

Utformning av tvärfall för minskad krängningsrisk i kurva

© Transportstyrelsen

Väg- och järnvägsavdelningen

Enhet teknik och trafik

Rapporten finns tillgänglig på Transportstyrelsens webbplats www.transportstyrelsen.se

Dnr/Beteckning TSG 2016-1836

Författare Johan Granlund, WSP

Månad År Maj 2016

Eftertryck tillåts med angivande av källa.

Förord

Transportstyrelsen har sedan 2013 bemyndigande enligt plan- och byggförordningen, PBF, (2011:338) att föreskriva om tekniska egenskapskrav för vägar och gator. Idag gäller Vägverkets föreskrifter (VVFS 2003:140) om tekniska egenskapskrav vid byggande på vägar och gator (vägregler). Dessa kommer att upphävas i samband med att Transportstyrelsens föreskrifter och allmänna råd om tekniska egenskapskrav träder i kraft. Föreskrifterna gäller för nybyggnad och ombyggnad av vägar och gator.

Enligt nuvarande kravformulering i VVFS 2003:140, kap. 6.3.4.2, ska vägar vara så utformade och utförda med sådant tvärfall att

1. glidningsrisken vid halt väglag begränsas,
2. ytvattnet avleds från vägbanan,
3. stillastående vattenskikt på vägbanan undviks, och
4. vattenskiktets tjocklek vid regn begränsas.

Krav på vägytans tvärfall är en väsentlig teknisk egenskap för säkerhet vid användning av vägen eller gatan. Idag saknas dock kravställande vad gäller tvärfall i kurvor med avseende på krängningsrisk. Mot denna bakgrund initierade Transportstyrelsen ett FoI-projekt i syfte att utreda och konsekvensutreda ett förslag till sådant kravställande.

Slutsatserna av projektet är att det finns belägg för att i kommande föreskrifter införa en kravformulering om att vägar ska vara utformade med sådant tvärfall att krängningsrisken i kurvor, cirkulationsplatser och på ramper minimeras.

De slutsatser och rekommendationer som uttrycks är rapportförfattarens och speglar inte nödvändigtvis Transportstyrelsens uppfattning.

Borlänge, maj 2016

Karin Edvardsson
Utredare



UTFORMNING AV TVÄRFALL FÖR MINSKAD KRÄNGNINGSRISK I KURVA

Rapport till Transportstyrelsen

2016-02-08

Rev. 2016-05-13

Utförd av: Civ. Ing. Johan Granlund

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

UTFORMNING AV TVÄRFALL FÖR MINSKAD KRÄNGNINGSRISK I KURVA

KUND

Transportstyrelsen
Väg- och järnvägsavdelningen
Hagav.2
Box 267
781 23 Borlänge

KONSULT

WSP Sverige AB (WSP)
Teknikdalen/Forskarg 3
781 70 Borlänge
Tel: 0243 213500
Fax: 010 7225790
WSP Sverige AB
Org. nr: 556057-4880
www.wspgroup.se

KONTAKTPERSONER

Kunder vid Transportstyrelsen:

Anders Sileborg, anders.sileborg@transportstyrelsen.se, 010 495 55 85

Karin Edvardsson, karin.edvardsson@transportstyrelsen.se, 010 495 56 01

Konsulter vid WSP:

Johan Granlund, johan.granlund@wspgroup.se, 070 33 75 388

Per-Åke Eng, per-ake.eng@wspgroup.se, 070 598 93 41

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

INNEHÅLL

1. BAKGRUND: KRAV PÅ VÄGSÄKERHET	6
2. SYFTE: UTREDA KRÄNGNINGSRISK	6
3. METOD	7
4. GENOMLYSNING AV KUNSKAPSLÄGET	8
4.1 Från bombering till skevade ytterkurvor	8
Redan de gamla romarna byggde bomberade vägsektioner	8
Med 1930-talets motorisering infördes skevning som praxis	9
Feldoserade kurvan gav olyckor varje vecka	10
"Punktmassmodell" för beräkning av lämplig skevning	11
"Känslan i byxbaken" som grund för lämplig skevning	12
Skevningsvärdet ges av dimensionerande sidofriktionstal	13
4.2 VGU missleder om dimensionerande friktion	13
Den vingliga vägen till Trafikverkets <i>komfortskevning</i>	14
4.3 Skevningskrav i vägnormer internationellt	17
4.4 För lite skevning leder till olyckor	23
FHWA: 3 % fler bilolyckor per procent saknad skevning	23
Feldoserade kurvor vanlig olycksorsak i Sverige och Norge	23
4.5 Färre olyckor med minskad negativ skevning	25
4.6 Ökad skevning ger stabilare bilkörning	27
Vingel vid verkliga färder ökar behovet av skevning	27
Filbyte ökar behovet av skevning på flerfältsväg	27
Maximal skevning enligt modern riskbedömning	28
4.7 Tunga fordon behöver extra stor skevning	31
Halverad sidofriktion för lastbilsdäck på is i tvär kurva	31
Variation i sidofriktion under lastbilsekipagets många däck	31
Hög tyngdpunkt gör tunga fordon mer välbenägna	33
Släpfordon utsätts dessutom för högre sidkraft	36
Kurva i nedförsbacke behöver ges extra stor skevning	37
TERNZ: 5 % fler tunga olyckor per procent saknad skevning	39
Norges Haverikommission: Uppdatera vägreglerna!	41

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

4.8 Klotoider påverkar vägens risknivå	44
4.9 Kraftspel vid kurvtagning	45
Traditionell analys av sladdrisk för personbil	45
Analys för sladd- & vältrisk för tunga fordon	46
4.10 Cykelbanors tvärfall och skevning	50
Cyklisters singelolyckor är ett allvarligt problem	50
Kraftspel och teknik vid kurvtagning med cykel	55
Infrastruktur för cykling	57
Kurvradier och skevning hos cykelbanor i Sverige	58
Kurvradier & skevning hos cykelbanor utomlands	60
5. BERÄKNINGAR FÖR TYPFALL	61
5.1 Ökad skevning ger minskad sladdrisk	61
Punktmassemodellen överskattar säker kurvtagningsfart	61
Punktmassemodellen underskattar behovet av skevning	64
5.2 Ökad skevning ger minskad vältrisk	66
Vältrisk i rondell och tvär lågfartsramp	66
Ingen vältrisk i modern landsvägskurva	66
Hög vältrisk i gammal feldoserad landsvägskurva	67
5.3 Nyttokostnadskalkyl för ökad skevning	68
Kostnad för ökad skevning	68
Nyttovärdering för ökad skevning	71
Nyttokostnadskalkyl för ökad skevning	77
6. DISKUSSION OCH SLUTSATS	79
6.1 Kunskapsläget	79
6.2 Diskussion om resultat för granskade typfall	82
Rondeller ska vara lagom feldoserade	82
Viktigt ha krav på minsta tillåtna skevning i lågfartsramper	83
Ökad skevning minskar sladdrisk på moderna landsvägar	83
Åtgärda farligt feldoserade gamla kurvor snarast	83
6.3 Allmänna reflektioner	84
7. FELKÄLLOR OCH OSÄKERHET	86
7.1 Fordonsmodellen	86

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL RAPPORT	
Datum: 2016-02-08		
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

7.2 Nyttokostnadskalkylen	86
8. REKOMMENDATION	87
9. SAMMANFATTNING	88
10. REFERENSER	91

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

1. BAKGRUND: KRAV PÅ VÄGSÄKERHET

Transportstyrelsen har sedan 2013 bemyndigande enligt Plan- och byggförordningen, PBF, (2011:338) att föreskriva om tekniska egenskapskrav för vägar och gator. Inom ramen för det regelutvecklingsarbete som följer av detta bemyndigande behöver krav på "Säkerhet vid användning" kopplat till utformning av vägar och gator analyseras, konsekvensutredas och beslutas.

För att leverera relevanta och väl avvägda krav och kravnivåer i de kommande föreskrifterna måste ny kunskap tas fram som underlag för den tillhörande konsekvensutredning som är lagstadgad enligt förordning (2007:1244) om konsekvensutredning vid regelgivning.

Idag gäller Trafikverkets föreskrifter (VVFS 2003:140) om tekniska egenskapskrav vid byggande på väg/gata. Dessa kommer att upphävas i samband med att Transportstyrelsens föreskrifter om tekniska egenskapskrav träder i kraft. Föreskrifterna gäller för nybyggnation, ändring och ombyggnad av väg/gata. I viss mån gäller de även för befintligt TEN-T-vägnät, vilket i princip motsvarar våra Europavägar, genom att Transportstyrelsen föreskrifter (TSFS 2010:183) om vägsäkerhet hänvisar till föreskrifterna om tekniska egenskapskrav.

Det är rimligt att krav ställs på skevning i kurvor. Säkerhetsnyttan av ett sådant krav överstiger sannolikt merkostnaden från de åtgärder som behövs för att åstadkomma trafiksäker skevning. Detta ska dessutom ses i skenet av idag pågående utveckling mot större lastbilsekipage.

2. SYFTE: UTREDA KRÄNGNINGSRISK

Enligt nuvarande kravformulering i VVFS 2003:140, kap. 6.3.4.2, ska vägar vara så utformade och utförda med sådant tvärfall att

1. *glidningsrisken vid halt väglag begränsas,*
2. *ytvattnet avleds från vägbanan,*
3. *stillastående vattenskikt på vägbanan undviks, och*
4. *vattenskiktets tjocklek vid regn begränsas.*

Föreliggande utredning ska ge underlag för beslut om en femte punkt med lydelsen "krängningsrisken i kurvor minimeras" ska läggas till.

Det är önskvärt att klarlägga ekonomisk skada vid en vältolycka; förluster av gods respektive miljöförorening vid transport av farligt gods. Det är också önskvärt att klarlägga eventuella negativa effekter för oskyddade trafikanter (MC), personbilar, driftfordon, etc., av ökad skevning.

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

3. METOD

Krav på vägytans tvärfall är en väsentlig teknisk egenskap för säkerhet vid användning av väg/gata. För att erhålla ett tillräckligt bra underlag för eventuellt kommande kravställande behöver ny kunskap tas fram.

Utredningen ska omfatta:

1. Litteraturstudie av överrisk för olyckor i feldoserade kurvor.
2. Utredning av lämpligt tvärfall i kurva med avseende på tyngdpunktens höjdläge och sidoförskjutning hos höga tunga fordon (tung lastbilar och bussar) samt risk för instabilitetsolyckor med dessa fordon.
3. Utredning av ökning i byggherrekostnad för att bygga lämpligt tvärfall, jämfört med dagens praxis. Beräkningar för såväl anläggningskostnad vid nybyggnad (med tvärfall enligt dagens vägregler VGU som referens) som för ombyggnadskostnad vid asfaltunderhåll (med ett par varianter på befintliga tvärfall som referens).
4. Förslag till eventuellt framtida kravställande på tvärfall i kurva på vägar och gator, med sammanställning av för- och nackdelar av detta.

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

4. GENOMLYSNING AV KUNSKAPSLÄGET

4.1 Från bombering till skevade ytterkurvor

Olyckskvoten är för kurvor typiskt 2 till 4.5 gånger högre än för raksträckor, se Johnston (1982) samt Leonard et al. (1994). Enligt Elvik et al (2014) är en rad olyckstyper överrepresenterade i kurvor; singelolyckor, mötesolyckor, vältolyckor, olyckor nattetid liksom olyckor med förare under påverkan av alkohol, droger eller mediciner. Tunga lastbilar uppvisar högst ökning i olyckskvot mellan raksträcka och kurva. Feldoserade kurvor, i synnerhet "platta kurvor" (d.v.s. feldoserade kurvor), bidrar enligt Haywood (1980) till de allra farligaste situationerna.

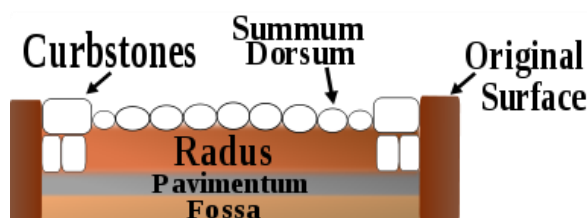
Internetsökning på "Feldoserad kurva" (på engelska: *Adverse camber, Incorrectly banked curves* alternativt *Flat curves*) ger mycket stort antal träffar på bl.a. motorsportsidor, där texterna vittnar om att feldoserade kurvor ger riskfyllda sidkrafter. Lägg till söktermen "olycka" (*Crash* eller *Accident*) och resultatet blir mycket stort antal träffar med många länkar till artiklar eller videoklipp om trafikolyckor. Många av dessa vittnar om tydlig koppling mellan kurvdosering och trafikolyckor, i synnerhet vid halt väglag.

Redan de gamla romarna byggde bomberade vägsektioner

Bombering betyder att en plan yta görs välvd, det vill säga upphöjd på mitten. Benämningen härstammar från franskans *bomber*, som betyder "att göra något konvext".

Vatten är vägkonstruktionens främsta fiende. Bombering av vägbanans sektion medför att regn- och smältvatten rinner av på kortast möjliga sträcka och medverkar till att hålla vägytan och vägkroppen torr. Bombering maximerar därmed vägens hållbarhet. Bombering benämns även dubbelsidigt tvärfall, eller sadeltakformat tvärfall.

Bomberingens nytta i form av hållbarare väg är urgammal kunskap. Vägar har ända sedan antikens dagar byggts med bombering, både på raksträckor och i kurvor. Exempelvis försågs den kända Via Appia ("Appiska vägen") med bomberad stensättning redan år 312 e.Kr. En bomberad antik vägsektion visas i Figur 1.



