar, för lika antal lasrar, som givit störst spårdjup.

6.2 Mätning med fallvikt KUAB–FWD



Figur 9 VTI:s fallviktsutrustning tillverkad av KUAB.

Mätningarna med fallvikt, tillverkad av KUAB, har utförts av VTI. Fallvikten är uppbyggd enligt tvåmassesystemet och utrustad med en delad belastningsplatta som mäter 30 cm i diameter. Mätningarna har utförts, i höger hjulspår, i fem sektioner per sträcka. Vid slag nummer 3 registrerades kraften (fallhöjd vald så kraften hamnar omkring 50 kN) samt nedsjunkning i belastningscentrum samt 200, 300, 450, 600, 900 och 1200 mm från centrum. Dessutom har lufttemperaturen, beläggningsens yt- respektive inre temperatur registrerats.

Mätningar har alltid utförts sent på våren före åtgärd samt vår och höst året efter åtgärd. Nyttillkomna objekt mäts vår och höst det första året.

6.3 Mätning av tvärprofil



Figur 10 VTI:s tvärprofilmätare PRIMAL

VTI:s profilmätare PRIMAL används vid dessa mätningar. Tvärprofilen mäts med ett på en mätvagn monterat mät hjul som registrerar ytans profil i förhållande till en från mottagarstativet projicerad laserstråle. Utrustningen placeras ut vid 5 förutbestämda sektioner i vardera körriktningen. Tvärsektionerna kan efter registrering ritas upp i diagramform vilket gör att spår djup, spårarea och spårvidd lätt kan bestämmas. Mätningar utförs på våren före åtgärd samt efter åtgärd. Nya objekt mäts vår eller höst det år uppföljningen startar.

6.4 Okulär bedömning av tillståndet



Figur 11 Skadebesiktning av observationssträckor.

Varje sträcka tillståndsbedöms en gång om året genom en noggrann besiktning till fots. Varje enskild skada eller defekt mäts in i längdled med hjälp av ett distansmätthjul. Av säkerhetsskäl bedöms skadan/defektens sidoläge från väggkanten. Som grund för skadebedömningen används en skadekatalog (Bära eller brista, Wågberg, 1991).

Följande skador/defekter noteras:

- Längsgående spricka i spår
- Tvärgående spricka i spår
- Spricka i spårkant
- Krackelering
- Spricka ej i spår (exempelvis tjälspricka)
- Fogspricka i vägmitt
- Fogspricka i väggkant
- Spricka tvärs vägen
- Spricka på vägren
- Slaghål
- Stensläpp
- Blödning
- Separation
- Lappning
- Försegling



Varje skada/defekts svårighetsgrad (1-3) fastställs, enligt "Bära eller brista".

Varje skada/defekts läge i längd- och sidled ritas in i ett protokoll. Svårighetsgraden för varje skada noteras.

Den ordinarie besiktningen utförs normalt på hösten medan de objekt som ska åtgärdas under sommaren även besiktigas på våren. Under senare år har även sträckor som har en ytbehandling som slitlager besiktigats på våren. Anledningen till detta är att sprickor lätt läks ihop av ytbehandlingens bindemedel under varma somrardagar. Alla data om varje skada/defekt överförs till en databas där olika skadeindex kan beräknas.

Samtliga besiktningar har under årens lopp genomförts av, inte fler än, tre erfarna vägtekniker vilket innebär att all besiktningsdata håller en mycket hög och jämn kvalitet.

6.5 Mätning av trafikmängden

I första hand utnyttjas data från VV:s fasta mätstationer om någon finns i direkt anslutning till observationssträckorna. VTI:s utrustning för differentierad trafikräkning används i avsaknad av fasta mätstationer. Insamling av data sker under två normaldygn (tisdag – torsdag) på hösten ungefär vart fjärde år.

6.6 Databas med mätdata

Efter en noggrann kvalitetskontroll har samtliga data lagrats i ett databassystem, Microsoft Access. Databasen, som är en relationsdatabas, innehåller en stor mängd mätdata och andra uppgifter om observationssträckorna. All mätdata och alla uppgifter finns registrerade som enskilda poster, men är uppdelade i flera tabeller, som kan länkas med så kallade frågor. Frågorna används även vid urval, grupperingar och beräkningar.

Inom systemet finns även möjlighet att utforma formulär och rapporter. Följande tabeller ingår i databasen:

Tabell 1 Beskrivning av databasens tabeller med innehåll och antal poster våren år 2000.

Tabell	Poster	Innehåll
Objekt *	64	Läge, klimat m.m. för varje objekt
Sträcka *	640	Undergrund, överbyggnad m.m. för varje sträcka
Åtgärd *	2 700	Asfaltbundna lager för varje sträcka
FWDpunkter *	38 000	Fallviktsdata från varje mätpunkt
RST-11	13 000	Data för varje sträcka, riktning och mättillfälle; 11 st. lasrar, 3.2 m
RST-15	3 400	Data för varje sträcka, riktning och mättillfälle; 15 st. lasrar, 3.6 m
RST-17	3 300	Data för varje sträcka, riktning och mättillfälle; 17 st. lasrar, 3.2 m
RST-19	1 900	Data för varje sträcka, riktning och mättillfälle; 19 st. lasrar, 3.6 m
Profillinjer	20 000	Tvärprofildata från varje mätsektion
Trafikårsmedel *	620	Trafikdata från varje sträcka
Besiktningar *	36 000	Varje enskild observation per sträcka
Väderårsmedel *	1 800	Årssammanställning för närbelägen SMHI-station
Sprickindex *	6 000	Beräknat sprickindex efter grad och utbredning per sträcka

Vid utvecklingen av modellerna i denna studie har data använts från de tabeller som är märkta med ”*“.

7 Vägkonstruktionens respons på belastning

Dragtjörning i asfaltlagrens underkant är den variabel som tidigare ofta använts för att beskriva vägkonstruktionens respons på en belastning. Surface Curvature Index, SCI, är ett annat responsmått som beräknas utifrån fallviktsdata. I PARIS-projektets (Performance Analysis of Road Infrastructure) modellutveckling befanns SCI vara det bästa måttet för att beskriva konstruktionens respons på belastning. Vid utveckling av sprickinitieringsmodellen med svenska data har därför dragtjörning i asfaltlagrens underkant respektive SCI testats i varsin modell.

Deflektionsdata från givarna d0, d200, d300, d450 och d600 har temperaturkorrigerats till +20°C med korrektionsfaktorer som multipliceras med nedböjningen och som beräknats ur följande ekvationer (Harri Spoof, Sami Petäjä & Antti Ruotoistenmäki 2000):

$$k_{d0} = 1 - (AB_{temp} - 20) * (0,0000975 * AB_{tjkl})$$

$$k_{d200} = 1 - (AB_{temp} - 20) * (0,0000598 * AB_{tjkl})$$

$$k_{d300} = 1 - (AB_{temp} - 20) * (0,0000517 * AB_{tjkl})$$

$$k_{d450} = 1 - (AB_{temp} - 20) * (0,0000476 * AB_{tjkl})$$

$$k_{d600} = 1 - (AB_{temp} - 20) * (0,0000408 * AB_{tjkl})$$

där

AB_{temp} = Asfaltbelägningens inre temperatur vid mättillfället, °C

AB_{tjkl} = Asfaltbelägningens tjocklek, mm

Anledningen till att deflektionsdata korrigerats till +20°C är att deflektionsdata i PARIS-projektet korrigerades till just den temperaturen.

Givare som sitter längre från d0 än 600 mm behöver inte temperaturkorrigeras.

7.1 Surface Curvature Index, SCI

Surface Curvature Index är ett mått på vägkonstruktionens respons på belastning och beräknas som skillnaden mellan deflektionen i centrumpunkten, d0, och deflektionen i någon av de övriga punkterna. SCI har beräknats från fallviktsdata enligt följande:

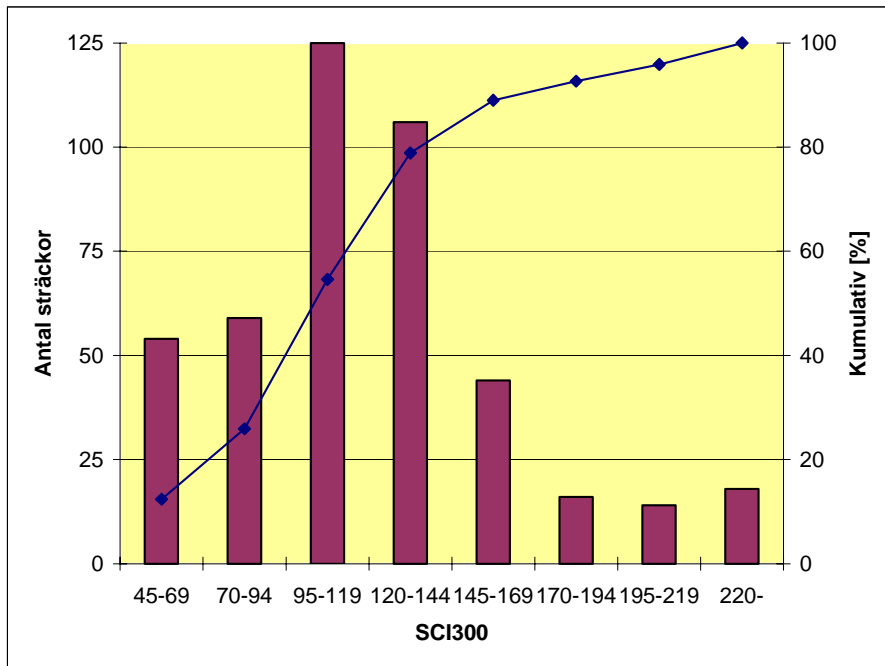
$$SCI300 = d0 - d300$$

där

d0 = deflektionen i belastningscentrum, µm

d300 = deflektionen 300 mm från belastningscentrum, µm

Andra SCI-mått har testats i undersökningen men SCI300 har visat sig vara den mest användbara variabeln i modellutvecklingsarbetet.



Figur 12 Fördelning av SCI300 (μm) på observationssträckorna.

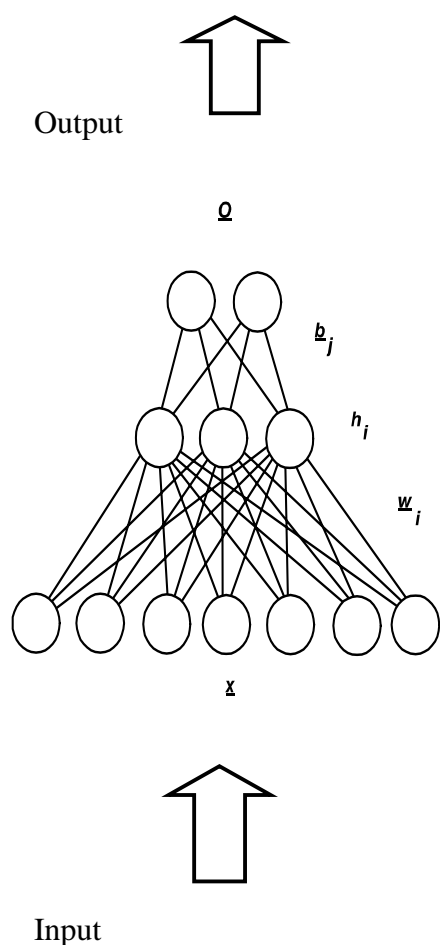
Som framgår av diagrammet i figur 12 varierar SCI300 mellan 45 och drygt 220 μm . Ju lägre värde på SCI300 desto styvare är konstruktionen.

7.2 Dragtjorning i asfaltlagrens underkant

Den horisontella dragtjorningen i asfaltlagrens underkant beräknas vanligtvis med ett datorprogram, exempelvis BISAR, som använder en linjär elastisk modell. Vid beräkning av dragtjorningen i asfaltlagrens underkant används tjockleksmått på vägkonstruktionens olika lager samt lagermoduler. Lagermodulerna erhålls genom så kallad bakåträkning med fallviktsdata, lagertjocklekar m.m. som indata. MODULUS är ett beräkningsprogram som ofta används för denna operation.