Figur 1 Sektion av bomberad antik väg (Wikipedia: Roman Engineering & Roman Roads)

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

Albert (1972) visar att trots att bombering användes redan av romerska väg-ingenjörer, var denna typ av vägsektion inte universell praxis ens på sextonhundratalet. År 1607 påpekade nämligen Thomas Procter att stillastående vatten var ödelägger vägar, och uppmanade till att rutinmässigt bygga konvexa vägbanor. Trots Procters förnuftiga uppmaning, bedrevs ännu fram till mitten av artonhundratalet experiment med andra vägsektioner. T.ex. byggdes "Angle Roads", vilka hade enkelsidigt tvärfall (skevning) oavsett raksträcka eller kurva.

Å andra sidan är överdriven bombering inte heller önskvärd, då det enligt tidiga källor visats öka vältrisen; se Cooper (2007).

En mycket enkel form av anvisning för utformning av skevade ytterkurvor ges av Chatburn (1921); "*I kurvor ska vägsektionens krön flyttas närmare eller helt ut till kurvans utsida*".

Med 1930-talets motorisering infördes skevning som praxis

Under 1920- och 1930-talen tog motoriseringen av vägarna ordentlig fart. I samma takt steg hastigheterna på vägarna. Tämigen omgående kom bilindustrin och vägbyggnadsindustrin till insikt om att stabil kurvtagning i normala farter förutsätter att vägbanan i ytterkurvor inte är bomberad (lutar "utåt"), utan istället bankas upp till skevning in mot kurvans krökningscentrum; se bild i Figur 2. Betydelsen av skevning (enkelsidigt tvärfall i kurva) för stabil kurvtagning i normal landsvägsfart, förklaras i filmklippet *Conquering Roads*¹ från 1937.



Figur 2 "-Curves have been scientifically banked" (Conquering Roads, 1937)

Den äldsta stora utredning om utformning av skevning som denna utredning lyckats spåra, är "*Safe Side Friction Factors and Superelevation Design*" av

¹ *Conquering Roads*. (1937). General Motors.
Internat 2015-12-01: https://www.youtube.com/watch?v=_AO4TVoaCPI (se från t = 3 min 55 s).

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

Barnett et al, 1936. År 1937 invigdes USA's första motorväg, "The Pennsylvania Turnpike".

Sannolikt finns det ännu äldre utredningar skrivna på italienska eller tyska. Världens första motorväg färdigställdes nämligen i Italien år 1924; den 42 km långa sträckan l'Autostrada dei Laghi mellan Milano och Varese. Under 1920-talet byggdes ytterligare en rad motorvägar i Italien.

Vissa menar att Tyskland med den 20 km långa motorsport- och bilstestbanan AVUS som invigdes 1921 (projekteringen började 1909) var före Italien med motorvägsbyggande. Tysklands stora våg av motorvägsbyggen inleddes dock först på 1930-talet. AVUS-banans raksträcka blev år 1940 ansluten till det tyska motorvägnätet, vilket alltså föranleder diskussionen om Tyskland eller Italien var först i världen med att ha färdigställt en motorvägssträcka. År 1937 bankades AVUS-banans snäva norra kurva upp till extrema 43,6° skevning i syfte att möjliggöra höga hastigheter. Skevningen byggdes upp med en konstruktion av bränt tegel. Syftet att skapa höga hastigheter lyckades, men till priset av många och svåra olyckor där bilar flög av tegelkonstruktionen och föll flera meter ned på marken. 1967 revs den extrema skevningen, då Nordkurvan rätades ut och samtidigt gavs mer sansat tvärfall.

Feldoserade kurvan gav olyckor varje vecka

Redan på 1930-talet hade alltså insikt etablerats om betydelsen för trafiksäker framkomlighet av att vägars horisontalkurvor byggs med skevning. Trots den kunskapen, har mängder av vägsträckor många decennier senare fortfarande feldoserade kurvor. Ett intressant exempel fanns på svenska riksväg 2, strax söder om Ljungskile:

"Vanligtvis hörde jag kraschen själv, inne i butiken. Då släppte jag det jag hade för händerna och sprang ut för att se vad som hade hänt, och vad jag kunde hjälpa till med." Så inleder Lennart Andersson sin prisbelönta bok "Det ska bärgas i tid".

Boken utgår från en feldoserad kurva med blank gatstensbeläggning som blev såphal vid regn och frost. Varje vecka skedde åtminstone två eller tre olyckor i kurvan, som ligger utanför huset där Lennarts föräldrar drev lanthandel, se Figur 3. Oftast var det singelolyckor, men då det vid sladdandet kom mötande fordon skedde även mötesolyckor.

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

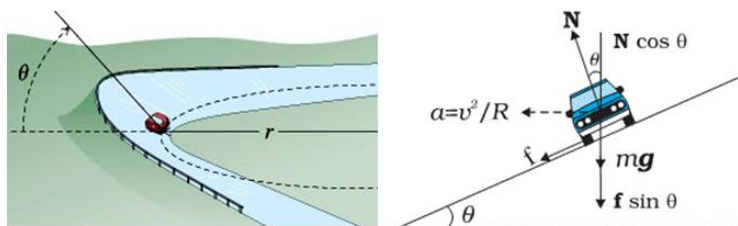


Figur 3 Bilder från boken *Det ska bärgas i tid*

Olyckorna ledde till att Lennart Andersson startade bärgningsföretaget och livsprojektet Rikstväans service. Efter ingripande av landshövding Per Nyström byggdes en kilometer ny sträckning av Riksväg 2 så att genomfartstrafiken lyftes bort från den feldoserade olyckskurvan. Många år senare, 1998, kom den avsnörpta delen av gamla rikstväan att utses till Sveriges första byggnadsminnesförklarade vägsträcka.

"Punktmassmodell" för beräkning av lämplig skevning

De första analytiska beräkningarna av lämplig storlek på vägbanans skevning dokumenterades så vitt känt år 1936. De utgick från en enkel analys av risk för glidning i sidled vid kurvtagning. Personbilen representerades med en s.k. punktmassmodell (i princip ett litet block utan bredd och höjd), se Figur 4.



Figur 4 Analys av kraftspel vid kurvtagning (Mastering Physics & Physics365.com)

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

Höger bild i Figur 4 ger sken av att analysen beaktat en rimlig position för fordonets tyngdpunkt. Detta stämmer inte, eftersom den matematisk-fysikaliska analysen² hanterar tyngdpunkten som om den vore placerad under bil-däcket. Detta må vara en rimlig förenkling för personbilar med låg tyngdpunkt. Emellertid visas i senare avsnitt att förenklingen kan vara direkt felaktig för fordon med hög tyngdpunkt, så som tunga lastbilers släpvagnar. Punktmassemodellen tar inte heller hänsyn till att vägfriktionen ofta är påtagligt olika under höger respektive vänster däck.

Lämplig storlek på skevning beräknas med hänsyn till ett, av vägregel-författare mer eller mindre godtyckligt valt, "dimensionerande tal" för sidofriktion mellan däck och (hal) vägbana. Beräkning av skevning visas i avsnitt "4.9 Kraftspel vid kurvtagning".

"Känslan i byxbaken" som grund för lämplig skevning

Ett annat koncept för bestämning av lämplig skevning är att använda *känslan i byxbaken*. Krammes et al (1996) beskriver hur konceptet har använts i Texas och en rad andra delstater i USA:

-Det dimensionerande sidofriktionstalet bestäms utifrån konceptet "seat-of-the-pants" (känslan i byxbaken). Det utgår från antagandet³ att bilisterna upplever att de glider i sidled på sitsen innan bildäcken förlorar väggreppet och börjar glida i sidled på vägbanan. Figur 5 illustrerar konceptet. Det dimensionerande sidofriktionstalet som avgör horisontalkurvans dimensionerande hastighet ges ett så pass lågt värde att denna otrygghetskänsla undviks. De värden (på sidofriktion och därmed på skevning) som används än idag, är baserade på experiment utförda på 1930-talet, i vilka passagerare med förbundna ögon kördes i olika hastigheter genom kurvor med uppgift att säga till vid vilka hastigheter de upplevde obehag. Vägutformning baserad på detta koncept ger påtaglig säkerhetsmarginal (mot glidning i sidled).

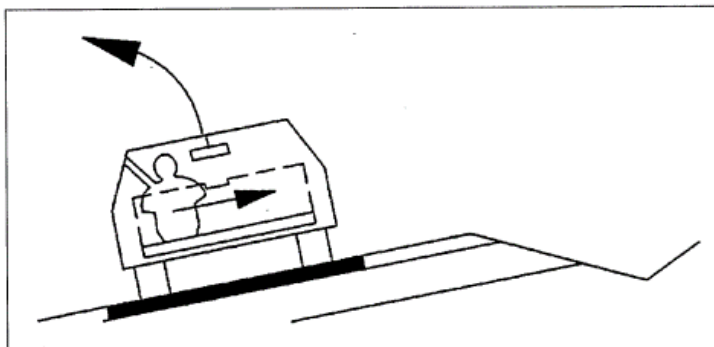
Dimensionerande sidofriktionstal och maximal skevning ger tillsammans minsta tillåtna kurvradie för kurvans dimensionerande hastighet. Vägutformare använder ofta lägre skevning (vilket ställer krav på ökad kurvradie).

(Kommentarer inom parentes är översättarens).

² Observera att kraftpilarnas angreppspunkt (och riktning) inte stämmer med de jämviktsekvationer som är uppställda för beräkning av skevning i t.ex. Trafikverkets vägutformningsregler.

³ Detta antagande är direkt felaktigt för körning med odubbade däck på glattis i kallt nordiskt klimat. Därmed faller också påståendet om påtaglig säkerhetsmarginal, när det gäller vägutformning för vinterkörning i Sverige.

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

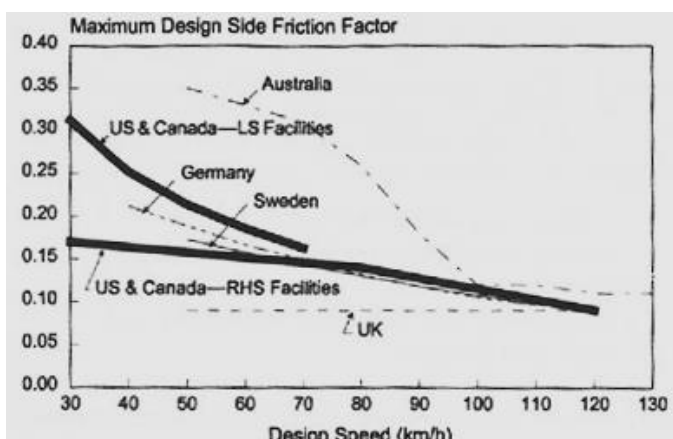


Figur 5 The "Seat-of-the-pants" interaction between centrifugal and gravitational forces. Krammes et al (1996).

Skevningsvärdet ges av dimensionerande sidofriktionstal

Dagens vägregelverk, i Sverige liksom i många länder runt om i världen, utgår från punktmassemodellen. Storleken på "optimal" skevning skiljer mellan olika länder. Enligt Granlund (2010.a) beror detta på att författarna av vägregelverken har valt att ansätta olika värden på dimensionerande sidofriktionstal, se graferna i Figur 6.

Observera att sidofriktionstal inte får förväxlas med bromsfriktionstal; bromsfriktionen är enligt Figur 7 ungefär dubbelt så hög som sidofriktionen.



Figur 6 Dimensionerande sidofriktionstal i olika länder Källa: NCHRP 439

4.2 VGU missleder om dimensionerande friktion

Trafikverkets och Sveriges Kommuner & Landstings dokumentserie med anvisningar för vägars och gators utformning (VGU), anger i delen "Begrepp och grundvärden" (publikation 2015:090) felaktigt att:

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

"Dimensionerande friktionstal f motsvarar ca 2/3 av uppmätta friktionsvärden på relativt nybelagda vägar med bra däck vid vått väglag och låsta hjul."

Detta påstående stämmer inte, och VGU är därför direkt missledande.

VGU's avsnitt om friktion, sidofriktion och tvärfall (skevning) bygger på arvegods från studier som VTI utfört på uppdrag av Vägverket under 1970- och 1980-talen. Dessa underlag för Vägverkets (idag Trafikverkets) anvisningar för utformning av tvärfall och skevning är noggrant dokumenterade av Vägverket (1983). I det följande refereras den skriften.

Den vingliga vägen till Trafikverkets komfortskevning

Det sidofriktionstal som krävs för att kompensera kurvtagningens sidkraft kan jämföras med det maximala sidofriktionstalet där bilens däck släpper från asfalten. Enligt Vägverket (1983) var den ursprungliga planen att detta tal skulle bestämmas utifrån:

1. Uppmätning av total friktion.
2. Bestämning av förhållandet mellan drivfriktion (bromsfriktion) och sidofriktion.
3. Beräkning av maximal sidofriktion utifrån pkt 1-2.

Den totala friktionen mättes upp mellan bra sommarkäck (personbil) och våt asfaltbeläggning i bra skick. På grund av spridning i mätresultaten samt *"faktorer såsom flera år gammal beläggning, annan beläggning än asfaltbetong, slitna däck, fel ringtryck, lätt bil (hjulbelastning mindre än 300 kp)"* utfördes enligt Vägverket (1983) en reduktion med 2/3. Nämda reduktion med 2/3 motsvarar införande av en säkerhetsfaktor med omvänd storlek, 3/2, vilket ger säkerhetsfaktor 1.5. Så här långt stämmer ovan nämnda påstående i dagens VGU. Men följande fakta från Vägverket (1983) förändrar bilden.

Ett stort problem var att VTI:s resultat genomgående visade mycket höga friktionstal. Exempelvis uppnåddes vid 90 km/tim ett maximalt sidofriktionstal på hela 0.24 innan bilens däck släppte från den nylagda jämna asfalten. Mätresultaten ansågs, på mycket goda grunder, helt oanvändbara som indata till utformning av skevning. De höga friktionstalen skulle medföra att även snäva högfartskurvor kan byggas rejält "feldoserade" med över 10 % lutning åt fel håll. Utredarna insåg uppenbart att sådan utformning av tvärfall skulle leda till ramaskri bland trafikanter, på grund av upplevd otrygghet. (Halkrisk på isigt vinterväglag var dock, liksom vältrisk med tunga fordon, inget som utredarna förutsåg och dokumenterade).

Det maximala uppmätta sidofriktionstalet på asfalt ligger därför inte alls till grund för vägnormens skevningsberäkningar, så som VGU felaktigt påstår. Istället uppfanns en slags "Plan B" av utredarna, vilka i detta läge sannolikt var påtagligt stressade. De beslutade att byta till ett helt annat kriterie, **komfort**, vid bestämningen av dimensionerande sidofriktionsutnyttjande.

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

Den svenska skevningsanvisningen - som används ännu i dagens VGU - bygger därför enligt Vägverket (1983) på en rent empirisk konstruktion. Anvisningen bygger på ett samband som ansågs beskriva komfortmässigt acceptabelt sidofriktionsutnyttjande vid olika farter, utan direkt fysikalisk koppling till greppet mellan däck och asfalt.

Detta samband, hastigt påkommet i utredningens slutskede, utgår enligt Vägverket (1983) från det *vid VTI för körkomfort hävdvunna riktvärdet 0.10 sidofriktion vid 100 km/tim*, samt från ett rent godtyckligt antagande om att det dubbla sidofriktionstalet (0.20) antagligen kan accepteras vid 40 km/tim. En matematisk kurvanpassning gjordes, varefter det resulterande sambandet infördes i Vägverkets skevningsanvisning. Just detta, tämligen godtyckligt etablerade "komfortsamband", återfinns idag i Trafikverkets VGU (2015) enligt ekvation i Formel 1 samt graf i Figur 7. Därmed inses att texten om uppmätt friktion på asfalt i VGU avsnitt om begrepp och grundvärden är rent nonsens och enbart förvillar läsarna.

Formel 1 Dimensionerande sidofriktionstal enligt VGU (2015)

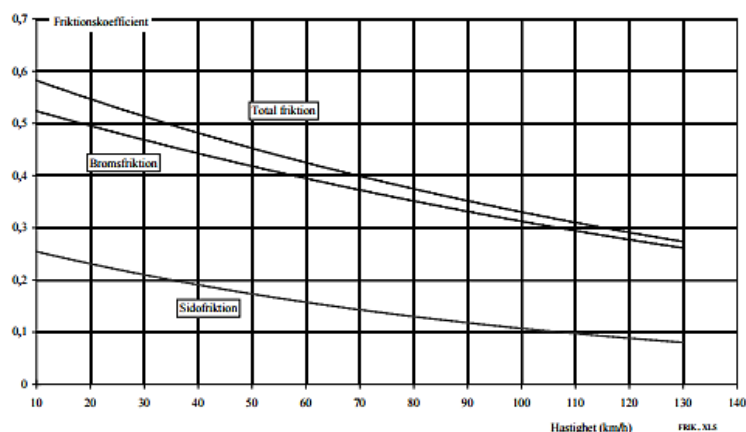
$$f_{s,dim} = 0.28 * e^{-0.0096 \cdot v}$$

där

$f_{s,dim}$ = dimensionerande sidofriktionstal [-]

e = naturliga logaritmen, 2.718 [-]

v = dimensionerande fordons hastighet [km/tim]



Figur 7 Dimensionerande friktionstal enligt VGU (2015)

Observera att de höga mätvärdena som utredarna förkastade, de var uppmätta på våt asfalt. De är därmed avsevärt högre än normalt förekommande

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

sidofriktionstal mellan vinterdäck och hal snö- eller isvägbana. Mellan odubbade däck och en vattenfilm på tunn is sjunker sidofriktionen i många fall till 0.10 eller ännu lägre. Så låg vägfriktion kan enligt Hjort (2009) inte kompenseras med antisladdsystem så som ESP, då dessa system förutsätter högre friktion (helst över 0.2 friktionstal) mellan däck och väg för att göra skillnad.

Även i situationer så som vid körning med dåliga däck på våt underkyld vägbana, eller på våt vägbana där beläggningen "blöder" eller har blanka bindemedelsrika "fetfläckar", kan det tillgängliga väggreppet vara betydligt lägre än vad utredarna alltså mätte upp på jämn asfalt med bra däck.

Sammanfattningsvis har Vägverkets & VTI:s utredning kommit att etablera en falsk bild hos vissa äldre vägexperter inom Vägverket/Trafikverket. Dessa har förvillats tro att det finns mycket stor marginal till att tappa väggreppet i kurvor samt att val av skevning i princip är en komfortaspekt. (Det sistnämnda falsifieras för övrigt mycket enkelt, genom att analysera inträffade halkolyckor i kurvor). Vägutformningsanvisningens felaktiga text förvillar alla läsare som inte har kännedom om de egentliga sakförhållandena, redovisade i grunddokumentationen i Vägverket (1983). Det självklart allra allvarligaste, är att ett mycket stort antal vägprojekt har byggts med alldeles för låg skevning. Därmed har vägutformningsanvisningens otillräckliga krav på skevningsvärde utan tvivel medverkat till ett stort antal sladdolyckor vintertid samt till ofta svåra vältolyckor med tunga fordon.

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

4.3 Skevningskrav i vägnormer internationellt

Nedan sammanfattas skevningskrav i Sverige, Danmark och Norge.

Inget av nämnda länder har särskilt krav för ökad skevning på flerfältsväg, där filbyte i kurva kan ge avsevärt snävare "radie" (d.v.s. större sidkraft) än vägkurvans egen radie. Denna brist i vägutformningsanvisningarna har medfört för låg skevning och därmed ökad olycksfrekvens i denna typ av högtrafikerade kurvor. Läs mer i Granlund (2010.b).

Ett sammanfattande intryck är att ovan nämnda länders vägregler för skevning är slarvigt eller rent av okunnigt författade, i strid med Newtons lagar (Norge), med missvisande formuleringar, motstridiga krav mellan nybyggnation och underhåll, uppenbart usel kostnadseffektivitet, samt direkt oanvändbara toleranskrav. I synnerhet Sveriges och Norges vägregler för skevning lämnar milt sagt "en hel del att önska".

Detta avsnitt avrundas med kommentarer efter en global utblick på området.

Skevning enligt Sveriges anvisning VGU

Av tradition använder Vägars och Gators Utformning enbart tre diskreta värden på skevning; 2.5 %, 4.0 % samt 5.5 %. Detta ger rationell projektering vid nybyggnad, vilket årligen berör någon promille av vägnätets längd.

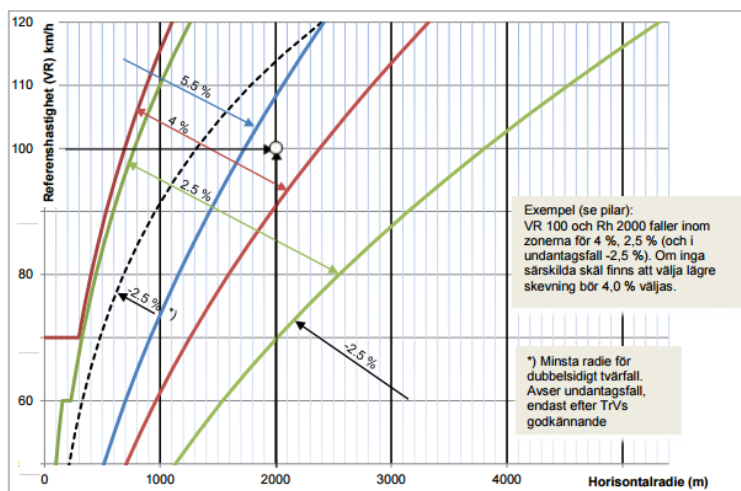
Vid underhåll berörs årligen närmare 5 % av vägnätets längd, d.v.s. mer än tiofaldigt större andel av vägnätet. Vid underhållsbeläggning finns ingen nämnvärd nytta av att enbart tillåta de tre diskreta tvärfallsvärdena 2.5 %, 4.0 % samt 5.5 %. Helt meningslös ombyggnad från t.ex. 3.1 % skevning till 2.5 % skevning medför påtaglig förbrukning av asfalt och därmed av den importerade oljeprodukten bitumen. Trots detta förekommer upphandlingar där Trafikverket kräver den typen av åtgärd. Det torde vara svårt att hitta åtgärder med lika usel kostnadseffektivitet för skattemedel, som att bygga om trafiksäkert bättre fungerande skevning till 2.5 %, enbart för att anvisningen för Vägars och Gators Utformning (VGU) innehåller riktlinjer som är ogenomtänkta för underhåll av befintliga vägar.

Från 2012 års utgåva av VGU anges (oavsett vägens hastighetsgräns) samtliga tillåtna målvärden för skevning i samma diagram, se Figur 8.

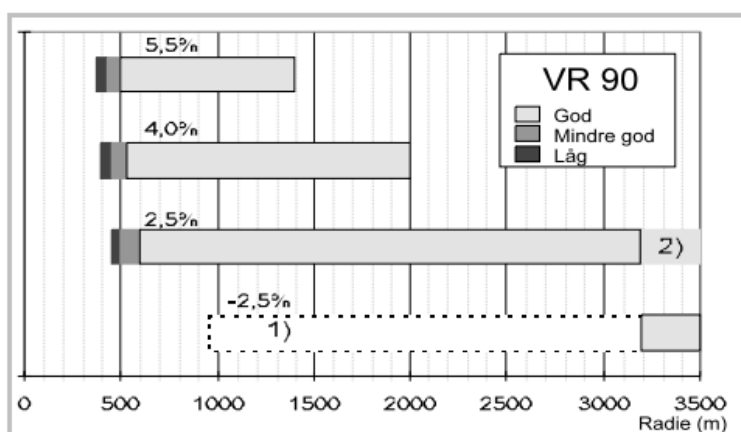
Trafikverkets krav på största tillåtna avvikelser mellan byggt och projekterat tvärfall är formulerat på ett komplicerat sätt i dokumentet *Bitumenbundna lagar*, TDOK 2013:0529. I praktiken tillåts inte större avvikelser än 0.5 % för ett medelvärde över 20 m. Detta innebär att största tillåtna skevningsvärde ute på väg är $5.5 + 0.5 = 6.0$ %, medan det lägsta är $2.5 - 0.5 = 2.0$ %.

Fram till 2012 års utgåva användes i VGU ett för varje hastighet unikt diagram över tillåten skevning. Diagram för hastigheten 90 km/tim visas i Figur 9 Formel 8 Figur 9. Observera att Vägverket hade förväxlat fotnot 1 & 2.

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	



Figur 8 Val av skevning, enligt 2012/2015 års utgåvor av VGU kravdokument



¹⁾ Skevning i stora radier kan väljas om det ej medför problem med vattenavrinning i skevningsövergångarna
²⁾ Negativ skevning kan väljas i undantagsfall vid vattenavrinningsproblem

Figur 9 Skevning för referenshastighet VR90 km/t, enligt tidigare VGU (2004)

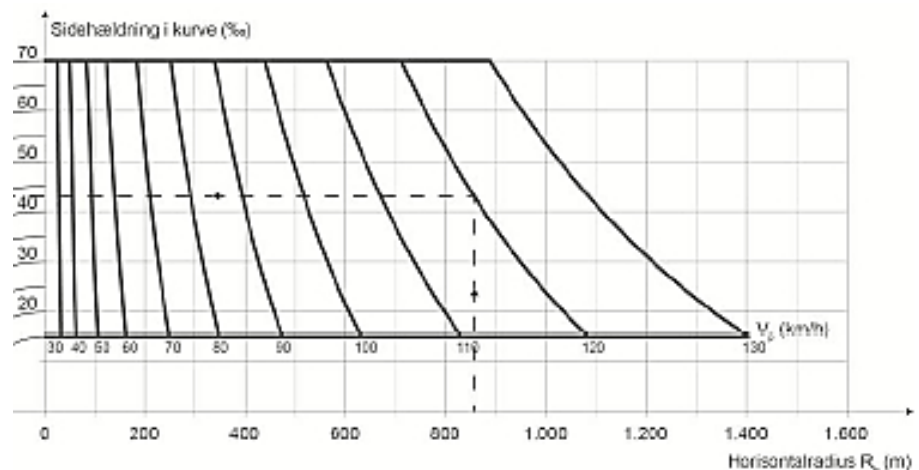
Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

Skevning enligt Danmarks vejregler

På danska kallas skevning för *sidehældning* eller *radial fald*.

Till skillnad från svenska VGU anges i de danska vejreglerna inte diskret skevningsvärde. Istället eftersträvas optimal skevning för stabil kurvtagning (enligt den i och för sig diskutabla punktmassemodellen). Detta öppnar upp för en förnuftig projektör att vid underhåll i hög grad anpassa målvärdet efter befintlig vägs skevningsvärden, i sektion för sektion.