De bakåträknade lagermodulvärdena har en signifikant effekt på den beräknade tjorningen i asfaltlagrens underkant. För att uppnå realistiska uppskattningar av en vägkonstruktionens olika lagermoduler genom bakåträkning krävs lång erfarenhet och god kunskap om datorprogrammets uppbyggnad och funktion. Ofta är inte heller vägkonstruktionens olika lagertjocklekar kända med tillräcklig säkerhet. Erfarenheten är att resultatet av en bakåträkning ofta är svårtolkad, framför allt på konstruktioner med relativt tunna asfaltlager vilka är typiska för svenska förhållanden.

För att undvika osäkerheter relaterade till bakåträknade lagermoduler och tjorningar användes i denna studie en beräkningsmodell baserad på neurala nätverk i vilken den uppmätta sjunktratten respektive lagertjocklekar användes som indata vid tjorningsberäkningarna. Modellen är en icke-linjär modell för neurala nätverk och är utvecklad av Jokinen (Jokinen 1991).



Figur 13 DCA-nätverkets struktur (Jokinen 1991).

där \underline{x} = inmatningslager (input)
 \underline{w}_i = vikten för inmatningslager till det dolda lagret
 h_i = noder i det dolda lagret
 \underline{b}_j = vikter för noder i det dolda lagret
 \underline{o} = utmatningslager (output)

Inlärningsprocessen för ett DCA (Dynamic Capacity Allocating) nätverk baseras på kända in- och utdata. De indata som används för att "lära" nätverket består av simulerade tjockleks- och styvhetsmoduldata vilka framgår av tabell 2. Töjningar (utdata) beräknades för alla kombinationer av variabler ($3^7=2187$) med hjälp av BISAR- programmet.

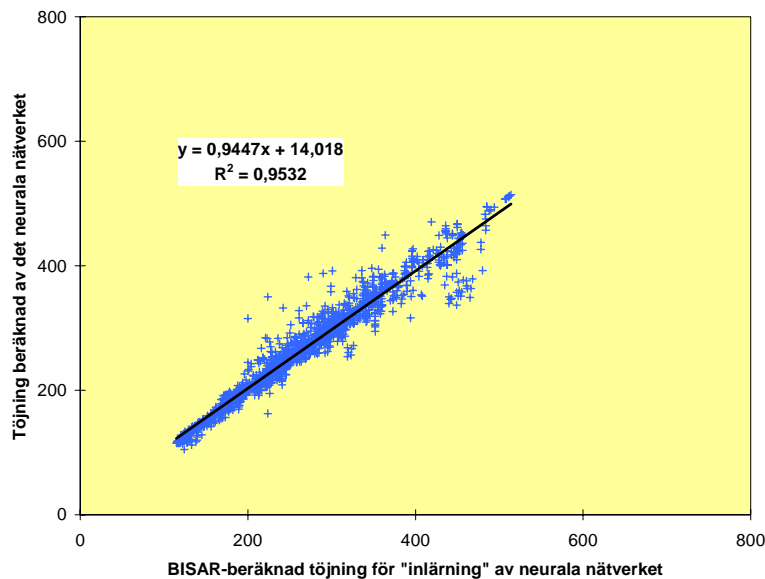
Tabell 2 Simulerade inputdata till DCA-nätverket (Halonen et al. 1996 Ruotoistenmäki & Spoof 1997)

ASFALTLAGER		BÄRLAGER		FÖRSTÄRK- NINGSLAGER		UNDERGRUND
Tjocklek	Modul	Tjocklek	Modul	Tjocklek	Modul	Modul
mm	MPa	mm	MPa	mm	Mpa	MPa
50	2000	100	200	400	120	20
100	5000	200	280	800	200	110
150	8000	300	360	1200	280	200

Korrelationen mellan de töjningar som beräknats med hjälp av BISAR och de töjningar som det neurala nätverket beräknat med hjälp av indata om sjunktratten och asfaltlagertjockleken från respektive sträcka visas i figur 14.

Av diagrammet i figur 14 framgår att förklaringsgraden är mycket god, $R^2 = 0,95$, mellan töjningarna beräknade enligt de två förfaringssätten. Fördelarna med att använda neurala nätverksmodeller är att de osäkerheter som är förknippade med bakåträkning av styvhetsmoduler för alla bundna och obundna lager undviks.

Töjningarna i asfaltlagrets underkant har därför beräknats med hjälp av det neurala nätverket på deflektionsdata från observationssträckorna..

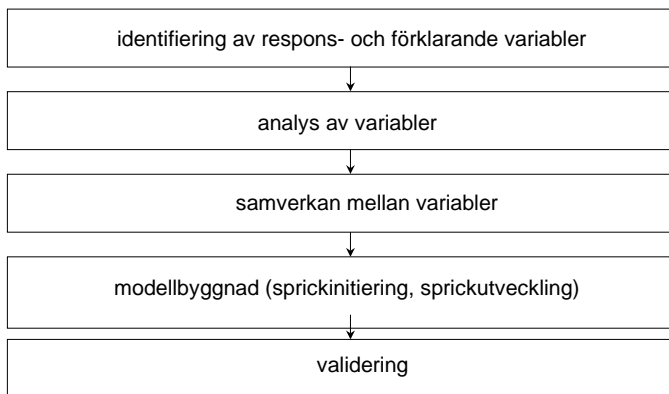


Figur 14 Neural nätverksmodell baserad på simulerade beläggningsdata för bestämning av töjningen i asfaltlagrets underkant som beräknats från deflektionsdata från fallviktmätning med KUAB fallvikt. Deflektionsdata och asfaltlagrets tjocklek har använts som inlärningsdata (Jämsä 2000).

8 Utveckling av prognosmodeller

8.1 Kontroll och analys av data

Ett systematiskt angreppssätt användes vid utvecklingen av nedbrytningsmodellerna i denna studie. De olika modelleringsfaserna som använts i studien framgår av figur 15. För det första identifierades respons (beroende) och förklarande (oberoende) variabler från databasen. Efter det kontrollerades och värderades data genom att både respons och förklarande variabler analyserades oberoende av varandra. För att utforska ett eventuellt beroendeförhållande mellan två variabler genomfördes en analys av eventuell samverkan mellan variablerna. Utvecklingen av nedbrytningsmodeller är gjort i modellbyggnadsfasen. Modellerna valideras slutligen mot oberoende data.



Figur 15 Flödesschema för utveckling av nedbrytningsmodeller.

8.1.1 Identifiering av responsvariabler och förklarande variabler

De förklarande variabler (oberoende) som använts vid utvecklingen av sprickinitieringsmodellen är variabler som innehåller information om trafikbelastning, klimat, vägkonstruktionen, undergrund, vägkonstruktionens respons på belastning och den senaste beläggningsåtgärdens ålder:

- trafik
 - årlig medeldygnstrafik (ÅDT)
 - årligt antal ackumulerade ekvivalenta standardaxlar (N100)
 - andel tunga fordon
- vägens konstruktion
 - lagertjocklekar (asfaltlager, bärlager, förstärkningslager)
- konstruktionens respons
 - uppmätt deflektion, strukturell styrka
 - beräknat SCI (Surface Curvature Index)
 - beräknad dragtöjning i asfaltlagrens underkant
- konstruktionens ålder
- klimat
 - årlig medelköldmängd
 - årlig ackumulerad köldmängd
 - årlig medelnederbörd
 - ackumulerad nederbörd
- Samverkan mellan variabler

Den responsvariabel (beroende variabel) som använts vid modellutvecklingen är antalet ackumulerade ekvivalenta standardaxlar (N100) fram till initiering av den första sprickan (synlig på ytan) i hjulspåren. Det innebär att modellen gör en prognos av hur många belastningar i form av det ackumulerade antalet ekvivalenta standardaxlar (N100) en beläggningskonstruktion kan klara innan sprickor uppträder i beläggningsytan.

Vid utvecklingen av sprickpropageringsmodeller användes dels antalet standardaxlar (N100), dels beläggningsåtgärdens ålder som beroende variabel.

8.1.2 Analys av variabler

Syftet med att analysera alla variabler individuellt var att:

- Undersöka fördelningen av varje variabel (normalfördelning, skev fördelning m.m.)
- Identifiera luckor i datamängden
- Identifiera och kontrollera extrema värden

Varje enskild variabel analyserades med avseende på medelvärde, standardavvikelse, varians, variationskoefficient m.m. Varje variabels fördelning analyserades. Önskemålet är ofta att variabeln skall vara helt eller nära normalfördelad. Om en variabel har en skev fördelning kan variabeln transformeras, exempelvis genom logaritmering (\log_{10}), till en mer normalfördelad logaritmerad variabel. Avvikande data identifierades och kontrollerades.

8.1.3 Samband/samverkan mellan variabler

Syftet med denna analys är att undersöka om det finns samband och/eller samverkan mellan variablerna. Alla variabler plottades mot varandra i varje parkombination av ingående variabler i tvådimensionella diagram. Diagrammen visar på ett tydligt sätt om det finns samband mellan två variabler.

Vidare testades signifikansen av det linjära sambandet mellan samtliga parkombinationer (respons respektive förklarande variabler) genom Pearson's korrelationskoefficient.

8.1.4 Beräkning av sprickindex, S_i

Varje skada, i detta sammanhang belastningsbetingade sprickor, är för varje enskilt besiktningstillfälle lagrad i databasen med data som beskriver sprickans typ, svårighetsgrad, sidoläge samt en längdangivelse som beskriver var sprickan börjar respektive slutar. Sprickor som är kortare än 1 meter noteras i besiktningsprotokollet som 1 meter lång. För att göra det möjligt att hantera denna information har ett sprickindex (S_i) beräknats. Sprickindex ökar med ökad svårighetsgrad och utbredning men påverkas också beroende på typen av spricka. I detta sammanhang har endast sprickor i eller omedelbart utanför hjulspåren använts. All övrig sprickinformation har sorterats bort.

Sprickindex (Si) har beräknats enligt följande:

$$\text{Sprickindex (Si)} = 2 * \text{Kr (m)} + \text{LSpr (m)} + \text{TSpr (st)}$$

där

$$\begin{aligned} \text{Kr (Krackelering)} &= \text{Kr}_{\text{låg}} (\text{m}) + 1,5 * \text{Kr}_{\text{medel}} (\text{m}) + 2 * \text{Kr}_{\text{svår}} (\text{m}) \\ \text{LSpr (Längsgående sprickor)} &= \text{LSpr}_{\text{låg}} (\text{m}) + 1,5 * \text{LSpr}_{\text{medel}} (\text{m}) + 2 * \text{LSpr}_{\text{svår}} (\text{m}) \\ \text{TSpr (Tvärgående sprickor)} &= \text{TSpr}_{\text{låg}} (\text{st}) + 1,5 * \text{TSpr}_{\text{medel}} (\text{st}) + 2 * \text{TSpr}_{\text{svår}} (\text{st}) \\ \text{Låg, medel och svår} &= \text{svårighetsgrader enligt "Bära eller brista"}. \end{aligned}$$

Det är således varje sprickas längd som multipliceras med faktor 1 om svårighetsgraden är låg, faktor 1,5 om svårighetsgraden är medelsvår respektive 2 om svårighetsgraden bedöms som svår. När det sammanlagda sprickindexet för ett vägvagnsnitt beräknas multipliceras den sammanlagda krackeleringens längd med faktor 2. Tvärgående sprickors omfattning beskrivs i form av antal sprickor.