Enligt vejreglernas handbok "*Tracering i åbent land*" (2012) ska skevningsvärdet endera räknas fram med en formel (från analys med punktmassemodellen), alternativt hämtas ur det diagram som visas i Figur 10. Vejreglerna innehåller samma uppsättning sidofrikionstal som svenska VGU, men anger till skillnad från VGU att dessa bygger på ett komfortkriterium. Det påståendet stämmer med Vägverket (1983) och till skillnad från VGU luras alltså inte läsarna på hur skevningsvärdena i Danmark har tagits fram.



Figur 10 Sammenhæng mellem radius og sidehældning i kurver

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

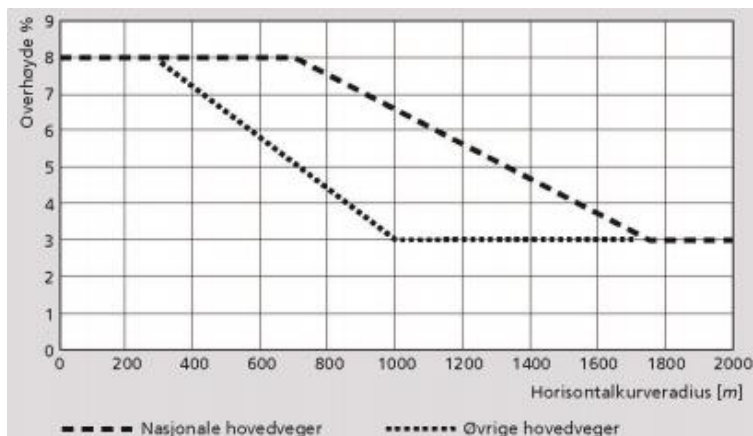
Skevning enligt Norges håndbøker

Skevning vid nybyggnation i Norge

Handbok N100 *Veg- og gateutforming* avser nybyggnation. Där anges maximalt målvärde för skevning ("overhøyde"), vilket är 8.0 % för alla vägtyper utom A1 "Atkomstveger i boligområder, fartsgrense 30 km/t" där max skevningsvärde är 5.0 %. Minimivärden för skevning saknas. Det medför uppenbar risk att vägar utformas trafikfarligt feldoserade.

De skevningsvärden som anses lämpliga vid projektering är redovisade i en annan handbok; V120 *Premisser for geometrisk utforming av veger*. Där återfinns det diagram som visas i Figur 11. Mellan kurvradierna 300 m och 1700 m har projektören ett spelrum på upp till 3.5 procentenheter att fritt välja målvärde inom.

Extremt anmärkningsvärt är att kraven helt saknar koppling till vägens hastighetsgräns. Skevningens uppgift är att motverka sidkrafter vid kurvtagning, vilka enligt fysikens lagar är proportionella mot hastigheten i kvadrat. Därför är det en självklarhet att krav på skevning ska vara differentierade efter dimensionerande hastighet!



Figur 11 Overhøyde for nasjonale hovedveger og øvrige hovedveger

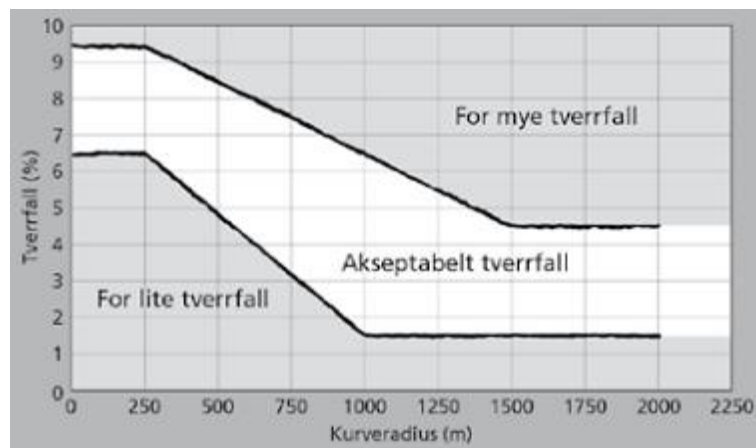
Tolerans för tvärfallsavvikelse från projekterat värde vid nybyggnation anges i handbok N200 *Vegbygging* (2014). Enligt Figur 604.1 i handboken är toleransen för tvärfall 4 eller 6 mm, beroende på vägtyp. Tvärfall är inte ett längdmått, utan ett lutningsmått. Det mäts därför i enheten [%] och inte i [mm], vilket innebär att nämnda toleranskrav på 4 respektive 6 mm är grovt felaktigt formulerade och därmed i praktiken helt betydelselösa.

Skevning vid underhållsbeläggning i Norge

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

Vid underhållsbeläggning ska enligt handbok R610 *Standard for drift og vedlikehold av riksveger* körfältens tvärfall uppfylla krav enligt Figur 12. Dessa krav utgår från målvärden på mellan 3 och 8 %, vilka kombinerats med en utförandetolerans på +/- 1.5 %. Detta resulterar i att största tillåtna skevning är $8 + 1.5 = 9.5$ %. Trots isiga vägbanor vintertid, tillåter Norge alltså skevningsvärden på ända upp till 9.5 %.

Observera att kraven på skevningsvärde vid underhåll respektive vid nybyggnad inte är korrekt synkroniserade. Exempelvis tillåts för kurvradi 700 m upp till 8.0 % skevning vid nybyggnad enligt Figur 11, men i underhållsskedet är det enligt Figur 12 otillåtet stor skevning vid den radien. Samhällsnyttan med att i underhållsskedet bygga om en vägbana som uppfyller nybyggnadsstandard måste rimligtvis vara helt obefintlig.



Figur 12 Tverrfall ved utførelse av dekkevedlikeholdstiltak

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

Global State-Of-The-Art för utformning av horisontalkurvor

Principer för utformning av vägars horisontalkurvor (kurvradie, skevning, sidofriktionsutnyttjande, m.m) världen runt har sammanställts och analyserats av Bartlett (2016).

Analysen avrundas med följande kommentar, fritt översatt:

"Sannolikt utgör de värden som ingår i olika regelverk för vägutformning, en samling krav som är både alltför komplicerade och alltför förenklade. Alltför komplicerade, med avseende på att det rimligtvis inte finns behov av så olika värden. Till exempel används olika värden för maximal skevning. Likaså bör det för likartade vägytor och fordonstyper räcka med en enda uppsättning sidofriktionsstal. Alltför förenklade, då vägutformningsanvisningar för kurvor typiskt tar hänsyn enbart till personbilar samt till friktion enbart på belagda vägytor."

Bartlett skriver också att vägregelverk bör standardiseras och förenklas enligt dessa grundprinciper:

1. Världsstandarden för vägregler bör vara uppbyggd som ett modulsystem, där varje modul beskriver en viss parameter.
2. Det ska finnas ett huvuddokument för varje parameter, med "justeringar" utgivna av ansvariga myndigheter endast där lokala förhållanden är väsentligt avvikande.
3. Standarder får inte dubbleras.
4. Standarder ska relatera till klimat- och terrängförhållanden, inte till administrativa gränser.
5. Varje modul ska innehålla detaljerade uppgifter hur dess parameter påverkas av den primära faktorn; vägens dimensionerande hastighet.
6. Varje modul ska innehålla kommentarer och/eller värden för de viktigaste sekundära faktorerna, så som typ av:

- Väg.
- Fordon.
- Vägyta.
- Terräng.
- Klimat.

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

4.4 För lite skevning leder till olyckor

FHWA: 3 % fler bilolyckor per procent saknad skevning

På uppdrag av amerikanska Federal Highway Administration utvecklades en metod att bedöma vägars säkerhetsprestanda, genom att kombinera fyra typer av input:

1. Historisk trafikolycksdata.
2. Statistiska modeller.
3. Resultat från studier före och efter åtgärder.
4. Värderingar utförda av trafiksäkerhetsexperter.

I projektets slutrapport, se FHWA (2000), estimeras att feldoserade kurvor ökar olycksutfallet avseende personbilers avåkningsolyckor och mötesolyckor. Olycksökningen uppges vara ca 3 % för varje procentenhet för lite skevning i en kurva, jämfört med vägreglernas ideala skevningsvärde. Skevning +3 % istället för skevning +5 % väntas alltså medföra $2 \times 3 \% = 6 \%$ fler olyckor med personbilar.

Feldoserade kurvor vanlig olycksorsak i Sverige och Norge

Tre färskaste studier har bekräftat att feldoserade kurvor är vanlig olycksorsak på landsvägar både i Sverige och i Norge.

Bogdashova (2012) studerade polisrapporterade olyckor med personskador under 10 års tid på E6 i Sør-Trøndelag. Hypotesen var att felaktigt tvärfall leder till avåkningsolyckor och mötesolyckor. Resultaten visar att tvärfallsfel är vanligt förekommande på vägsträckan, samt att olycksfrekvensen stiger där vägen har fel tvärfall. Tydligast samband mellan tvärfallsfel och olycksfrekvens konstaterades för mötesolyckor. Högst olycksrisk konstaterades i kurvor med mer än 7 procentenheters avvikelse från tvärfall enligt vägnormens krav (detta innebär typiskt att vägbanan lutar åt helt fel håll), liksom i kurvor med mindre än 500 m radie. Frekvensen för avåkningsolyckor var också klart högre på delsträckor där tvärfallet inte uppfyller de norska underhållskraven (kraven framgår i Figur 12). Studien inkluderar en kostnads kalkyl för reparation av tvärfallsfel större än 2 procentenheter. Att reparera tvärfallsfelen i de 20 mest olycksdrabbade kurvorna bedöms av Bogdashova kosta över 30 miljoner norska kronor. Bogdashova räknade med en kostnad på hela 3 000 NOK/m² för att rätta till tvärfallet. Det är en milt sagt överdriven kostnad. Som jämförelse kan nämnas att det kostade ca 3 miljarder SEK att bygga den 78 km långa och 20 m breda planfria motorvägen E4 Uppsala – Mehedeby, vilket motsvarar ca 1923 SEK/m².

Lofthaug (2012) studerade polisrapporterade olyckor med personskador under 10 års tid på E6 i Nord-Trøndelag och Nordland upp till Mosjøen. Sträckindelningen utfördes i samarbete med en bilbärgningsman med specialitet

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

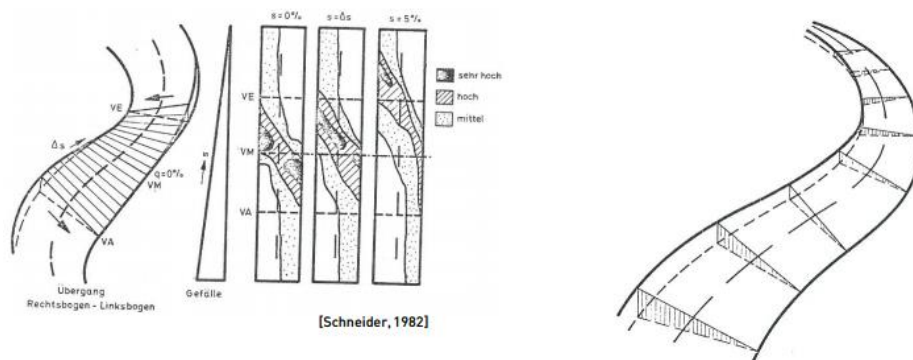
att bärga tunga lastbilar. På de fyra delsträckor som bilbärgaren pekade ut, konstaterades att tvärfallsfel var den klart största orsaken till olyckor. Spår-
djup i asfalten däremot, visades vara obetydlig orsak till trafikolyckor. Spår-
djupet översteg underhållskravet på en enda av olycksplatserna. Samman-
taget visar resultaten ett klart samband mellan tvärfallsfel och olyckor.
Lofthaug använde samma grovt felaktiga å-pris för tvärfallsjustering som
Bogdashova angett.

Yaqub (2014) studerade polis- och sjukvårdsrapporterade olyckor med per-
sonskador under 10 års tid på väg 360 Lycksele - Vilhelmina. Bland de para-
metrar som studerades ingick sidofriktionsbehov (en funktion av dimension-
erande hastighet, kurvradie och tvärfall), vägojämnhets mått som IRI-värde,
oönskad tvärfallsvariation, megatextur, makrotextur, kurvatur, snedlutning
(resultanten till längslutning och tvärfall; avgörande för vägytans vattenavrin-
ning och därmed för halkrisk vid regn samt på isfläckar) samt spår-
djup i as-
falten. Analysen inleddes med bortfiltrering av olyckor där vägparametrar
sannolikt inte har betydelse, d.v.s. viltolyckor, korsningsolyckor, följdolyckor
samt olyckor där händelseförloppet beskrev uppenbara brister i förarens
körning. Filtreringen minskade olycksdata med en dryg tredjedel. Resultaten
visar att 70 % av olyckorna inträffade i samband med kurvtagning, trots att
kurvor bara utgör 13 % av den studerade vägens längd. Vid samtliga olyckor
utom en, kunde stora brister hos vägen uppmärksammas. På 80 % av
olycksplatserna uppvisade två eller fler vägparametrar allvarliga brister. 70
% av olyckorna skedde på platser med trafikfarligt låg snedlutning, d.v.s. där
VGU:s krav på minst 0,5 % lutning underskreds. Detta var i de flesta fall i
skevningsövergång före eller efter kurva. På 65 % av olycksplatserna över-
skred sidofriktionsbehovet den dimensionerande sidofriktionen enligt väg-
reglerna i VGU, d.v.s. kurvan var endera för tvär för hastighetsgränsen, eller
hade alltför feldoserat tvärfall. På 55 % av olycksplatserna uppvisade tvärfal-
let stor oönskad variation, d.v.s. överstigande det av EU-projektet ROAD-
EX föreslagna gränsvärdet max 3.0 promille vinglighet hos tvärfallet. Tvärfalls-
variationen bestod typiskt av kraftigt deformationerad vägkant ("kanthäng"). Stu-
dien visade ingen som helst koppling mellan spår-
djup i asfalten och trafiko-
lyckor. Som övergripande lösning på olycksriskerna föreslog Yaqub var-
ningsskyltar vid skarpa kurvor alternativt hastighetssänkning, samt att stor
kraft läggs på att vid underhållsbeläggning skapa korrekt utformade tvärfall
som minimerar sidkraften vid kurvtagning.