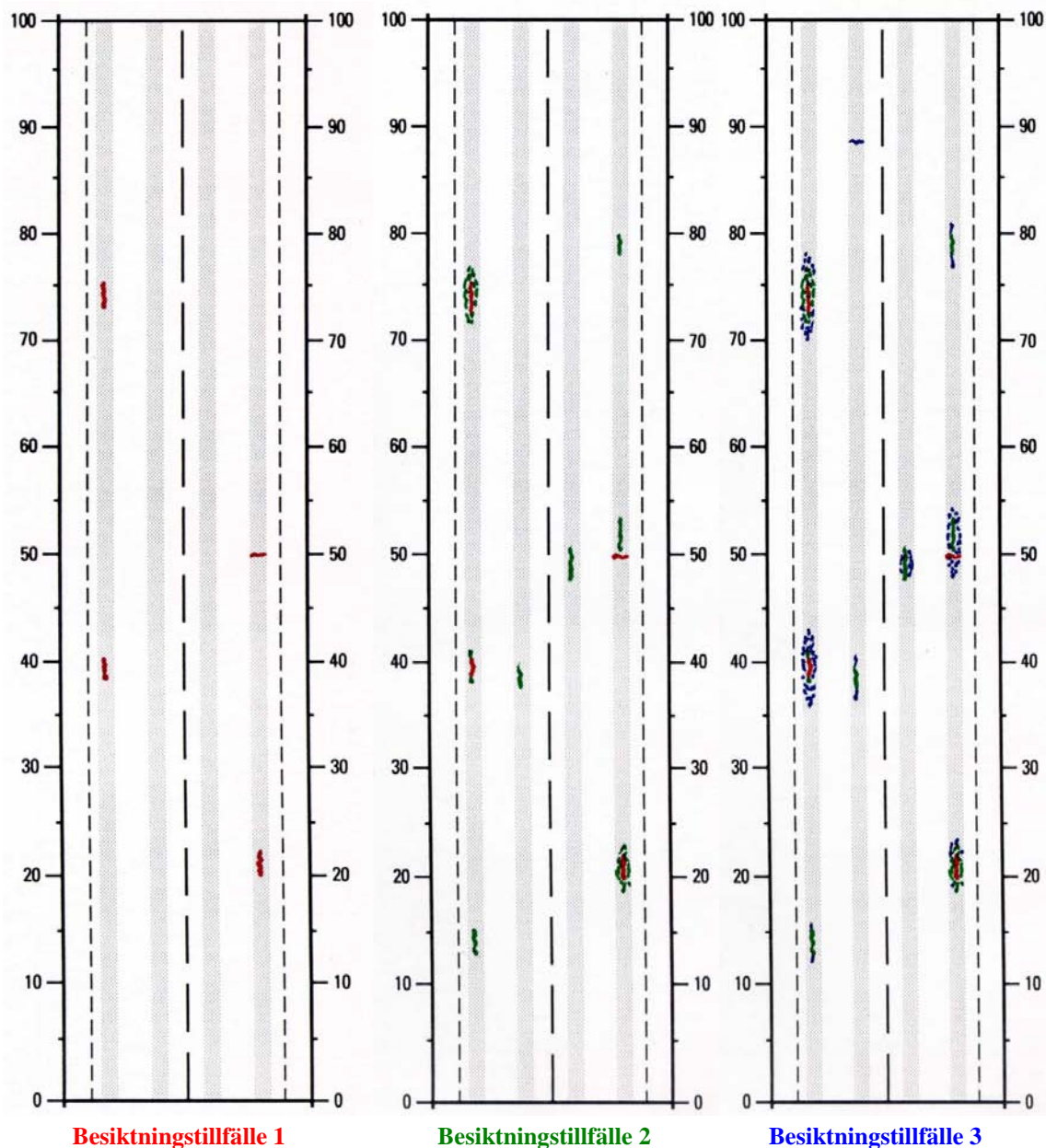
Flera olika viktningskoefficienter för både skadetyp och svårighetsgrad har kombinerats och provats under arbetets gång men de ovanstående viktningskoefficienterna och ekvationerna var de som slutligen valdes.

Anledningen till att flera viktningsssystem provades var att säkerställa en kontinuerlig utveckling av sprickindexet då exempelvis en längsgående spricka med största svårighetsgrad utvecklas till en krackelering. Högsta möjliga sprickindex per 100 m observationssträcka är $S_i = 1600$

Ett exempel på vad sprickindexets, S_i , storlek motsvarar i form av sprickbildning på en observationssträcka och hur S_i kan utvecklas mellan olika besiktningstillfällen visas i figur 15 på nästa sida.

- På rad 1 i tabellen finns vid första besiktningstillfället en längsgående spricka med låg svårighetsgrad i spåret mellan 73 och 75 meter. Denna spricka motsvarar ett sprickindex = 2,0.
- Vid nästa besiktningstillfälle har den tidigare lindriga sprickan utvecklats till en krackelering med låg svårighetsgrad mellan 71 och 77 meter. Denna krackelering ger sprickindex = 12,0.
- Vid besiktningstillfälle 3 har krackeleringen växt till en medelsvår krackelering som löper mellan 70 och 78 meter. Denna krackelering ger sprickindex = 24,0.

På motsvarande sätt illustreras tillväxten av andra typer av sprickor i skisserna och i tabellen i figur 16.



Sprickindex, $S_i = 7$

Sprickindex, $S_i = 46$

Sprickindex, $S_i = 103$

- | | | | |
|-----|----------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 1. | LSpr _{låg} , längd 2 m | Kr _{låg} , 6 m | Kr _{medel} , 8 m |
| 2. | LSpr _{låg} , 1 m | LSpr _{svår} , 3 m | Kr _{låg} , 7 m |
| 3. | | LSpr _{medel} , 2 m | LSpr _{svår} , 3 m |
| 4. | | | TSpr _{låg} , 1 st |
| 5. | | LSpr _{låg} , 2 m | LSpr _{medel} , 4 m |
| 6. | | LSpr _{låg} , 3 m | Kr _{låg} , 3 m |
| 7. | | LSpr _{låg} , 2 m | LSpr _{svår} , 4 m |
| 8. | | LSpr _{medel} , 3 m | Kr _{medel} , 6 m |
| 9. | TSpr _{låg} , antal 1 st | TSpr _{medel} , 1 st | |
| 10. | LSpr _{medel} , 2 m | Kr _{medel} , 4 m | Kr _{svår} , 5 m |

Figur 16 Exempel på storlek och utveckling av sprickindex mellan olika besiktningstillfällen.

8.1.5 Urval av data

För utveckling av sprickinitieringsmodellen med SCI300 användes data från 384 st. observationssträckor. För validering av modellen utvaldes 65 st. andra observationssträckor som inte ingick i modellutvecklingen. Valet av sträckor för validering skedde slumpmässigt med en viss styrning för att urvalet skulle bli representativt.

För utveckling av initieringsmodellen med STRAIN (dragtöjningen i asfaltlagrens underkant) användes färre data, 214 st., beroende på att viss data saknades för att beräkna dragtöjningen. Samma sträckor användes dock för validering av båda modellerna.

8.2 Metodik för utveckling av sprickinitieringsmodell

Modeller för beräkning av sprickinitiering utvecklades, men begränsades i detta skede till enbart trafikrelaterade sprickor. Antalet belastningar från tunga axlar utgör den beroende variabeln. Under modellutvecklingen har ett antal kombinationer med förklarande variabler prövats.

De förklarande eller oberoende variabler som användes i analysen utgjordes av trafikinformation, klimat, vägkonstruktion och undergrund, respons hos konstruktionen, längsojämnhet, ålder samt samverkan mellan olika oberoende variabler.

Skador som uppstår som en konsekvens av vägkonstruktionens nedbrytning uppkommer normalt inte över hela vägytan samtidigt utan skadorna kommer i regel vid olika tidpunkter och på olika delar av ett vägobjekt. De partier där de första sprickorna uppträder kan bero på variationer i utförandekvalitet, lager-tjocklekar, materialegenskaper och undergrundens egenskaper, klimatfaktorer m.m. Vägkonstruktionens funktion och nedbrytning är därför ett komplicerat system där uppkomsten av sprickor är stokastisk av naturen.

Vid utveckling av nedbrytningsmodeller måste hänsyn tas till dessa förhållanden.

Tidpunkten fram till då vägen uppvisar skador kan definieras som en överlevnadstid bestämd av när en given händelse (första sprickan) inträffar. I denna studie uttrycks överlevnadstiden i antalet ackumulerade belastningar i form av ekvivalenta standardaxlar (N100). Det innebär att vägkonstruktioner uppvisar variationer beträffande tidpunkten för den först uppkomna sprickan. Överlevnadstiden har en slumpmässig variation som beskrivs av en fördelning.

Fördelningen för överlevnadstiden karakteriseras vanligtvis med tre funktioner:

- täthetsfunktion
- överlevnadsfunktion
- hasard- eller riskfunktion

Risken för att sprickor skall uppstå är större ju äldre beläggningen respektive beläggningensåtgärden är. En fördelning som beskriver variationen av överlevnadstiden med ökad risk är Weibulls fördelning.

Dess täthetsfunktion (f), fördelning av överlevnadstid (S), och hasardfunktion (h) är denna:

$$f(t) = \lambda * \gamma * (\lambda * t)^{\gamma-1} * e^{-(\lambda * t)^\gamma}$$

$$S(t) = e^{-(\lambda * t)^\gamma}$$

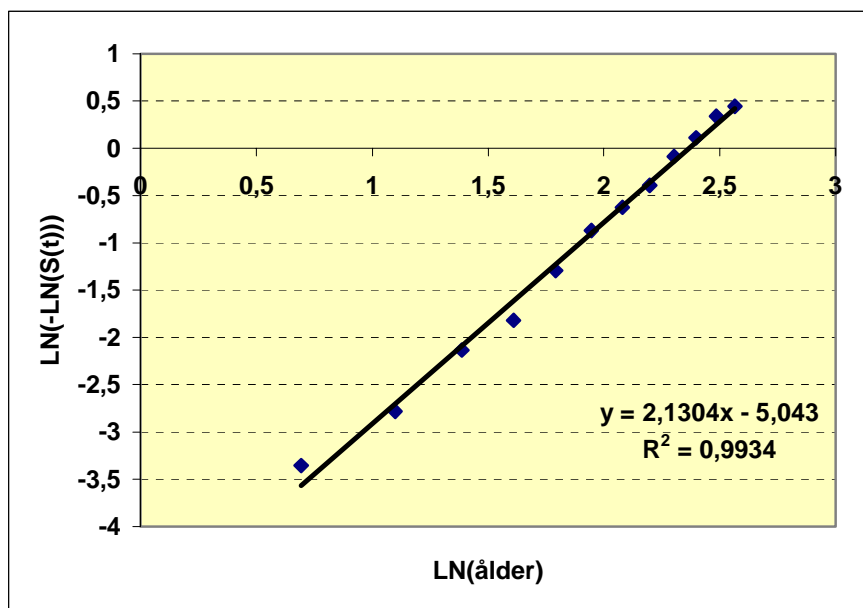
$$h(t) = \lambda * \gamma * (\lambda * t)^{\gamma-1}$$

där:

γ bestämmer formen på fördelningskurvan (formparameter)

λ bestämmer kurvans skala (skalparameter)

Resultatet av analysen visas i figur 16. Den horisontella axeln beskriver LN av antal år till belastningsbetingad sprickinitiering i hjulspåren och den vertikala axeln visar LN(-LN(S(t))) av fördelningen av överlevnadstiden S(t).



Figur 17 Resultat av analys om data följer Weibulls fördelning.

Från ovanstående diagram, figur 17, framgår att sambandet är linjärt, $R^2=0,99$, vilket bekräftar att de data som används vid utvecklingen av sprickinitieringsmodellerna följer Weibulls fördelning, dvs. att risken för uppkomst av sprickor ökar med ökad beläggningens ålder. Det visar att sprickdata från observationssträckorna följer en logisk utveckling.

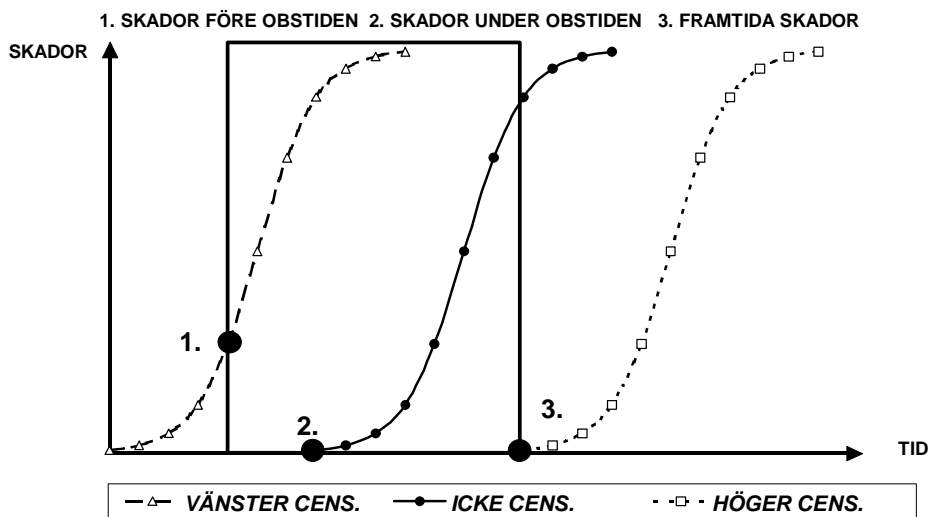
Vid insamling av tillståndsdata för användning till utveckling av tillståndsförändringsmodeller är det ideala fallet att observationssträckorna är helt utan skador då uppföljningen påbörjas och att sedan den första skadan inträffar under uppföljningstiden.

Ofta är det dock så att vissa observationssträckor redan har någon form av skador på beläggningsytan vid den tidpunkt då uppföljningen startade. Den exakta tidpunkten då de första sprickorna uppträdde är inte känd eftersom de fanns där redan vid den första skadeinventeringen. Allt som är känt är att dessa konstruktioner inte hållit längre tid (eller fler antal ackumulerade standardlaster) än till tidpunkten för den första skadeinventeringen. Data från dessa sträckor benämns vänstercensurerade data eftersom den faktiska tidpunkten för den första skadans uppträdande var tidigare, dvs. till vänster på tidsaxeln, än den första skadeinventeringen (punkt 1 i figur 18).

Å andra sidan finns det sträckor som inte uppvisar några skador under uppföljningstiden, eller att de inte uppvisade skador innan de av någon anledning åtgärdades. I detta fall är det inte känt när den första skadan kommer att uppträda på beläggningsytan. Allt som är känt är att konstruktionen har förblivit oskadd åtminstone så lång tid som uppföljningen pågått, fram till dags dato eller till den tidpunkt då konstruktionen åtgärdats av någon annan anledning än belastnings-skador. Data från dessa sträckor benämns högercensurerade data eftersom tidpunkten för den första skadan ligger senare, dvs. till höger på tidsaxeln, än den senaste skadeinventeringen (punkt 3 i figur 18).

Med vanlig regressionsanalys skulle det endast vara möjligt att använda observationer där den första skadan har uppträtt under uppföljningstiden. Det kan innebära att endast en del av alla data kan användas i analysen. Det finns emellertid en statistisk procedur benämnd "LIFEREG" som tar hänsyn till samtliga data vid analysen. "LIFEREG" ingår i SAS statistikpaket (SAS 1998).

Figur 18 illustrerar data som samlats in från observationssträckor inom en given tidsperiod och indikerar vänster- respektive högercensurerad data.



Figur 18 Illustration av censurerade och icke-censurerade data (Spoof et al. 1996).

8.3 Resultat - sprickinitieringsmodell

Den första sprickinitieringsmodellen togs fram med skadeindex, $S_i > 0$. Det innebär att den första sprickan som kan ses på observationssträckan bestämmer tidpunkten för sprickinitiering. För att minska effekten av att en liten spricka kan vara orsakad av lokala problem, vältspricka, separation eller dylikt, gjordes även en sprickinitieringsmodell där $S_i \geq 5$ sattes som gräns för sprickinitiering. $S_i \geq 5$ kan vara en fem meter lång spricka i hjulspår med låg svårighetsgrad. Skillnaden i livslängd med $S_i > 0$ respektive $S_i \geq 5$ som indikator för sprickinitiering framgår av diagram i figur 18. Sprickindex $S_i \geq 5$ valdes slutligen som definition för sprickinitiering.

I databasen fanns data från vägar som hade olika förutsättningar. Gemensamt för en grupp sträckor var att ingen underhållsåtgärd hade utförts från det vägen byggts. En annan grupp var sträckor som åtgärdats en gång och därefter följts upp genom besiktningar. En tredje grupp utgjordes av sträckor som ytbehandlats. Vid modellutvecklingsarbetet gjordes först separata modeller för respektive grupp. Det visade sig dock att skillnaden mellan grupperna var så liten att det var fullt möjligt att låta en och samma modell omfatta samtliga grupper.

De modellekvationer, med SCI300 respektive töjning i asfaltlagrets underkant som indata, som slutligen togs fram bygger på data från de tre ovan beskrivna grupperna av vägar och är beräknad med $S_i \geq 5$ som definition för sprickinitiering:

Modell med SCI300 som responsdata:

$$N_{100} = 10^{7,24 - 0,0052 * SCI300 - 5010000 * \left(\frac{1}{SCI300 * N_{100} Y} \right)}$$

där

N_{100} = ackumulerade antalet standardaxlar (N100) sedan senaste åtgärd till sprickinitiering ($S_i \geq 5$), 100kN.

SCI300 = Surface Curvature Index 300, μm .

$N_{100} Y$ = Årlig trafikbelastning (antal standardaxlar N100).

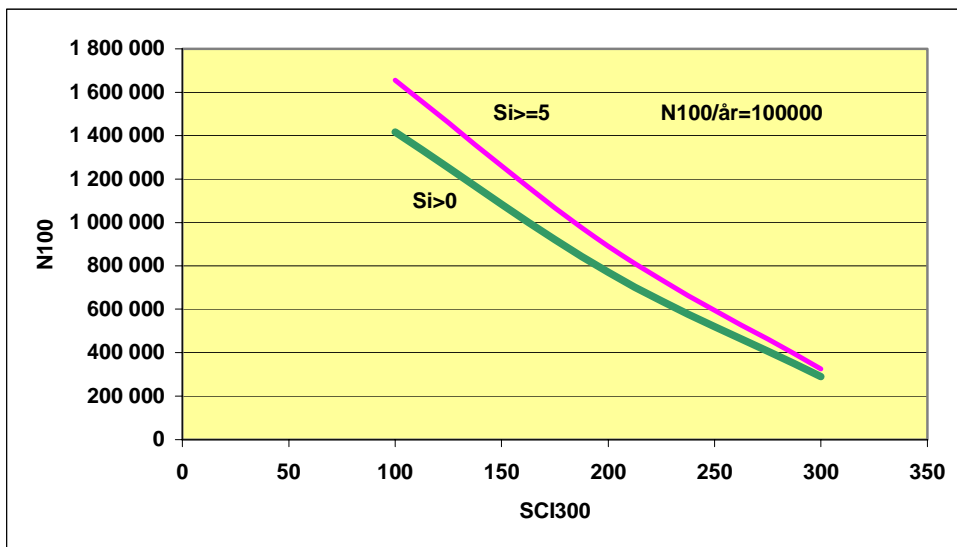
Vid analysen hade 169 st. sträckor ”icke-censurerade värden”, 34 st. ”vänster-censurerade värden” och 181 st. sträckor ”höger-censurerade värden”.

Tabell 3 Resultattabell
The SAS System Lifereg Procedure

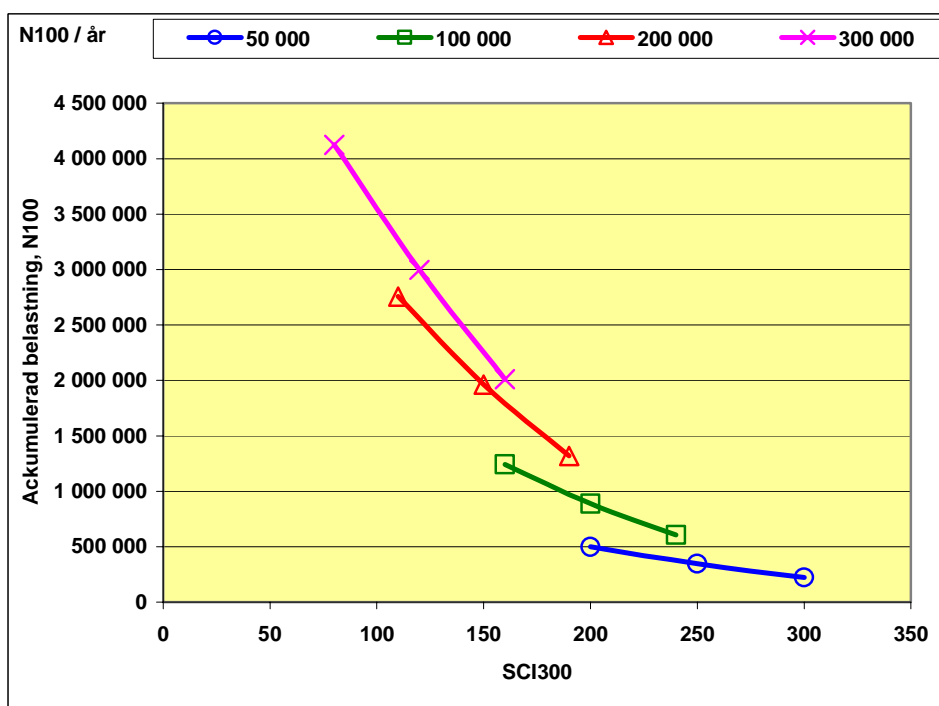
Variable	DF	Estimate	Std Err	ChiSquare	Pr>Chi
INTERCPT	1	7,23897896	0,060254	14434,11	0,0001
SCI300	1	-0,0051595	0,00035	217,0018	0,0001
HSCI300	1	-5010134,1	217116,7	532,4907	0,0001

HSCI300 i ovanstående resultattabell är en variabel som beräknats enligt följande:

$$HSCI300 = 1 / (SCI300 * N_{100} Y)$$

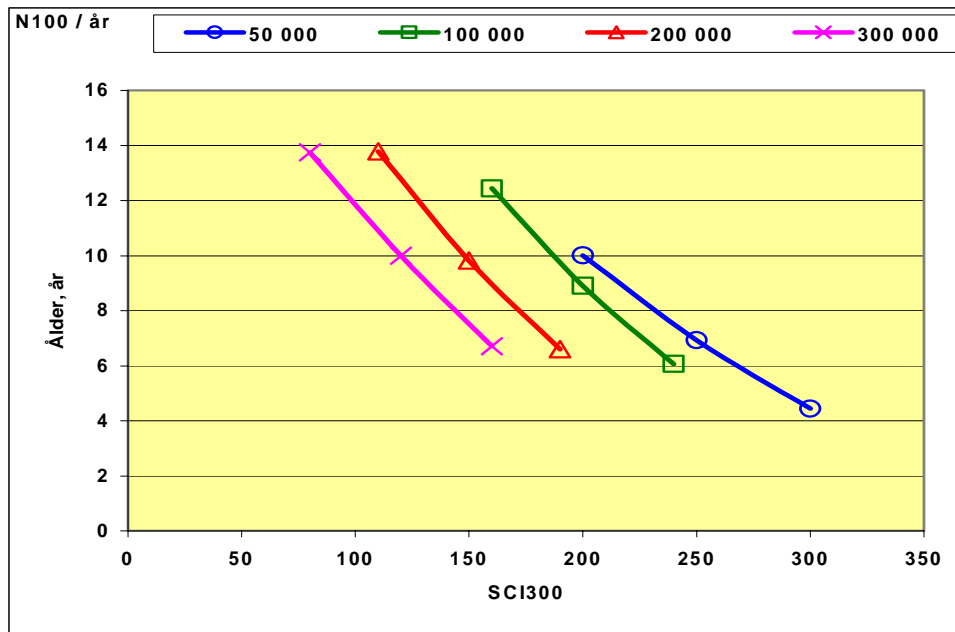


Figur 19 Samband mellan SCI300 (μm) och antal belastningar med standardaxel till sprickinitiering (definierad som $S_i > 0$ resp. $S_i \geq 5$).



Figur 20 Prognos av ackumulerat antal belastningar med standardaxel till sprickinitiering (definierad som $S_i \geq 5$) som en funktion av SCI300 (μm) och antalet standardaxlar per år.

Av diagrammet i figur 20 framgår att vägar med högre antal N100 per år tål fler belastningar vid samma SCI300. Det beror på att vägar med lägre trafik påverkas av åldringseffekten.



Figur 21 Prognos av antalet år till sprickinitiering (definierad som $S_i \geq 5$) som en funktion av SCI300 (μm) och antalet standardaxlar per år.

Modell med töjning (STRAIN) som responsdata:

$$N_{100} = 10^{7,12 - 0,0036 * STRAIN - 6412000 * \left(\frac{1}{STRAIN * N_{100} Y} \right)}$$

där

N_{100} = ackumulerade antalet standardaxlar (N100) sedan senaste åtgärd till sprickinitiering ($S_i \geq 5$), 100kN.