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

4.5 Färre olyckor med minskad negativ skevning

Sedan 1920-talet är det känt att uppbankning av ytterkurvor ger bättre kördynamik och sänker behovet av sidofriktion. Nästan lika gammal är kunskapen att vid in-/utgång av uppbankad ytterkurva finns risk för dålig vattenavrinning och därmed vattenplaningsolyckor, eftersom tvärfallet där är nära 0 % på några tiotals meter. Halkrisken är särskilt stor om den s.k. skevningsövergången ligger på sträcka utan längslutning. Överrisken för vattenplaning kan helt elimineras med s.k. negativ skevning. Negativ skevning innebär att vägbanan byggs med lutning utåt i ytterkurva, se Figur 13. För att undvika instabilitetsolyckor inne i kurvan kan negativ skevning endast användas vid kurvor med mycket stor radie i förhållande till hastigheten.



Figur 13 Negativ skevning minskar vattenplaningsrisken. Schneider (1982).

Olycksstatistik från Tysklands Autobahn visar, enligt Schneider (1982) samt enligt Krebs et al (1982), att negativ skevning ger färre olyckor vid kurvradie $R > 8000$ m jämfört med kurvor som bankats upp till skevning. Vid Autobahntempo 140 km/tim innebär $R = 8000$ m en sidoacceleration på 0.19 m/s^2 . Data visar också att i kurvor längre än 2000 m ger negativ skevning ökad olycksfrekvens vid kurvradier mellan 5000 m och 8000 m. Vid kurvradie $R < 5000$ m ger negativ skevning entydigt ökad olycksfrekvens.

Autobahn-statistiken visar också att filbyte i negativt skevad kurva medför kraftigt ökad olycksrisk. Risker vid filbyte i kurva beskrivs under egen rubrik senare i denna rapport.

Slutligen visar data från Autobahn att olycksfrekvensen i negativt skevad vänsterkurva/ytterkurva är klart lägre vid -1.5 % skevning än vid -2.0 % och ökar med ytterligare ökande negativ skevning. Det samstämmiga budskapet från både olycksstatistik och teoretisk analys har medfört att tyskarna efter 1982 slutade bygga större negativ lutning än -1.5 %. Tyskarna har också utslutit lägre belopp än 1.5 % för tvärfall hos väg förlagd ovanjord, p.g.a. att sättningar i vägbanan kan ge minskad lutning.

Svenska VGU föreskriver -2.5 % tvärfall vid negativ skevning. Svenska vägar med negativ skevning har därmed sannolikt avsevärt högre olycksfrekvens,

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

än om de hade byggts med bara -1.5 % negativ skevning. VGU bör alltså justeras så att negativ skevning utförs med -1.5 % istället för -2.5 %. Mindre än 1.5 % tvärfall undviks med hänsyn till risk för dålig vattenavrinning om tvärfallet minskar, t.ex. om vägen får sättningsskador eller utsätts för inkompetent beläggningsunderhåll. (OBS! Många svenska motorvägar har byggts med bombering, istället för med negativ skevning över hela vägbanan så som det tyska konceptet enligt Figur 13. Detta innebär att filbyte medför krängning och störande sidkrafter vid filbyte och därmed ytterligare ökad olycksrisk jämfört med Autobahn-design).

Spacek (1987) hävdar att det inte är någon större fordonsdynamisk skillnad mellan -2.5 % och -1.5 % negativ skevning. Argumentet är att det "bara" motsvarar en skillnad på 0.01 i friktionstal, vilket skulle vara försumbart. Påståendet är allvarligt missledande, då 0.01 utgör en stor andel av sidofriktionstalet. Med odubbade däck på svår ishalka kan sidofriktionstalet vara lägre än 0.05. Vid halka är det mycket stor skillnad på kursstabiliteten vid -2.5 % och -1.5 % negativ skevning; effekten kan då motsvara ca $0.01 / 0.05 = 20$ % av den tillgängliga sidofriktionen. Skillnaden mellan -2.5 % och -1.5 % negativ skevning måste tvärtom anses högst väsentlig, i synnerhet på halt vinterväglag, och författaren till skriften (som ingår i underlaget till den schweiziska vägnormen) har uppenbart dragit en grovt felaktig slutsats.

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

4.6 Ökad skevning ger stabilare bilkörning

Skevningsvärden i vägregler runt om i världen är framtagna antingen utifrån åkkomfort (i USA genomfördes på 1930-talet försök med bilpassagerare som hade förbundna ögon), eller med hänsyn till sladdrisk vid menligt för-
enklad teoretisk analys av kraftspelet vid kurvtagning. I sladdrisk-konceptet ingår säkerhetsfaktorer som gör att dimensionerande sidofriktionstal har liknande storleksordning som sidofriktionstal härledda utifrån åkkomfort.

Vid verklig körning tillkommer omständigheter enligt nedan, vilka sällan beaktats vid enkla teoretiska analyser.

Vingel vid verkliga färder ökar behovet av skevning

Bonnesson (2000) pekar på att verkliga färder alltid sker med viss fluktuation i färdad kurvradie, jämfört med vägens/körfältets egen kurvradie. För att ta hänsyn till denna effekt rekommenderar han att sidofriktionsbehovet räknas upp med en faktor 1.15, baserat på en rad undersökningar. Nettoeffekten är att vägregelverk bör ange ökat skevningsvärde, jämfört med grundanalys med punktmassemodell. I praktiken är detta en rekommendation att öka skevningen i motsvarande grad.

Denna typ av motiv till ökad skevning har tidigare kritiserats av bl.a. MacAdam et al (1985.b).

Filbyte ökar behovet av skevning på flerfältsväg

Vägars skevning är utformad utifrån den sidkraft som uppstår vid färd i vägens dimensionerande hastighet utmed vägens horisontalkurvatur. Detta är en rimlig utgångspunkt på mindre vägar med mötande trafik, där omkörning i kurva är sällsynt. På mötesfria flerfältsvägar däremot, ger vägens kurvatur en underskattning av de sidkrafter som omkörande fordon utsätts för.

Autobahns olycksstatistik bekräftar att filbyte i negativt skevad kurva medför kraftigt ökad olycksrisk, se Schneider (1982) samt Krebs et al (1982).

Granlund (2010.b) visade att vid hastigt filbyte på 90 km/tim väg ökar fordons färdade kurvatur (och därmed sidkraften) med 35 % i tvär kurva med radie ca 300 – 350 m. I en flackare kurva, radie ca 1000 m, ökar den färdade kurvaturen procentuellt sett betydligt mer.

Detta leder till en insikt om att på flerfältsvägar måste sidofriktionsbehovet räknas upp med hänsyn till lagliga omkörningar, vilket i praktiken leder till krav på ökad skevning på flerfältsvägar. Det enda alternativet vore annars att införa filbytesförbud i kurvor på flerfältsväg, åtminstone vid våt eller på annat sätt halkig vägbana.

Svenska VGU (2015) har, trots ovanstående fakta, ingen korrektion för ökad skevning på flerfältsvägar.

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

Maximal skevning enligt modern riskbedömning

Lay (1998) diskuterar övre begränsning av skevning.

"Skevning brukar vara begränsad till högst cirka 10 %, med hänsyn till:

- a) risken att långsamma höga fordon välter inåt,*
- b) byggproblem, t.ex. nivåanpassning mot kantsten vid trottoar,*
- c) en tendens att fordon genar mot insidan av kurvan, samt*
- d) ökad längd på övergångssträckan där skevningen byggs upp".*

Nedan analyseras ett par andra argument för begränsning av skevning.

Kan kännas otryggt att styra åt fel håll vid låg fart på halka

Ett argument för begränsning av skevningens storlek är att "överdosering" kan tvinga förare att styra "åt fel håll", d.v.s. styra höger upp mot skevad vänsterkurva/ytterkurva. Detta kan för otrygga förare upplevas som förvirrande, vilket kan skapa farligt beteende.

MacAdam et al (1985) hävdar att det inte är ett relevant argument, då deras studie inte funnit behov av att styra emot ("counter-steering"). Författaren av denna rapport har dock avvikande mening. I Sverige är svår halka ganska vanligt även på Europavägar med hög halkbekämpningsklass. Genom egen erfarenhet är det konstaterat att vid försiktig långsam körning på ej halkbekämpad glattis i överdoserad kurva kan man tvingas styra "åt fel håll". Den amerikanska studien från 1985 har helt enkelt inte beaktat svenska vinterförhållanden och saknar därför relevans här.

Glidningsrisk vid nödstopp på ishalka i ytterkurva

Stor skevning medför risk för glidning i sidled inåt i kurvan, i samband med körning på ishalka i låg fart eller vid stopp med varma däck.

I modern riskbedömning bestäms **Risk** som produkt av **Sannolikhet** och **Konsekvens**. Glidning i sidled vid låg fart ger typiskt tämligen harmlös konsekvens i form av startbesvär. Därför innebär stora skevningsvärden relativt låg risk för svår personskada. Låga skevningsvärden däremot, ger stor sannolikhet för avåkning eller mötesolyckor. Dessa sker i hög fart och ger därmed ofta svår konsekvens. Sammantaget ger låg skevning hög risk för svår personskada, till skillnad från stor skevning. I linje med Nollvisionen är det alltså betydligt viktigare att undvika högfartsolyckor vid små skevningsvärden, än att vid stillastående undvika glidningsmöjlighet p.g.a. stor skevning.

Glidning inåt i kurva sker utan pådrivande inverkan från kurvtagning, p.g.a. att friktionen mellan däck och väg inte klarar övervinna skevningen. Enligt Trafikverkets kontraktshandlingar med driftentreprenörer (ATB Vinter 2003), ska halkbekämpning utföras med sådana metoder och givor att körfältens vägfriktionstal efter avslutad väderhändelse är minst 0.25 inom 2 timmar i

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

väggklass 1 (inom upp till 8 timmar i väggklass 5). Ett teoretiskt absolut övre maximum för skevning är därmed uppemot 25 %. Detta skevningsvärde måste, mer eller mindre godtyckligt, reduceras för glidningsrisk orsakad av dåligt eller sent utförd halkbekämpning, liksom för risk under åtgärdsstiden.

Maximal skevning i regler för vägar i kallt klimat

Olika vägregelverk anger olika gränsvärden för skevning. Exempelvis tillåter Statens vegvesen i Norge 8 % skevning (9.5 % efter tillägg för tolerans vid underhållsbeläggning). Detta motsvarar vägfriktionstal på under 0.10, vilket är långt under friktionstalet 0.25 som vägdriften ska säkerställa.

Svenska VGU är framtagna för nybyggnad med stora kurvradier och tillåter maximalt 5.5 % skevning. VGU är inte anpassad för befintliga vägar med låg standard, exempelvis för mycket tvära kurvor med snäva radier som medför mycket högt behov av sidofriktion och därmed högsta möjliga skevning. För befintliga svenska vägar bör därmed samma maximala skevning som tillåts i Norge fungera bra, d.v.s. upp till 9.5 % i sådana kurvor som är mycket tvära i förhållande till hastighetsgränsen.

Korsning i kurva förutsätter begränsning av skevningen

Svenska vägutformningsanvisningen VGU är uppdelad i tre dokument; ett med begrepp och grundvärden, ett med krav, samt ett med råd.

VGU Råd (2015) innehåller i avsnitt 4.1.2.5 en klok rekommendation om begränsning av specialfallet skevning i kurva som har en korsning med annan väg: *"Korsningar bör om möjligt placeras där primärvägen är utformad med dubbelsidigt tvärfall alternativt med skevning $\leq 2,5$ %."* Detta råd kunde på goda grunder kompletteras med ett krav på begränsning, förslagsvis max 4 % skevning i kurva som har korsning.

Granlund (2015) visar hur korsning i kurva med stor skevning är direkt vållande orsak till olyckor med EU-semitrailers, till följd av att chauffören tappar styrförmågan när lutningsförändringar längs ekipagets färdväg orsakar girlåsning mellan den annars girdade dragbilen och semitrailern. Detta illustrerades av en rad korsningsolyckor i en kurva med 6.6 % skevning på Rv 34 vid Motala.

Gärna lägre maximalt tvärfall på bomberad raksträcka

Stort tvärfall på raksträcka gör vägen onödigt jobbig att köra, både i form av snedbelastning på ryggen (arbetsmiljöproblem för yrkeschaufförer) och i form av mer ansträngande manövrering. I syfte att skapa marginal mot dålig vattenavrinning används vid nybyggnation tvärfall med marginal mot sättningskador; normalt 2.5 % och vid kallblandad beläggning (lågtrafikerad

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL RAPPORT	
Datum: 2016-02-08		
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

klenare väg) 3.0 %. Större tvärfall än så vore enbart av ondo. Vid underhåll har vägbanken och undergrunden satt sig. Därmed behövs inte samma sättningsmarginal. Detta innebär att vid underhåll kan tvärfallet på raksträcka med fördel kan minskas till 2.0 %.