STRAIN = beräknad töjning i asfaltlagrens underkant, $\mu\text{m}/\text{m}$

$N_{100} Y$ = Årlig trafikbelastning (antal standardaxlar).

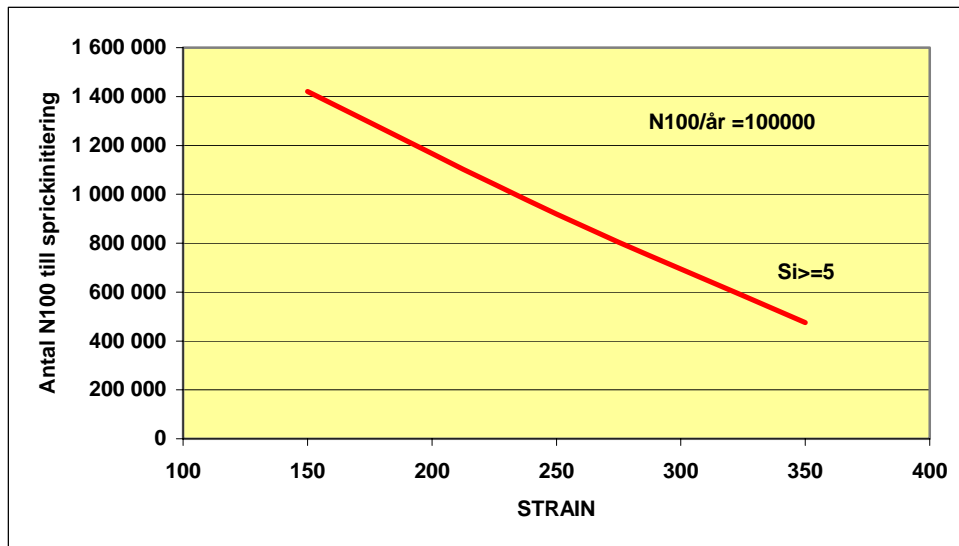
Vid analysen var 110 st. sträckor "icke-censurerade", 14 st. "vänster-censurerade" och 90 st. sträckor "högercensurerade".

Tabell 4 Resultattabell.
The SAS System Lifereg Procedure

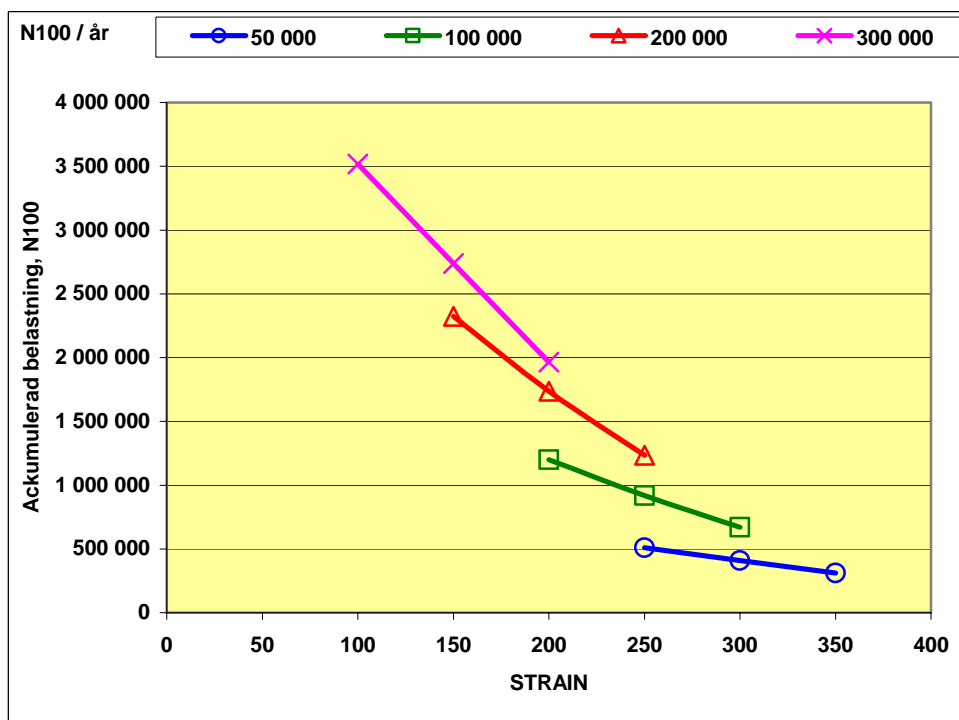
Variable	DF	Estimate	Std Err	ChiSquare	Pr>Chi
INTERCPT	1	7,11663446	0,091301	6075,687	0,0001
STRAIN	1	-0,0035884	0,000402	79,53089	0,0001
HSTRAIN	1	-6411984	344984,7	345,4499	0,0001

HSTRAIN i ovanstående resultattabell är en variabel som beräknats enligt följande:

$$HSTRAIN = 1 / (STRAIN * N_{100} Y)$$

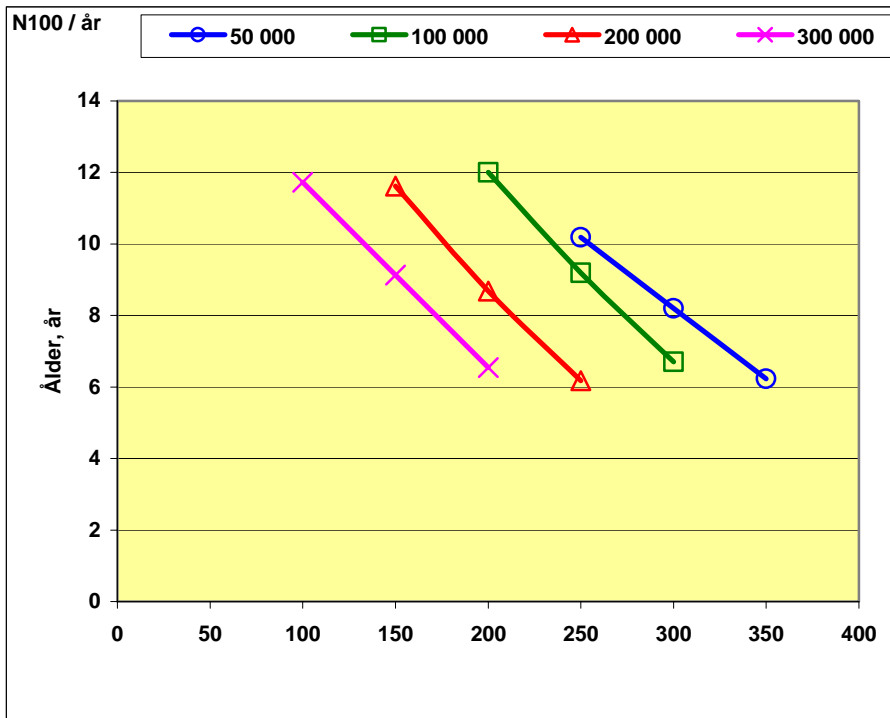


Figur 22 Samband mellan STRAIN ($\mu\text{m}/\text{m}$) och antal belastningar med standardaxel till sprickinitiering (definierad som $S_i \geq 5$).

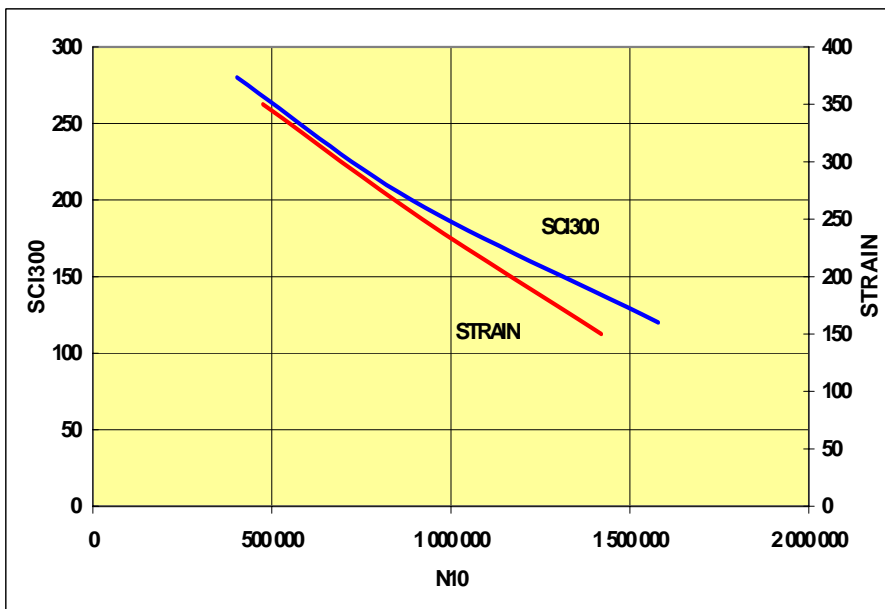


Figur 23 Prognos av antalet belastningar med standardaxel till sprickinitiering (definierad som $S_i \geq 5$) som en funktion av STRAIN ($\mu\text{m}/\text{m}$).

Av diagrammet i figur 23 framgår att vägar med högre antal N100 per år tål fler belastningar vid samma STRAIN. Det beror på att vägar med lägre trafik påverkas av åldringseffekten.



Figur 24 Prognos av antalet år till sprickinitiering (definierad som $S_i \geq 5$) som en funktion av STRAIN ($\mu\text{m/m}$) och antalet standardaxlar per år.



Figur 25 Jämförelse mellan "STRAIN"- respektive "SCI300"-modellerna.

I ovanstående diagram har kurvor för STRAIN- respektive SCI300-modellerna lagts in i samma diagram. Kurvornas läge i förhållande till varandra visar att modellerna ger liknande prognoser.

8.3.1 Sprickinitieringsmodellernas begränsningar

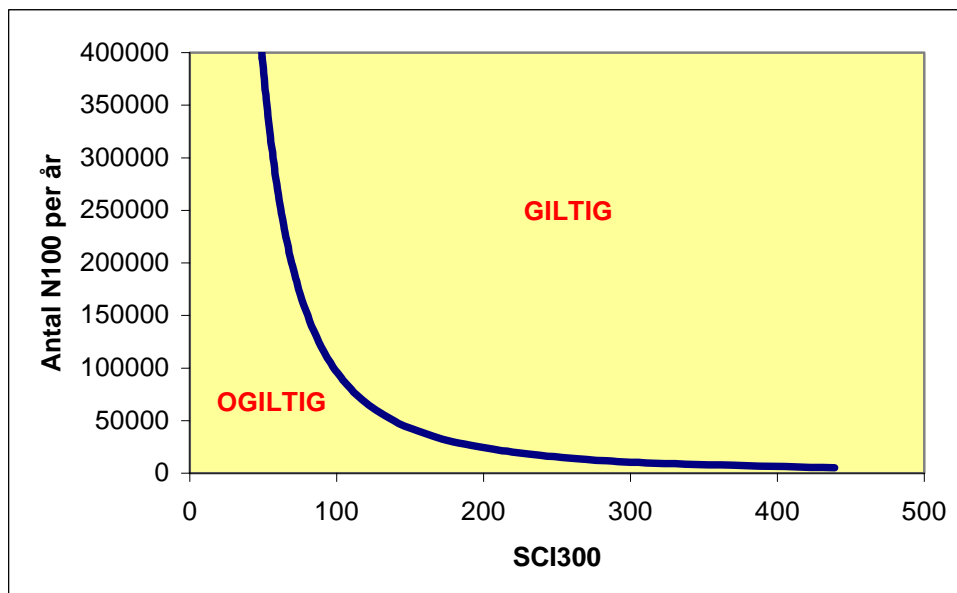
Vid användning av sprickinitieringsmodellen bör modellens begränsningsområden klargöras. Det finns en kritisk punkt efter vilken modellen ger som resultat att antalet ackumulerade ekvivalenta standardaxlar (N100) till sprickinitiering minskar då SCI minskar. Denna kritiska punkt är inte konstant utan beror av det årliga antalet ekvivalenta standardaxlar (N100). Med nedanstående ekvationer kan ett minimumvärde för SCI300 respektive STRAIN beräknas för godtyckligt antal ekvivalenta standardaxlar (N100) per år.

Skärningspunkten mellan antal N100 per år och SCI300 (figur 26) respektive STRAIN (figur 27) måste ligga till höger om kurvan i respektive diagram. Orsaken till att modellerna inte gäller är att vägkonstruktionen har en mycket hög strukturell styrka i förhållande till vägens årliga trafikbelastning varför utmattning, vilket modellen bygger på, inte är den primära nedbrytningsorsaken för ifrågavarande vägkonstruktion.

$$SCI300_{\min} = \sqrt{\frac{5010000}{0.0052 \cdot N_{100} Y}}$$

där

SCI300_{min} minsta tillåtna Surface Curvature Index 300 µm
 N₁₀₀Y årlig trafikbelastning (standardaxlar).



Figur 26 Modellen är giltig då skärningspunkten mellan aktuellt SCI300 (µm) och antal N100 per år faller till höger om kurvan i diagrammet.

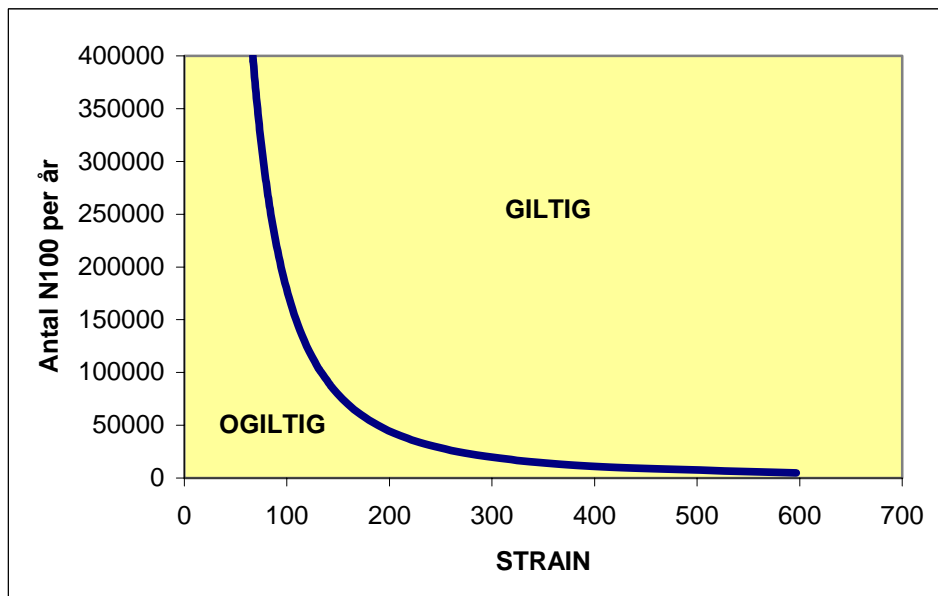
Motsvarande begränsning för STRAIN-modellen beräknas enligt följande:

$$STRAIN_{\min} = \sqrt{\frac{6412000}{0.0036 \cdot N_{100}Y}}$$

där

$STRAIN_{\min}$ minsta tillåtna STRAIN, $\mu\text{m}/\text{m}$.

$N_{100}Y$ årlig trafikbelastning (standardaxlar)

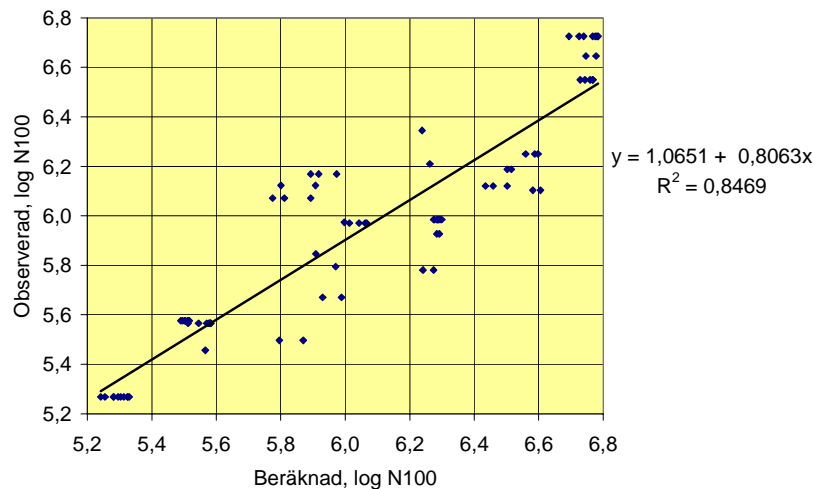


Figur 27 Modellen är giltig då skärningspunkten mellan aktuellt STRAIN ($\mu\text{m}/\text{m}$) och antal N100 per år faller till höger om kurvan i diagrammet.

8.4 Validering av sprickinitieringsmodellerna

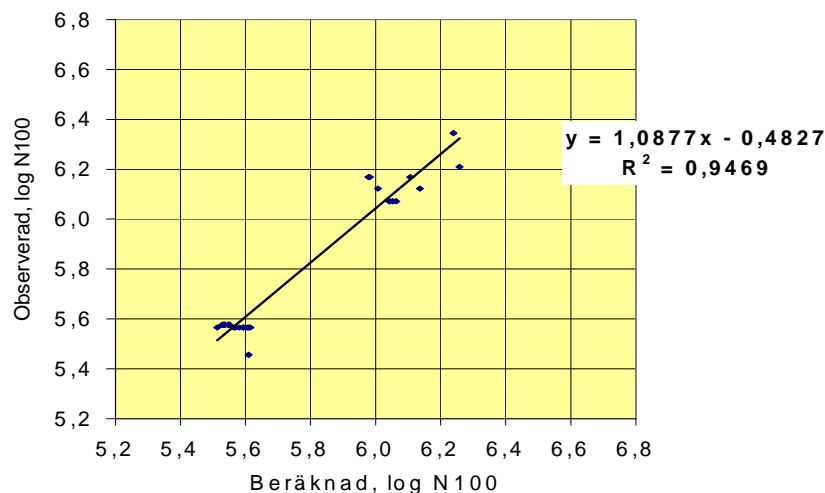
För validering av sprickinitieringsmodellerna, SCI300 respektive STRAIN, valdes slumpmässigt ett antal objekt ut. Data från dessa objekt ingick inte i dataunderlaget för modellutvecklingen. Alla sträckor från respektive utvalt objekt användes vid valideringen. Valideringsobjekten har olika trafikmängder, köldmängd samt olika konstruktionstyp. Totalt ingick 65 st. sträckor i valideringsmaterialet.

I nedanstående diagram, (figur 28) har av SCI300-modellen predikterade värden plottats mot observerade värden från valideringssträckorna.



Figur 28 SCI300-modellens beräknade värden har plottats mot observerade värden på valideringssträckorna.

I figur 29 nedan har av STRAIN-modellen predikterade värden plottats mot observerade värden från valideringssträckorna. Antalet valideringssträckor för STRAIN-modellen är 27 st. beroende på att vissa fallviktsdata inte var mätta med tillräckligt många givare för att töjningen skulle kunna beräknas.



Figur 29 STRAIN-modellens beräknade värden har plottats mot observerade värden på valideringssträckorna.

Som framgår av diagrammen i figur 28 och figur 29 uppgår förklaringsgraden R^2 till 0,85 respektive 0,95 vilket är mycket högt.

8.5 Metodik för utveckling av sprickpropageringsmodell

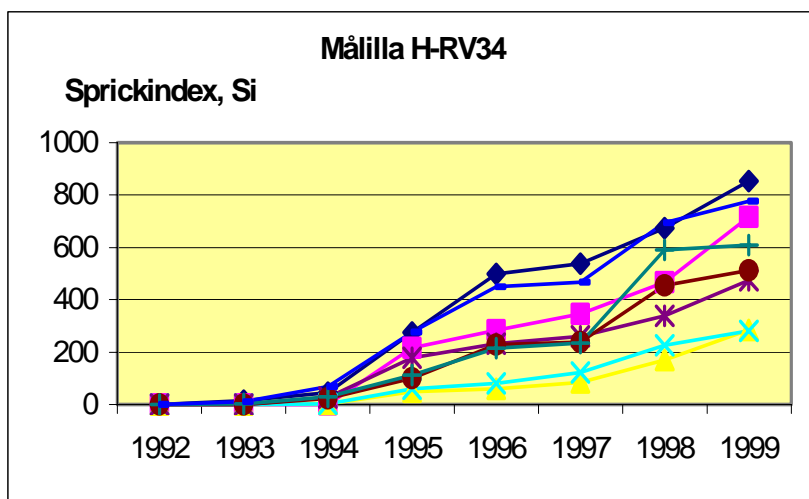
Arbetet med utveckling av sprickpropageringsmodell omfattade följande delmoment:

- Val av data
- Val av funktionell form
- Beräkning av lutningskoefficienter för tidsseriedata
- Identifiering av eventuella kluster

Analysen har genomförts med olika grupperingar av data. Beräkningar har gjorts med asfaltkonstruktioner med asfaltslitlager i en grupp, konstruktioner med ytbehandling som slitlager i en grupp och slutligen alla sträckor i samma grupp. Eftersom ingen skillnad kunde noteras mellan gruppen valdes att hantera alla data i en grupp.

8.5.1 Val av data

För utveckling av sprickpropageringsmodellen valdes data från 178 st. observationssträckor från 29 st. objekt. De utvalda sträckorna uppvisar en skadeutvecklingsperiod som varierar mellan tre och nio år. I nedanstående diagram visas skadeutvecklingen i form av sprickindex, S_i , under en period på fem till sex år. Kurvorna representerar olika observationssträckorna på ett av vägobjekten som ligger utmed Rv34 strax utanför Målilla i södra Sverige. S_i 1600 är det största sprickindex som en sträcka kan få för belastningsbetingade sprickor. Det innebär att alla fyra hjulspåren, två i vardera riktningen, har krackelering med högsta svårighetsgraden utmed hela sträckans längd.



Figur 30 Exempel på utveckling av sprickindex, S_i , på ett av vägobjektens olika sträckor.

För att en sträcka skulle kunna användas i analysen krävdes att följande uppgifter och villkor uppfylldes:

- Tid sedan senaste åtgärd
- Antal N100 per år
- Besiktningsdata i form av skadeindex, Si
- Tiden efter senaste åtgärd skall vara <15 år
- Minst tre årliga besiktningsdata efter sprickinitiering
- Logisk skadeutveckling

Totalt uppfyllde 174 st. sträckor ovanstående krav. I dataunderlaget ingår sträckor som ej åtgärdats, åtgärdats en eller två gånger.

8.5.2 Val av sprickpropageringens funktionella form

I PARIS-projektet genomfördes en omfattande analys av vilken form nedbrytningsförloppet normalt har (European Commission 1998). Data hämtades från undersökningar som genomförts i anläggningar för accelererad provning (ALT, Accelerated Load Testing). Anledningen till att data från ALT-anläggningarna användes var att sprickpropageringen där tillåts utvecklas längre än vad som är fallet på vanliga trafikerade vägar. Denna analys visade att nedbrytningsförloppet uppvisar ett linjärt förhållande (med ålder eller belastning) upp till en relativt omfattande sprickbildning.

Plotting av sprickindex från observationssträckorna visade att propageringen följde samma form, varför följande linjära modell valdes för att beskriva sprickpropagering:

$$y = A + B * x$$

där

- y = sprickindex
- x = ålder alternativt antal N100
- A = modellparameter (intercept)
- B = modellparameter (lutning)

Analysen av sprickpropageringen gjordes med beläggningsåldern respektive ackumulerat antal N100 sedan senast föregående åtgärd som förklarande variabler.