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

4.7 Tunga fordon behöver extra stor skevning

Halverad sidofriktion för lastbilsdäck på is i tvär kurva

Långa fordon, så som tunga bussar, lastbilar (undantag: korta dragbilar) och lastbilssläp är genom naturlagarna rejält understyrda. Detta innebär att de i tvära kurvor, exempelvis i många rondeller samt av- och påfartsramp, körs med stor avdriftsvinkel. Avdriftsvinkeln utgör skillnaden mellan chassits färdriktning och styrhjulens riktning. Vid stor avdriftsvinkel ändras hjulvinklarna och därmed kraftspelet mellan styrdäck och vägbana.

Inför studiebesök för Nordiskt Vägforums utskott Fordon och Transporter på Nokian Truck Tyres däckfabrik 1 februari 2010 hade fråga ställts om hur låg sidofriktion som vid hård kurvtagning typiskt mäts mellan tunga fordons styrdäck och våt is. Ironiskt nog råkade sällskapet tunga buss, körd av en av finska Trafikverkets fordonsexperten, tappa styrförmågan i en snäv avfartsramp från motorvägen i Nokian. Tack vare en liten sandsträng i vägkanten återfick bussföraren Koskinen så pass med väggrepp att resan inte slutade med snöplig trafikolycka. Under studiebesöket visade Nokians forskningschef Teppo Siltanen att ett typiskt sidofriktionsvärde på fuktig is är 0.10, men att värdet kan sjunka ned mot 0.05 när avdriftsvinkeln ökas vid snäv kurvtagning. Detta är mycket intressant, eftersom vägregler för skevning i kurva baseras på betydligt högre sidofriktionstal än 0.05. Vid beräkning av lämplig skevning får betydligt högre skevningsvärde med sidofriktionstal 0.05 istället för t.ex. 0.10. Vägreglerna har alltså underskattat tunga fordons behov av skevning vid halka i snäva kurvor, så som rampen vid motorväg där körningen sker med stor avdriftsvinkel. Vilket alltså passande nog demonstrerades med NVF-utskottets buss i en "platt" snäv ramp i trafikplatsen i Nokian.

Variation i sidofriktion under lastbilsekipagets många däck

MacAdam et al (1985.a-c) analyserade kurvtagning på halt väglag i kurva som skevats utifrån analys med punktmassemodellen och med de sidofriktionstal som ingår i vägreglerna i Michigan m.fl. delstater. Kurvtagningsanalysen utfördes dels med 5-axligt semitrailerekipage och dels med två personbilar. Analysen gjordes genom datorsimuleringar, vilka sedan validerades i fältmätningar på verkliga fordon. Projektet inkluderade avancerade studier av skillnader i sidofriktion under lastbilsekipagets många däck, så som till följd av oscillerande ratt rörelser vid vindbyar osv.

En slutsats var att tunga fordon har betydligt större variation i sidofriktionskraft under hjulen vid kurvtagning, bl.a. eftersom de har fler fjädringssystem och högre tyngdpunkt än vad personbilar har. Skillnaden är störst mellan innerhjul och ytterhjul, till följd av lastbilssläpets krängning.

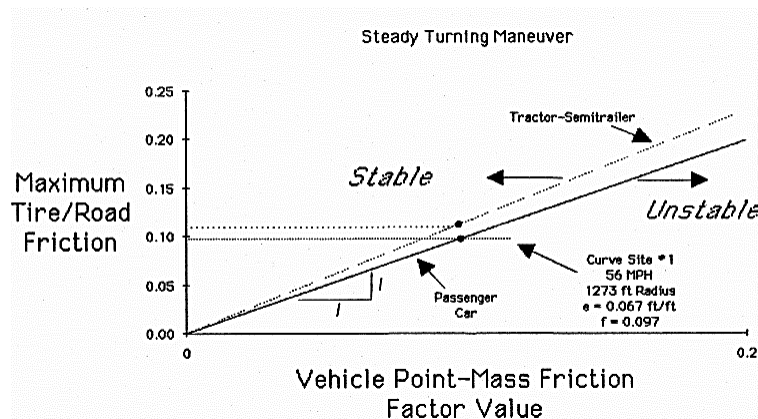
En annan slutsats var att vid undanmanövrering förbi föremål under kurvtagning, åtgår avsevärt mer sidofriktion än vid stabil kurvtagning. Detta är en

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

god anledning till att ha en säkerhetsfaktor på sidofriktionstalet; läs mer i tidigare avsnitt om filbyte.

Resultaten bekräftade att däck/vägfriktion ungefär lika med den som används vid beräkning av skevning med punktmassmodellen är tillräcklig för att ge stabil kurvtagning med personbilar. Men för ekipaget med 3-axlig dragbil och 2-axlig semitrailer krävdes mer än 10 % högre vägfriktion än vad vägreglerna i Michigan ansätter, för att ekipagets kurvtagning ska bli rimligt stabil. Detta visas i Figur 14. Därför rekommenderar författarna att det erforderliga sidofriktionstalet vid vägutformning multipliceras med faktorn 1.10 för att skapa tillräcklig skevning för stabil kurvtagning med tunga fordon.

Dessa resultat kan omvänt tolkas som att vid vägreglernas dimensionerande sidofriktion behöver semitrailerekipaget mer än 10 % större skevning än vad punktmassmodellen visar (alternativt behövs flackare kurvradii eller sänkt hastighet).



Figur 14 Semitrailer behöver 10 % mer sidofriktion än personbil

I analysen testades sidofriktionstal från ca 0.05 (våt is) upp till drygt 0.5 (asfalt), skevningarna 6.7 % och 7.0 %, kurvradierna 388 m och 70 m, samt hastigheter i några steg mellan 51 och 92 km/tim. Semitrailerns tyngdpunkt var 1.78 m över vägbanan (endast 0.5 m över flakets plan). Ett släp med dubbla lastplan och ogynnsam lastfördelning kan enligt Dahlberg (1999) ha tyngdpunkten 2.3 m över vägbanan. Vid analys med högre tyngdpunkt hade behov av än större skevning framkommit.

Observera att behovet av sidofriktion beror av hastigheten. Om tunga fordon inte får köra lika fort som personbilar, så som på svenska vägar med hastighetsgräns högre än 80 km/tim (lastbil med släp), måste projektören kontrollera vilket trafikslag som behöver högst sidofriktionstal samt högst skevning.

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

Hög tyngdpunkt gör tunga fordon mer vältbenägna

Winkler (2000) konstaterar att vältolyckor bara utgör ca 4.5 % av lastbilso-lyckorna, men utgör över hälften av dödsolyckorna bland lastbilschaufförer. Vältolyckan är alltså en extremt dödlig olyckstyp.

Tyngdpunktens position är avgörande för fordonets benäget att välta; jämför med förlisningen av det svenska regalskeppet Vasa på dess jungfrufärd år 1628. Ett beprövat mått på fordonets vältrisk är Static Rollover Threshold (SRT). Det anger vid vilken sidoacceleration som ekipaget börjar välta. For- don med låg SRT är mer benägna att välta än de med högre SRT, speciellt vid körning i skarp kurva eller vid plötslig undanmanöver. Enligt en känslig- hetsanalys av Sankar & Surial (1994) är dessa de viktigaste faktorerna för vältbenägenhet hos semitrailerekipage:

- Tyngdpunktens höjd hos semitrailer respektive dragbil.
- Axelfjädringens krängstyvhet.
- Effektiv spårvidd hos semitrailer respektive dragbil.
- Vändskivans höjd.
- Vändskivekopplingens krängstyvhet.
- Däckens styvhet (vertikalt, lateralt samt krängning).
- Ramens flexibilitet, främst hos semitrailern.

Mätning av SRT sker på tiltbord, se Figur 15. För större ekipage finns beräk- ningsmetoder så som UNECE111 och *Roll Compliant Vehicle* (RCV), se To- mar (2015).



Figur 15 Test av SRT hos en semitrailer-tankbil Bildkälla: CVDC

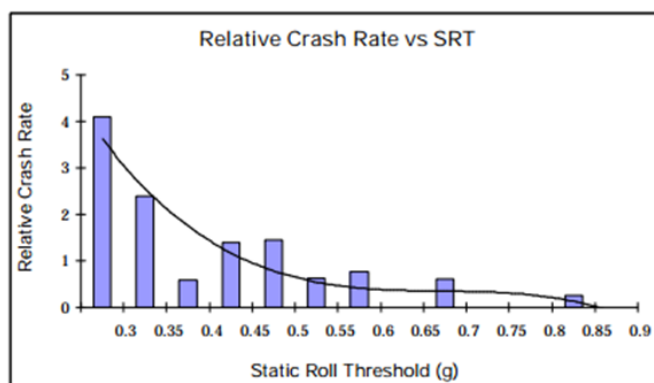
Enligt VicRoads (2011) välter regelmässigt släpfordon innan dragbilen eller lastbilen ens börjat lämna från marken, se Figur 16. En orsak är att den tunga och lågt placerade drivlinan (motor, växellåda mm) och lätta hytten resulter- ar i att dragbilen/lastbilen typiskt har tyngdpunkten lägre över vägbanan, än vad ett lastat släpfordon har. Läs mer i Global Trailer Magazine (2013).

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	



Figur 16 Släpet välter innan chauffören märker det. Bildkälla: VicRoads

Risken att ett tungt ekipage blir indraget i en trafikolycka återspeglas tydligt av ekipagets SRT-värde. Detta visar forskning av bl.a. Mueller et al (1999), se diagram i Figur 17. Dessa resultat är i linje med tidigare resultat från studier av t.ex. Ervin et al (1983), avseende hur fordonets SRT-värde påverkar dess vältbenägenhet.



Figur 17 Relativ olycksrisk som funktion av SRT. Källa: Mueller et al (1999)

Liu et al (1998) visade att dynamisk "verklig" vältgräns är något lägre eller lika med statisk vältgräns, d.v.s. mätvärdet för SRT. Den dynamiska vältgränsen visades vara inom 5 % från SRT för det semitrailerekipage samt det 8-axliga "A-train" som testades under en handfull körmoment.

Enligt Winkler (2000) har 5-axlade semitrailer-ekipage normalt mycket hög vältstabilitet; upp till SRT 0.50. Winkler påpekar emellertid att samtidigt hör vissa typer av 5-axlade semitrailer-ekipage till de mest vältkänsliga ekipagen. Det handlar då om semitrailers fullastade till maxvikt av gods med låg densitet, i kombination med mjuk fjädring, vilka har visats få SRT ända ned till 0.25 och som därmed har mycket hög olycksrisk (se Figur 17). På senare år har gruppen av fordon med farligt låg SRT utökats med fordon som har dubbla lastplan, under körningar där dessa är tungt lastade på övre plan och lätt lastade eller t.o.m. olastade på nedre plan.

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

Hoogvelt et al (1997) granskade polisrapporterade vältolyckor i Nederländerna under två år. Resultaten visar att det välte lastbilsekipage mer än varannan vecka på motorvägnätet. Var sjunde vältolycka medförde personskada eller dödsfall. De fem vanligaste orsakerna till vältolyckor var: svår horisontalkurva, sladd, distraherad förare, hög hastighet samt utformningen av vägens sidoområde. En rekommendation för att förebygga lastbilars vältolyckor var att öka vägbanans skevning.

Med referens till Hoogvelt et al (1997), jämförde de Pont (2006) lastbilars vältolyckor i Nederländerna, inom Nya Zeelands timmertransportindustri samt i Tasmanien. Det visade sig att fördelningen av olika orsaker till vältolyckor var ungefär densamma, trots att körförhållandena och lastbilarna skiljer mycket. 50 - 60 % av vältolyckorna orsakades av för hög hastighet i svår kurva, ca 26 % på grund av att hjulen kommit utanför asfaltkanten, runt 9 % på grund av tekniskt fel på fordonet, ca 7 % på grund av lastförskjutning och ca 6 % av olämplig undanmanöver. De allra flesta av vältolyckorna inträffade i kurva på landsväg. Detta visar att mekanismerna bakom lastbilars vältrisk är överraskande likartad i olika länder. När det gäller avåknningar med tung lastbil, fann de Pont att vått väglag var kraftigt överrepresenterad omständighet.

Den höga andelen vältolyckor relaterade till hög hastighet i svåra kurvor medförde ett förslag om att i Tasmanien införa 80 km/tim högsta hastighetsgräns för lastbilar, medan personbilar får fortsätta köra 100 km/tim. de Pont (2006) avfärdade förslaget med flera argument. För det första ger en sådan reform ingen som helst effekt i de kurvor där överlägset flest vältolyckor sker, nämligen tvära kurvor med hastighetsgräns under 80 km/tim. För det andra medför stor skillnad i hastighet mellan personbilar och lastbilar (så som Sverige har) fler farliga upphinnandesituationer, stress samt omkörningar. För det tredje är det betydligt mer komplicerat att övervaka fortkörning, t ex med fartkameror, när olika fordon lyder under olika hastighetsbegränsningar.

Tunga lastbilars hastighet genom horisontalkurvor undersöktes av de Pont et al (2004). Resultaten visade att:

- Även bland chaufförer som är bekanta med en väg, är det inte ovanligt att överskatta hur fort man trafiksäkert kan köra i vägens olika kurvor. Sidoaccelerationer på ända upp till 0.38 g förekom.
- Hastighetsskyltar är satta för personbilar, vilket i synnerhet i tvära kurvor gör dem missledande för lastbilschaufförer.
- För att fånga lastbilsförares uppmärksamhet inför svåra kurvor bör varning ges med särskild symbol för vältande lastbilssläp. Se exempel från Australien i Figur 18. Relevant varning inför farliga kurvor minskar olycksfrekvensen med cirka 25 % (alla fordonstyper), enligt iRAP (2013).