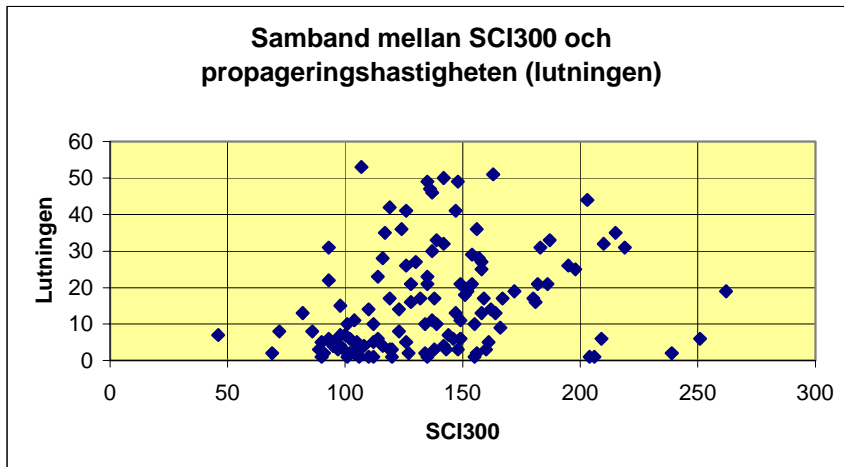
8.5.3 Beräkning av lutningskoefficienter för tidsseriedata

För varje sträcka beräknades, med enkel linjär regressionsanalys, lutningen (sprickpropageringens hastighet) för den kurva som beskriver sprickindexets utveckling. Ett av resultaten av denna analys var att samtliga utvalda sträckor uppvisade en förklaringsgrad, R^2 mellan 0,50 och 0,97 vilket innebär att sprickutvecklingen är logisk.

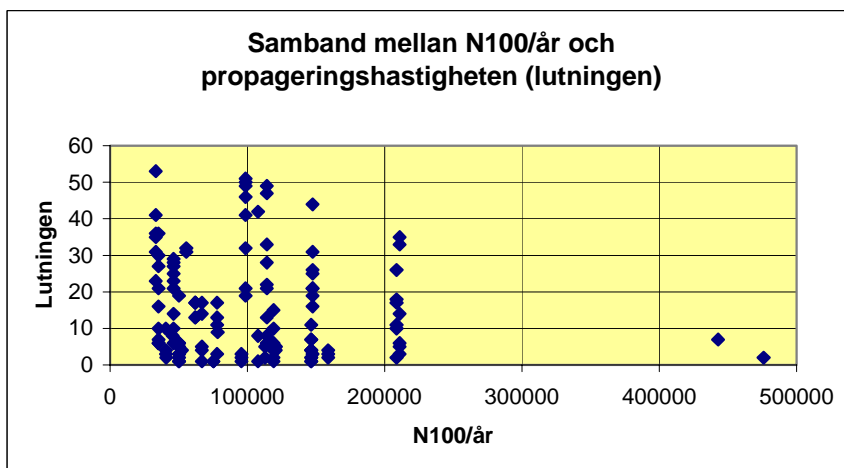
8.5.4 Identifiering av samband

I nästa steg analyserades om det kunde finnas samband mellan lutningen, dvs. sprickpropageringens hastighet, på respektive sträcka och någon förklarande variabel i databasen. Samtliga förklarande variabler som beskriver vägens konstruktion, undergrundens tjälklass, strukturellt tillstånd (fallviktsdata) samt klimatförhållanden ingick i denna analys. Ingen av dessa variabler gav emellertid någon

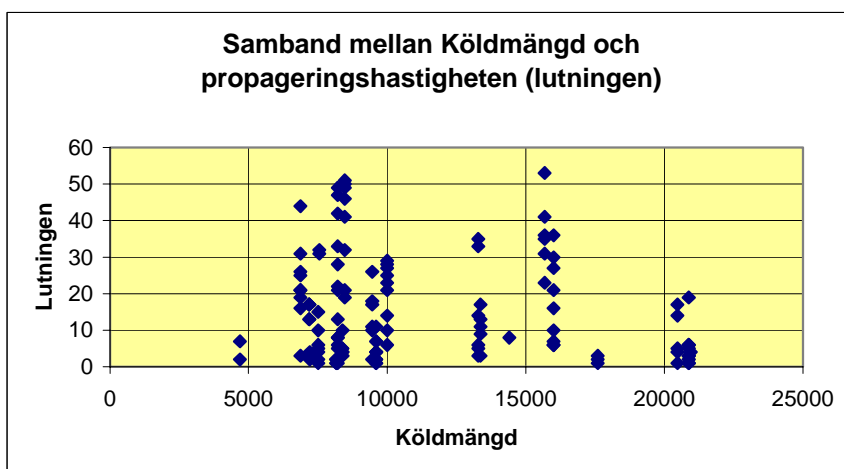
korrelation med lutningen. Se diagram nedan (figur 31–33) med exempel på dåliga samband.



Figur 31 Samband mellan SCI300 och propageringshastigheten.



Figur 32 Samband mellan N100/år och propageringshastigheten.



Figur 33 Samband mellan Köldmängd och propageringshastighet.

Vidare prövades om sprickindex storlek före senaste åtgärd påverkade sprickpropageringens hastighet. Sträckorna delades in i tre klasser, Si 0-10, Si 10-100 samt Si > 100 före åtgärd. Det fanns dock inget samband som styrkte denna hypotes.

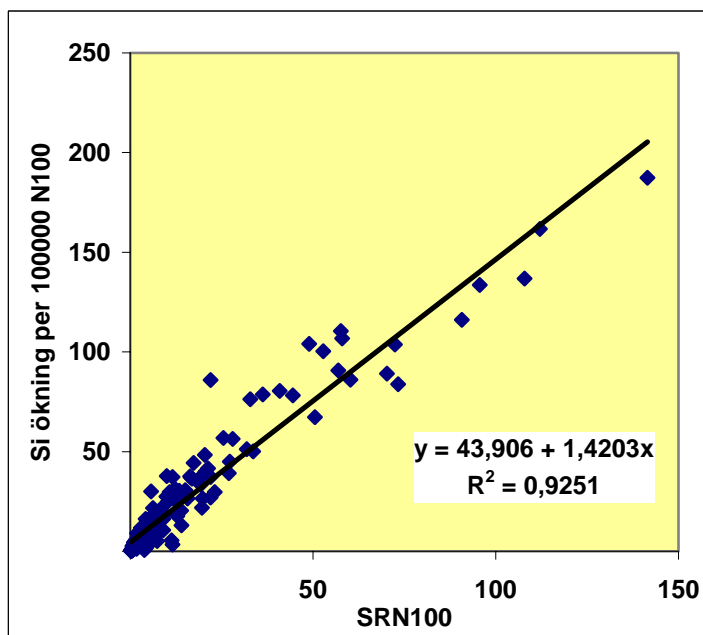
En variabel som dock gav god korrelation med lutningen var förhållandet mellan sprickindex, Si, och ackumulerat antal N100 sedan senaste föregående bebyggingsåtgärd (vid besiktningstillfället):

$$SR_{N100} = \frac{Si_{senast}}{MN100_{senast}}$$

där

- SR_{N100} = "Sprickor/N100 förhållande"
- Si_{senast} = Sprickindex, Si, vid senaste besiktning
- $MN100_{senast}$ = Antal ackumulerade miljoner N100 vid senaste besiktning

En modell utvecklades för lutningskoefficienten för sprickindex (Si_{prop}) per miljon N100 som en funktion av "Sprickförhållandet" (SR_{N100}):



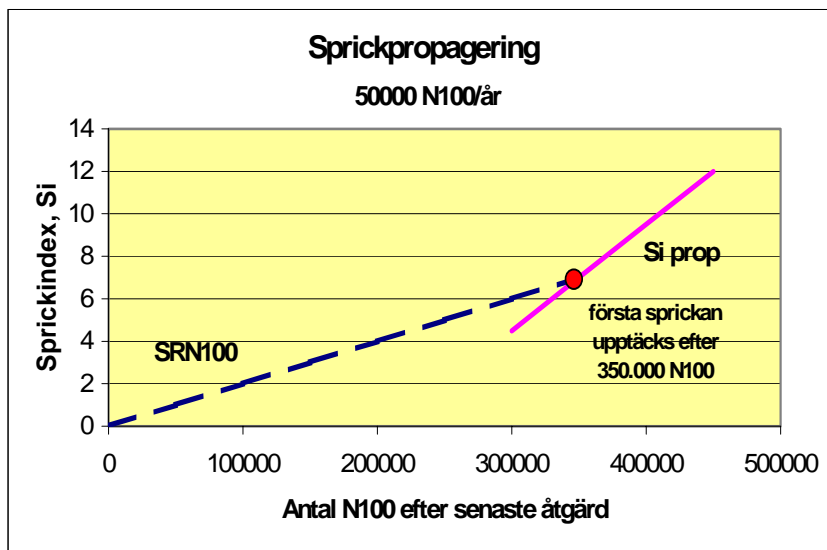
Figur 34 Samband mellan Si_{prop} (ökningen av sprickindex per 100.000 N100).

Sambandet ger följande regressionsekvation:

$$y = 43,9 + 1,42 * x \qquad R^2 = 0,92$$

där

- $y = Si_{prop}$
- $x = SR_{N100}$



Figur 35 Exempel på samband mellan sprickpropagering och antal N100 efter föregående åtgärd.

I ovanstående diagram visas ett exempel där de första sprickorna upptäcks efter totalt 350000 st. N100-belastningar (0,35 miljoner N100) sedan senaste beläggningsåtgärd. Vid denna besiktning uppgår Si till 7,0.

$$SR_{N100} = \frac{7,0}{0,35} = 20$$

Enligt nedanstående ekvation kan den framtida propageringshastigheten (Si_{prop}) beräknas:

$$Si_{prop} = 43,9 + 1,42 \cdot SR_{N100}$$

$$Si_{prop} = 43,9 + 1,42 \cdot 20 = 72,3$$

Si ökar alltså med 72,3 per 10^6 N100-belastningar (ca 7,2 per 100000 standardaxlar, N100).

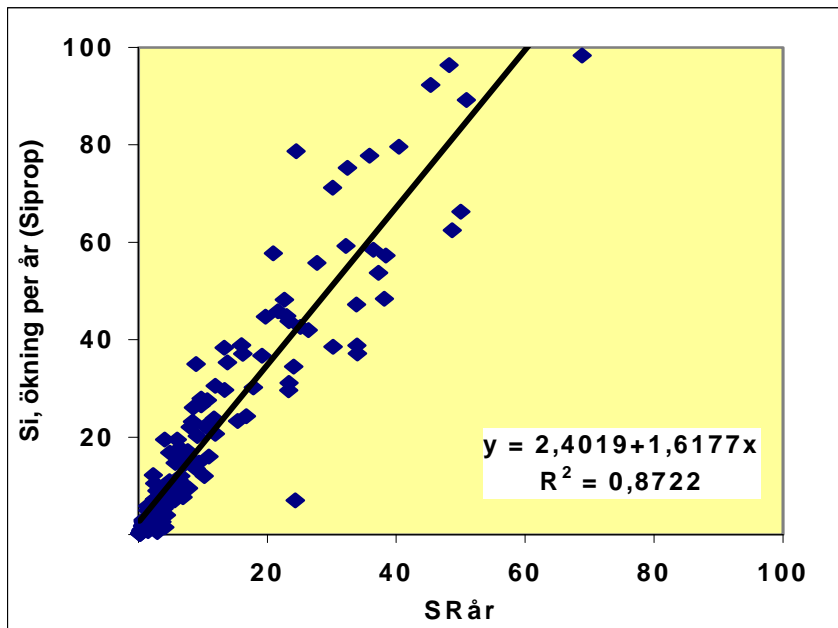
En annan variabel som gav god korrelation med lutningen var förhållandet mellan sprickindex, Si, och beläggningsåtgärdens ackumulerade ålder vid besiktningstillfället:

$$SR_{\text{ÅR}} = \frac{Si_{\text{senast}}}{\text{ÅR}_{\text{senast}}}$$

där

- $SR_{\text{ÅR}}$ = ”Sprickor/År förhållande”
- Si_{senast} = Sprickindex Si vid senaste besiktning
- $\text{ÅR}_{\text{senast}}$ = Ålder vid senaste besiktning

Modeller utvecklades för lutningskoefficienten för sprickindex (S_i) per ÅR som en funktion av "Sprickförhållandet" ($SR_{\text{ÅR}}$)



Figur 36 Samband mellan ökning av sprickindex, S_i , per år och $SR_{\text{år}}$.