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

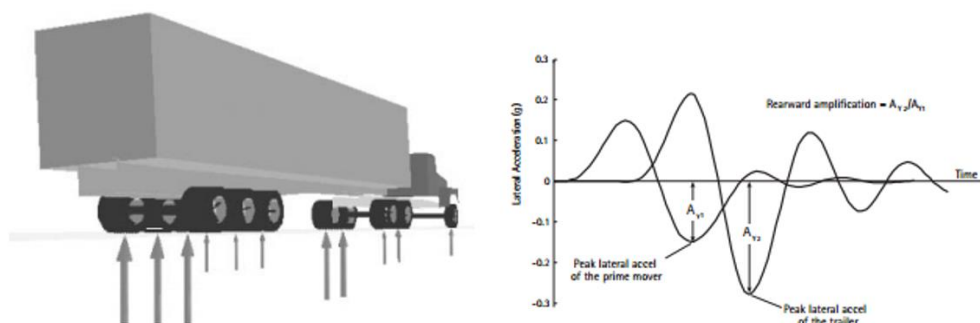


Figur 18 Rekommenderad högsta kurvhastighet för tunga släpfordon

Assum & Sørensen (2010) studerade 130 dödsolyckor med tunga lastbilar i Norge. De fann att av 15 singelolyckor med dödlig utgång för lastbilsåkande, var 12 av olyckorna (80 %) vältolycka i kurva. 11 av de 12 dödliga vältolyckorna (92 %) skedde med lastbilsekipage av typen dragbil med semitrailer. I 8 av de 15 dödliga singelolyckorna var hög tyngdpunkt angiven som riskfaktor vid olyckan. För 6 av de 15 olycksplatserna (40 %) fanns mellan 4 och 8 tidigare olyckor registrerade i olycksdatabasen. Vare sig (brister hos) däck eller styrning var betraktade som riskfaktor i de 15 dödsolyckorna. Med referens till epostväxling med Volvo lastvagnars haverikommission, uppger Assum & Sørensen att dragbil med semitrailer utgör 27 % av olyckorna i Volvos databas, men att denna typ av ekipage utgör hela 54 % av alla vältolyckor. Det visar att gruppen semitrailerekipage utgör en stor överrisk för vältning i kurva.

Släpfordon utsätts dessutom för högre sidkraft

Det är inte nog med att släpfordon är vältbenägna genom att de regelmässigt har högre tyngdpunkt än dragbilar/lastbilar. Dessutom utsätts släpfordon systematiskt för högre sidoacceleration. Vid ratt rörelser, till exempel under ett vanligt körfältsbyte, uppstår mer eller mindre stor bakåtförstärkning (Rearward Amplification) av sidoaccelerationen. Denna förstärkning gör att släpvagnen utsätts för högre sidkraft och därmed större vältrisk, se Figur 19.



Figur 19 Bakåtförstärkning vid girmanöver. Heavy Vehicle Stability Guide (2012).

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

Kurva i nedförsbacke behöver ges extra stor skevning

Eck & French (2002) skriver att 1994 års utgåva av den amerikanska federala vägutformningsanvisningen "AASHTO design policy" saknar säkerhetsmarginaler för tunga fordonas dynamik och stabilitet när det gäller utformning av horisontalkurvor och deras tvärfall/skevning. Detta var en utgångspunkt för ett projekt angående tvärfallsutformning i relativt tvära S-kurvor på tvåfältsvägar i brant terräng i West Virginia. När gamla vägar av denna typ byggdes om och försågs med stigningsfält, minskades deras tvärfall från typiskt 12 – 16 % till de 8 % som den amerikanska vägnormen anger. Efter att skevningen minskats, steg olycksfrekvensen påtagligt i backarnas utförsriktning. Projektets huvudsakliga mål var att ta fram rekommendation för tvärfallsutformning med hänsyn till tunga fordon på denna typ av väg. Klimatdata för West Virginia visar att medelvintern på ett 20-tal orter har upp till drygt 50 dygn med snö, samt upp till 400 cm snöfall.

Projektets litteraturstudie pekar på att olycksfrekvensen är högre i kurvor i utförsbacke än i kurvor på horisontell mark. Detta anses kunna bero på bl.a. det faktum att verkliga hastigheter är betydligt högre än dimensionerande hastighet för horisontalkurvor i utförsbacke. Detta innebär att utförsbackar rimligtvis ska ha högre referenshastighet för vägutformning, jämfört med väg på horisontell mark. En konsekvens av detta, är att i en kurva bör körfältet i nedförsriktning ha större tvärfall än körfältet i stigningsriktning. Alternativt bör båda körfälten ha tvärfall anpassat för den högre referenshastigheten.

Störst sannolikhet för olyckor uppträder vid snäva kurvor (däremot är skadepotentialen högre vid flackare kurvor med högre hastigheter).

Vidare konstaterades i litteraturstudien att lastbilschaufförer anpassar farten efter vägens lutning, men nästan oberoende av backens längd (Detta visar en allvarlig brist på förståelse för bromsars uthållighet; uppenbarligen behöver utbildningen skärpas!). I flacka lutningar kör de flesta onödigt långsamt, medan många kör farligt fort i branta lutningar. Många bromsar inte förrän de påbörjat kurvtagning (detta kan f.ö. vara ett resultat av att klotoider får förrare att missbedöma hur tvär kurvan egentligen är). Detta bromsande inne i kurvan slukar en del av den tillgängliga vägfriktionen, så att sidofriktionen minskar. Dessutom medför bromsandet att vägytan poleras blank, så att våtfriktionen försämras snabbare i kurvor än på raksträckor. Många kurvor har dessutom inte full skevning förrän ett gott stycke in i kurvan. Gravitationen i utförsbacke medverkar till att minska tvärfallets kompenserande effekt till sidkraft vid kurvtagning; detta medför behov av ytterligare ökad skevning.

Speciellt vid hög fart genom korta S-kurvor, liksom vid all körning med "filbytesmanövrar" på ca 2 sekunder, kan lastbilar komma att försättas i rollresonans (strax under 1 Hz frekvens).

Lastbilar utan retarder löper flerfaldigt högre olycksrisk i utförsbackar än lastbilar med retarder. Retarder bromsar enbart på drivande axlar. Poängen med retarderbromsning är att ordinarie hjulbromsar inte behöver användas

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

lika mycket i utförsbacke och då överhettas, utan har fullgod prestanda när de behövs. Retarder och avgasbroms på endast drivaxel kan å andra sidan medföra andra risker i halt väglag.

Semitrailerekipagens ledade vändskivekoppling kan skapa onaturliga rörelser, vilket kan leda till olämpliga körbeteenden när föraren försöker kompensera dessa rörelser.

Modernisering av gamla vägar till tvärsektion som på "bra, moderna vägar" men med bibehållen låg kurvaturstandard kan medföra att förare överraskas av farliga kurvor. Därför behövs effektiv varningsskyltning före dessa kurvor.

Projektet lyfte fram en rad mänskliga faktorer. Bl.a. att sannolikheten att lastbilsförare panikbromsar ökar när sidoaccelerationen överstiger 2 m/s^2 , vilket lätt sker i smalt körfält i kurva i utförsbacke där asfaltkanten är dåligt utformad (inte avfasad och saknar stabiliserad stödremsa).

Projektet konstaterade att både olycksdata och utlåtanden från lastbilschaufförer visade att det innan ombyggnationen från extrem skevning ca 16 % i utförsbacke inte varit problem med för stor skevning ens under vinterhalka.

Beräkningsmodeller etablerades. Dessa bekräftar att ovan nämnda mekanismer medför att kurvor i nedförsbacke behöver mer skevning än kurvor på horisontell mark.

Extra stor skevning upp till 16 % ansågs göra kurvor i brant nedförsbacke mer förlåtande. Dessa skevningsvärden medför inte ökad hastighet för att förkorta restiderna. Däremot ökar säkerhetsmarginalen för de förare som råkar överskatta max säker kurvtagningshastighet vid aktuell kurvradie.

Efter att skevningen minskats, steg olycksfrekvensen påtagligt i backarnas utförsriktning. Forskarnas slutsats är att detta berodde dels på att skevningen minskats till 8 %, dels på att många av den moderna vägsektionen vilseletts att välja för hög hastighet in i kurvor med omodernt låg standard på kurvradie. Därför menar de att vid ombyggnad av gamla vägar ska inte ens extremt hög skevning minskas, såvida det inte finns övertygande säkerhetsskäl för att minska den. Forskarna understryker betydelsen av att smala körfält breddas genom tvära kurvor, så som moderna vägregler föreskriver. Likaså rekommenderas extra bred belagd väggen i tvära kurvor.

Projektet följdes upp av ett federalt projekt om skevning i kurvor i backar, se NCHRP report 774 (2014). Två av slutsatserna där, var att:

- Max skevning i nedförsbacke bör vara 12 % för att undvika problem i skevningsövergångssträckorna.
- Före tvär kurva med flera mötesfria körfält bör skylten "Stay in lane" (Motsvarar att filbyte är förbjudet) sättas upp, samt spärrlinjer målas mellan körfälten.

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

TERNZ: 5 % fler tunga olyckor per procent saknad skevning

Före 2002 välte årligen 9 % av timmerbilsekipagen i Nya Zeeland (NZ). En utredning av växelverkan mellan vägens tvärsektion (bredder, lutningar m m) och tunga fordonas prestanda rapporterades av Milliken & de Pont (2005). Med dessa samband bedömdes potentialen att minska trafikolyckor med tunga fordon genom förbättrad vägutformning. Analysen ledde till vetenskapligt underbyggda slutsatser om bl.a. hur mycket olycksfrekvensen för tunga lastbilar sänks för varje procentenhet som skevningen ökas. Parallellt skärptes kraven på tunga lastbilers vältastabilitet. Efter implementation av reformerna har frekvensen för lastbilers vältolyckor minskats ordentligt i NZ.

Utredningen om säkrare vägutformning inleddes med att granska Nya Zeelands trafikolycksdata från sex år, i syfte att identifiera faktorer i vägens utformning som kan ha varit medverkat till lastbilsolyckor. Tre typer av lastbilsekipage datorsimulerades: en dragbil med semitrailer, en lastbil med släpvagn, samt ett s k B-double fordonståg. Samband mellan olycksfrekvens och fordonens kurvtagningsprestanda (uttryckt med en handfull parametrar) användes för att bedöma inverkan av vägen utformning på olycksrisken.

Forskarnas analys av olycksdata visade bl.a. att:

- Endast i en mycket liten andel (1.4 %) av lastbilers olyckor var vägens utformning angiven som bidragande riskfaktor.
- 20 % av lastbilsolyckorna var klassade som "loss-of-control" olyckor, d.v.s. föraren hade tappat herraväldet över fordonet. Det är sannolikt att många av dessa har påverkats av utformningen hos vägens tvärsektion.
- 66 % av "loss-of-control" olyckorna hade inträffat vid kurvtagning. Många olyckor som inleds med tendens till vältning, slutar som avåkning utan vältning, till följd av lastbilsförarens manövrering.

Samband mellan utformningen hos vägens tvärsektion och lastbilers kurvtagningsprestanda etablerades. Det första sambandet är att den sidoacceleration som krävs för att orsaka vältning är relaterad till vägens tvärfall θ (i radianer) genom den enkla formeln i Formel 2.

Formel 2 Sidoacceleration a vid vältgränsen

$$a_{\text{rollover}} = (SRT - \theta) * g, \text{ där } g = 9.82 \text{ m/s}^2.$$

Observera att effekten av tvärfall kan vara såväl positiv som negativ för vältstabiliteten, beroende på tvärfallets riktning (d.v.s. vilket tecken θ har).

Nästa konstaterande var att tvärfallet har komplex inverkan på den viktöversflyttning som uppstår vid undanmanöver eller filbyte, liksom därmed även på vältstabiliteten. Effekten av tvärfallet varierar med det aktuella fordonets egenskaper, hur manövern genomförs och vägprofilen. Effekten av stort tvärfall på vältrisk vid undanmanöver kan vara såväl gynnsam som ogynnsam. Hursomhelst är effekten sällan stor.

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

Ett tredje samband var att alla de simulerade lastbilarna hade cirka 3 meter/g off-tracking⁴ känslighet för tvärfall. Det innebär att en tvärfallsökning på 6.0 % resulterar i att lastbilsekipaget behöver cirka 0.18 meter ökat sidoutrymme. Tecknen på tvärfallsförändring respektive tvärfallet avgör om den resulterande spårningsavvikelsen ökar eller minskar.

Det fjärde sambandet gäller en vanlig typ av vägskada på klint byggda landsvägar med smal vägren eller brant innerslän, i form av ojämna deformationer nära vägens kantlinje. Viktöverflyttningen vid kurvtagning fördubblades när vägbanan hade skador i form av s.k. kanthäng. Detta gällde för samtliga tre typer av lastbilsekipage. Upp till 25 % av vältolyckorna anses kunna bero på denna typ av vägsador.

Effekten av vägens geometri på frekvensen av trafikolyckor med tunga lastbilar bedömdes för ett antal typer av olyckor, baserat på kunskap om samband mellan fordonets kurvtagningsprestanda och olycksutfall. Författarna anser att detta tillvägagångssätt för att relatera olycksfrekvens via fordonsprestanda till vägutformning ger djupare insikter än rent statistiska betraktelser.