Sambandet ger följande regressionsekvation:

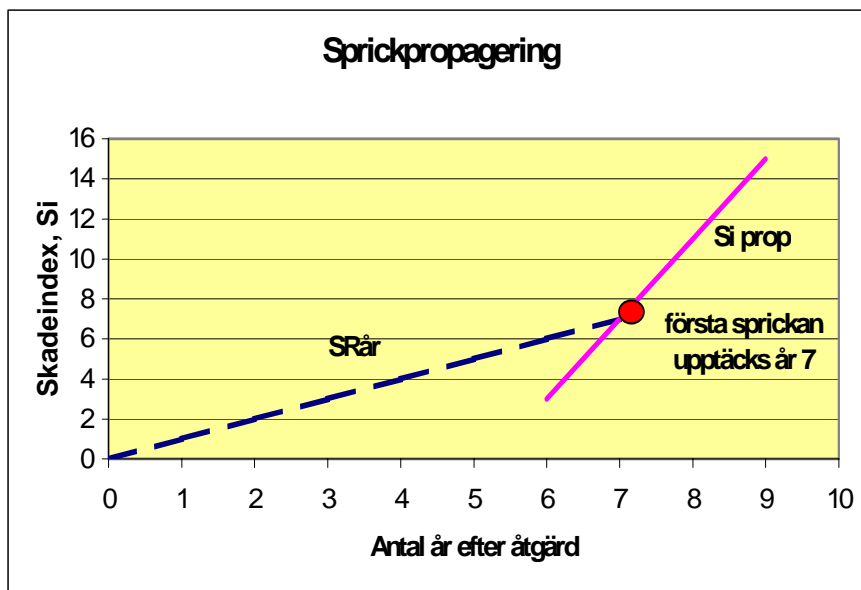
$$y = 2,40 + 1,62 * X$$

$$R^2 = 0,87$$

där

$$y = (S_{i_{\text{prop}}})$$

$$x = (SR_{\text{år}})$$



Figur 37 Exempel på samband mellan sprickpropagering och antal år efter föregående åtgärd

Enligt ovanstående exempel, figur 36, upptäcks de första sprickorna 7 år efter senaste beläggningsåtgärd. Sprickindex vid den besiktningen uppgår till $Si = 7$. $SR_{\text{år}}$, dvs. sprickindex per år blir därför $7/7 = 1,0$. Enligt nedanstående ekvation kan den framtida propageringshastigheten (Si_{prop}) beräknas:

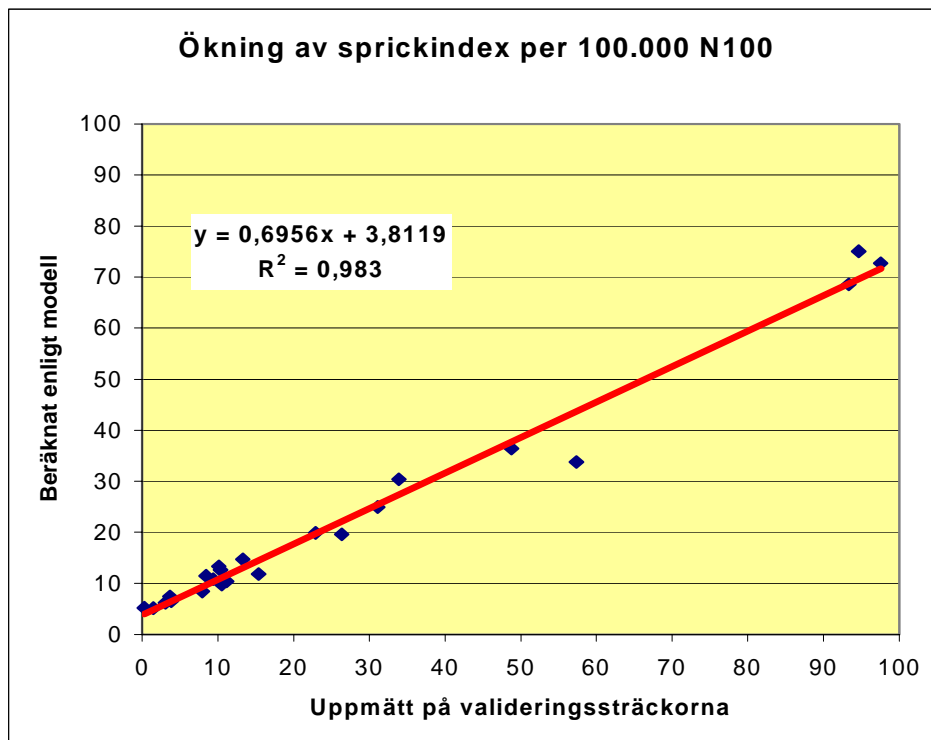
$$Si_{\text{prop}} = 2,40 + 1,62 * SR_{\text{år}}$$

$$Si_{\text{prop}} = 2,40 + 1,62 * 1,0 = 4,02$$

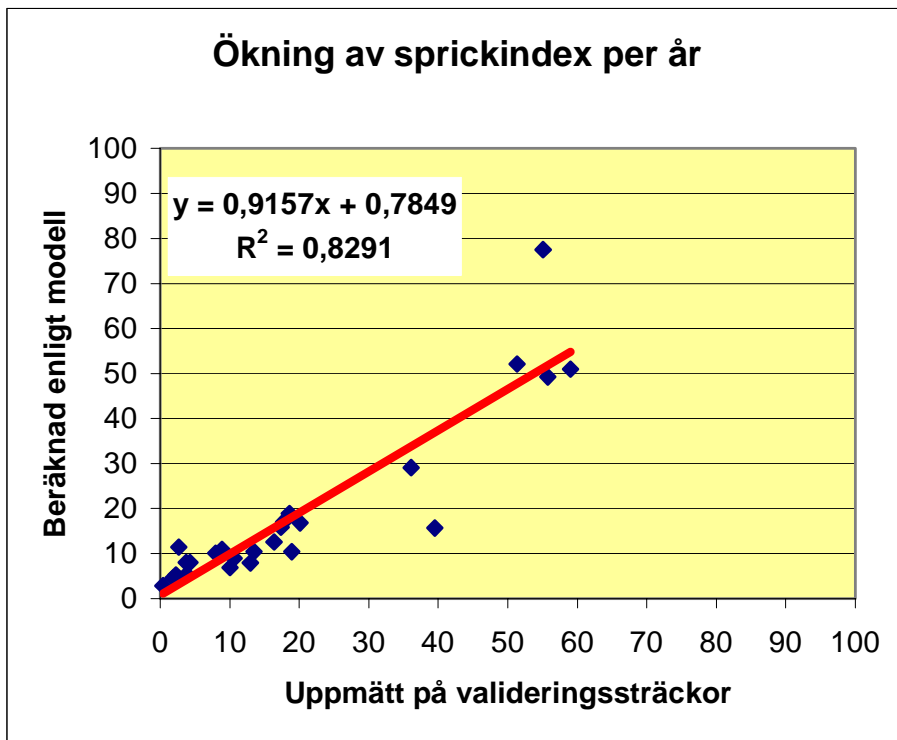
Sprickpropageringen kommer alltså att uppgå till $Si = 4$ varje år.

8.6 Validering av sprickpropageringsmodellerna

Som framgår av föregående avsnitt utvecklades modeller för sprickpropagering med hänsyn till N100 respektive ÅR. Innan modellerna utvecklades slumpades 26 st. sträckor för användning som valideringssträckor. Dessa sträckor var således inte med i dataunderlaget för utveckling av modellerna. I nedanstående diagram redovisas resultatet av valideringen av respektive modell.



Figur 38 Validering av sprickpropageringsmodellen – ökning av sprickindex per 100.000 st. N100.



Figur 39 Validering av sprickpropageringsmodellen – ökning av sprickindex per år.

Som framgår av diagrammen i figur 38 och figur 39 är R^2 mycket högt, 0,98 respektive 0,83 vilket visar att modellerna gör en mycket god prognos av sprickutvecklingen.

9 Konklusioner

Relevanta nedbrytningsmodeller för att förutsäga en vägkonstruktions framtida tillstånd är grundläggande element i ett planeringsprogram för kostnadseffektivt underhåll, både på nätverks- och objektnivå. Målsättningen med det projekt som är beskrivet i denna rapport var att utveckla sprickinitierings- respektive sprickpropageringsmodeller för belastningsbetingade sprickor.

Resultatet av utveckling och validering av sprickinitieringsmodellerna för belastningsbetingade sprickor i hjulspår visar följande:

- Modellerna, med SCI300 respektive töjning i asfaltlagrets underkant som indata, som beräknar tidpunkten för sprickinitiering i grus/bitumen konstruktioner ger en mycket god prognos av tidpunkten för sprickinitiering.
- Modellerna kan användas för att beräkna hur många standardaxellaster en asfaltkonstruktion kan utsättas för innan sprickor uppträder på beläggningsytan. Modellerna har dock en viss begränsning med hänsyn till kombinationen SCI300 respektive töjning i asfaltlagrens underkant och antalet standardaxlar.

Modellerna för sprickinitiering har vissa begränsningar med avseende på giltighet. Om en väg har en låg trafikbelastning samtidigt som vägkonstruktionen är mycket stark är det oftast andra faktorer än SCI och töjning i asfaltlagrens underkant som är avgörande för när sprickor initieras i beläggningsytan. Sträckor av ovanstående slag fanns inte med i dataunderlaget. I rapporten finns diagram som utifrån trafikdata (N100 per år) och responsdata (SCI300 respektive beräknad töjning i asfaltlagrens underkant) visar modellens giltighet.

Resultatet av utveckling och validering av sprickpropageringsmodeller för belastningsbetingade sprickor i hjulspår visar följande:

- För ett vägavsnitt kan en prognos över sprickpropagering göras med de linjära sprickpropageringsmodeller som utvecklats i detta projekt. Indata i modellen är sprickindex vid den senast gjorda besiktningen och beläggningsåtgärdens ålder vid det tillfället, alternativt antalet ackumulerade ekvivalenta standardaxlar (N100) vid samma tillfälle.
- Om det finns besiktningsdata över minst tre år på ett vägavsnitt kan en linjär sprickpropageringsmodell göras specifikt för detta vägavsnitt genom att beräkna lutningskoefficienten utifrån vägavsnittets individuella skadedata.

Samtliga modeller som utvecklats i detta projekt har validerats med hjälp av oberoende data. Nästa steg bör därför omfatta en implementering av modellerna i en verksamhet där PM-system för underhållsplanering används eller kommer att användas. För att begränsa och väl kontrollera implementeringsarbetet kan det vara lämpligt att starta implementeringsarbetet inom en av Vägverkets regioner. Objekt som byggts eller åtgärdats de senaste fem åren är lämpade att ingå i implementeringen. Allt som behöver göras på respektive objekt i inledningskedet är en okulär besiktning och en fallviktsmätning.

10 Litteraturreferenser

- European Commission: **Performance Analysis of Road Infrastructure (PARIS)**. Bussels: Transport RTD Programme of the 4th Framework Programme, Final Report, 1998.
- Göransson, Nils-Gunnar & Wågberg, Lars-Göran: **Tillståndsuppföljning av observationssträckor, Datainsamling, lägesrapport**, VTI-NOTAT 9-2000, 2000.
- Jokinen, P. **Continuously learning nonlinear networks with dynamic capacity allocation**. Tampere: Tampere University of Technology, Publications 73, 1991.
- Jämsä, Heikki: **Crack Initiation Models for Flexible Pavements**. Helsinki University of Technology, Highway Engineering. Espoo 2000.
- PARIS: **Performance Analysis of Road Infrastructure**, Transport Research, Fourth Framework Programme, Road Transport, Transport DG – 109. European Commission. 1999
- SAS: **SAS Procedures Guide version 6**, SAS Institute Inc, 1998
- Spoof, Harri & Petäjä, Sami & Ruotoistenmäki, Antti: **Tien rakenteellinen kunto.Taipumien lämpötilakorjaus ja kuormituskestävyysmallit**. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT. Tutkimusraportti 524. Espoo, helmikuu 2000.
- Spoof, H. & Ruotoistenmäki, A & Hämäläinen, O & Alanko, T: **Kuormituskestävyysmallien arviointi havaintotieaineistolla –95**. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tien pohja- ja päällysrakenteet –tutkimusohjelma, Väliraportti nro E4, Projekti E311, 1996.
- Wågberg, Lars-Göran: **Bära eller brista**. Svenska Kommunförbundet, 1991.