De vägutformningsaspekter som visades ha störst potential för betydande säkerhetsförbättringar är:

- Ökad skevning i yttrekurvor. Sambanden för befintliga vägar visar att för varje procentenhet som skevningen ökas, minskar olycksfrekvensen för loss-of-control olyckor, inklusive vältolyckor, med tunga lastbilar med 5 %. Vältolyckor är den vanligaste typen av svåra trafikolyckor med tunga fordon på landsväg.
- Breddning av den belagda vägrenen, i synnerhet i kurvor. Den näst vanligaste typen av loss-of-control olyckor karaktäriseras av att hjulen (oftast släpvagnens bakre yttre hjul) hamnat utanför asfaltkanten. Viktöverflyttningen fördubblas direkt, när hjulet skär ned i en svag stödremsa. Detta medför avsevärt ökad olycksfrekvens.
- Ökad körfältsbredd i kurvor. Lastbilsekipagens sidoutrymmesbehov påverkas i viss mån när skevningen ändras, men risken för negativ effekt av ökad skevning är liten.

Resultaten av utredningen kan även användas vid "hot-spot analys" av farliga platser även på låg- och medeltrafikerade landsvägar, eftersom platser och sträckor med dålig vägutformning skapar ökad risk för vissa typer av trafikolyckor.

⁴ Off-tracking anger spårningsavvikelsen i sidled mellan lastbilens styraxel och släpets sista axel.

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

Norges Haverikommission: Uppdatera vägreglerna!

Den 5 maj 2014 välte släpet till en svenskregistrerad lastbil lastad med timmer, när ekipaget körde ut på den fyrfiliga motorvägen E6 vid Svinesundparken i Østfold län, Norge. Virket föll av släpvagnen när den välte och spreds över sammanlagt körfälten i motorvägens båda riktningar, se Figur 20. En personbil körde in i virket. Turligt nog blev inga fler fordon inblandade i olyckan. Olyckan hade potential att kunna orsaka mycket omfattande personskador. En likartad olycka skedde i en liknande påfartsramp ett par km från norrut bara några veckor tidigare.



Figur 20 Vältolyckan på E6 vid Svinesund. Foto: S. Johnsen

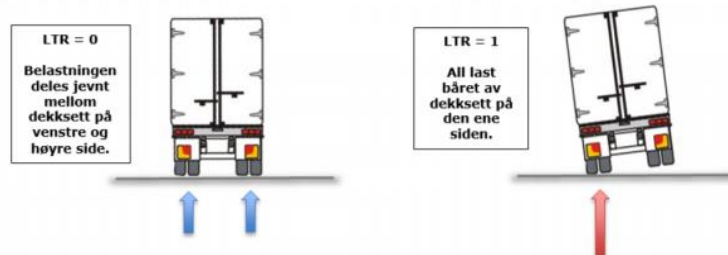
Norska Statens Havarikommission for Transport har med hjälp av WSP undersökt olyckan. Resultaten visar att lastbilen var vältstabil och att föraren hade anpassat hastigheten för att väva in med trafiken som flyter i över 100 km/tim på E6:an. Påfartsrampen har snäv krökning och radien nyper till i slutet av kurvan, precis innan accelerationsfältets början. Olyckan anses ha uppstått till följd av brister i samspelet mellan föraren, det tunga ekipagets prestanda samt vägens funktion, utformning och skick. Bland en rad brister märks att vägbanans skevning inte är fullt uppbankad där kurvans huvudbåge startar, d.v.s. skevningen är för liten i början av kurvan. Datorbaserad rekonstruktion av vältolyckan, se bild i Figur 21, bekräftar att släpvagnen välter i hastighet under den gällande hastighetsgränsen.



Figur 21 Rekonstruktion av vältolyckan vid påfart till E6. Källa: WSP.

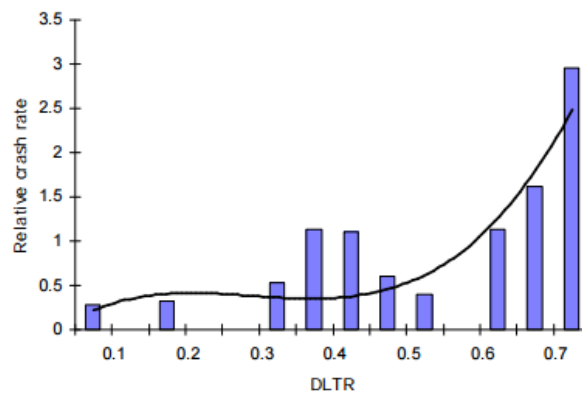
Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

Vid den datorbaserade rekonstruktionen av olyckan användes måttet "Load Transfer Ratio". LTR anger hur mycket vikt som flyttats från ena sidans hjul till den andra sidans hjul. LTR = 0 innebär att belastningen är jämn fördelad. LTR = 1 innebär att all vikt flyttats över till ena sidans hjul, d.v.s. att vältning har inletts. Detta illustreras i Figur 22.



Figur 22 Load Transfer Ratio (LTR)

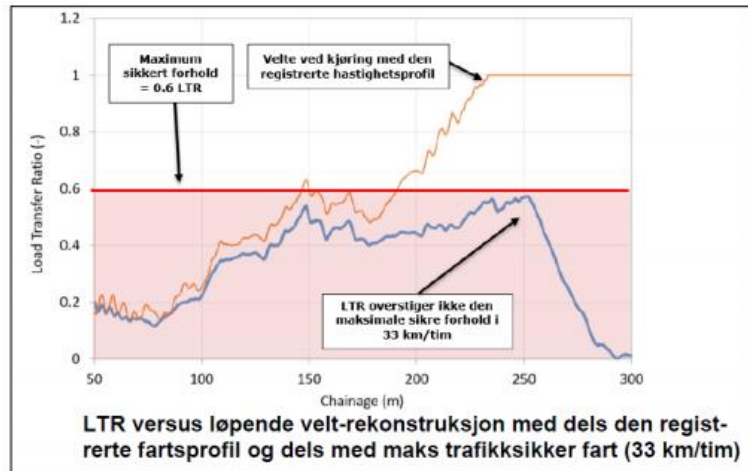
De Pont et al (2002) visade hur olycksfrekvensen ökar som funktion av LTR, se Figur 23. Woodrooffe et al (2010) skriver i en rapport för OECD att: "Baserat på internationella erfarenheter anses viktöverflyttning motsvarande LTR = 0.6 definiera gränsen för acceptabel säkerhetsmarginal vid filbytesmanöver." LTR kan alltså inför godkännande av lastbilsekipage användas som krav vid test av stabilitet vid filbytesmanöver och liknande.



Figur 23 Relativ olycksfrekvens versus DLTR. De Pont (2002).

Vid rekonstruktion av vältolyckan på E6 användes LTR-måttet på ett annat sätt. LTR-värden beräknades löpande utmed ekipagets färd, dels för den högupplösta hastighetsprofil som lagrats i lastbilens färd dator och dels med iterativt ökande hastighet till dess OECD-riktvärdet LTR = 0.6 tangerades. Resultaten i Figur 24 visar för det första att släpet ska välta i den med marginal lagliga hastighet som chauffören höll, för det andra att högsta hastighet med rimlig säkerhetsmarginal mot vältning var endast 33 km/tim.

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	



Figur 24 Stabilitetsanalys för timmersläpet. Källa: WSP.

Haverikommisjonen undersökning visade de norska vägnormerna för utformning av skevning m.m. hos påfartsramper inte tar tillräcklig hänsyn till vägens funktion, d.v.s. att påfartsrampen även används av stora tunga fordon och att deras dynamik ställer högre krav på vägutformningen än vad personbils behov gör.

Haverikommisjonen rekommenderade därför Statens vegvesen att revidera sina vägnormer för utformning respektive byggande av skevade påfartsramper.

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

4.8 Klotoider påverkar vägens risknivå

Övergången mellan bombering (sadeltakformat tvärfall på raksträcka) och skevning i ytterkurva är mer eller mindre regelmässigt placerad i samma sektioner där raksträcka övergår till horisontell cirkelbåge. Kördynamiken i dessa sektioner är komplex att analysera, samtidigt som de uppvisar hög olycksfrekvens.

I facklitteratur förekommer diskussion med att lastbilar körs med "overshooting" i dessa sektioner. Vissa forskare framhåller att kördynamiken förbättras om vägen utformas med övergångskurvor, där kurvradien ändras gradvis mellan raklinje och radien i kurvans huvudbåge. Därmed underförstås att övergångskurvor ger ökad trafiksäkerhet och minskad olycksfrekvens. I Sverige kallas övergångskurva för "klotoid", medan den i USA kallas för "spiral".

En gemensam nämnare för dessa forskningsutlåtanden är att de inte validerats, utan bygger på antagandet att olycksrisken avgörs av kördynamiken. En artikel av Granlund (2013) har skapat mycket diskussion bland vägutformare i Norden, genom påpekandet att antagandet om att klotoider skulle öka trafiksäkerheten med stor sannolikhet är felaktigt. En av orsakerna är att klotoider gör det svårare för förare att korrekt bedöma hur tvär huvudbågen i kurvan är. Detta leder till systematisk överskattning av hur fort man kan köra i kurvan och därmed till sena inbromsningar inne i kurvan.

År efter år pekar norska årsrapporter från djupstudier av dödsolyckor ut "eggformade kurvor" som bidragande orsak till dödsolyckor. Med äggformad kurva menas övergångskurva där radien minskas gradvis, d.v.s. klotoid.

En handfull studier har granskat olycksfrekvens på jämförbara vägar med respektive utan klotoider. Ett exempel är Chudworth & Stewart (1990). De fann att huvudsaklig skillnad mellan farliga och trafiksäkra kurvor inte utgörs av deras kurvradier, utan att säkra kurvor kännetecknas av konstant och förutsebar kurvradie. Före-efter studier på sträckor där klotoider byggts bort visar att olycksfrekvensen sänkts med upp till 80 %.

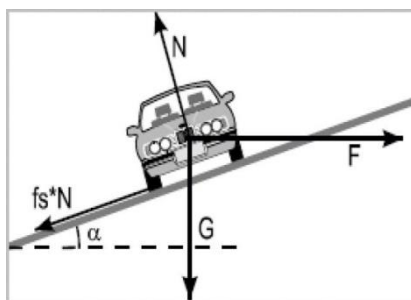
En annan orsak till att klotoider kan öka olycksrisken, är att kurvans huvudbåge måste göras tvärare för att "få plats" med klotoider mellan två givna tangentpunkter. Ju snävare krökning kurvan har, desto högre blir sidkraften vid kurvtagning och därmed ökar olycksrisken. Om projektören kan lägga in klotoider utan att öka radien, så hade istället radien kunnat göras större. Därmed är det också diskutabelt att jämföra olycksfrekvens vid samma kurvradie med och utan klotoid. Mer rättvist vore att jämföra olycksutfall mellan kurva utrustad med klotoider, mot kurva med den större radie som kan inrymmas mellan samma tangentpunkter om klotoiden slopas.

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

4.9 Kraftspel vid kurvtagning

Traditionell analys av sladdrisk för personbil

I en lång rad länder sker utformning av tvärfall i kurvor utifrån analys med en s.k. punktmassmodell av ett vägfordon. Ett exempel på sådan modell, hämtad från svenska vägutformningsanvisningen VGU, visas i Figur 25.



Figur 25 Punktmassmodell för skevningsberäkning enligt VGU

Vid stabil kurvtagning där hastighet, kurvradie, tvärfall och vägfriktion är i jämvikt uppnås en rad fördelar, så som minimering av viktöverflyttning, deformation i däckets stomme och distorsion i däckets kontaktyta. Då behövs inga ratt rörelser, medan rullmotstånd, däckslitage och buller minimeras.

Härledningen av lämplig skevning kan följas i Granlund (2008), från första ekvationsuppställning steg-för-steg till det slutliga uttrycket för "stabil kurvtagning" enligt Formel 3. Vägens referenshastighet betecknas v [m/s], kurvradien R [m], gravitationskonstanten g [m/s²], μ_s [-] är sidofriktionstalet mellan däck och vägbana, medan tvärfallet (skevningen) ges av tangenten för vinkeln α och betecknas $\tan(\alpha)$ [%]. Formeln visar att den pådrivande sidkraften vid kurvtagning, den vänstra termen, måste uppvägas av summan av körfältets tvärfall (med rätt tecken!) och sidofriktion mot vägytan. Om summan av dessa två termer blir för låg, blir kurvtagningen instabil.

Formel 3 Stabil kurvtagning enligt punktmassmodell. Granlund (2008).

$$\frac{v^2}{R * g} \approx \tan(\alpha) + \mu_s$$

Det erforderliga tvärfallet $\tan(\alpha)$ beräknas för given hastighet och kurvradie (eller krökning $1/R$) genom att införa ett dimensionerande sidofriktionstal, exempelvis $\mu_s = 0.10$.

Observera att sidofriktionstalet μ_s typiskt är mindre än hälften av det tillgängliga bromsfriktionstalet (Trafikverket, 2015). Exempelvis kan våt is ge bromsfriktion $\mu_{brake} = 0.10$, men mindre än $\mu_s = 0.05$ i sidofriktionstal. Å andra sidan ger en vägyta med $\mu_s = 0.10$ ett bromsfriktionstal μ_{brake} på över 0.20.

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

Vägregler runt om i världen använder olika koncept för att ange tillgänglig sidofriktion, där någon form av justeringsfaktor används för att skapa säkerhetsmarginal. Alternativt används redan från början ett högre sidofriktionstal, motiverat utifrån *komfort* som kriterium. I de flesta länder är avdraget utformat som en funktion av referenshastigheten, vilket resulterar i ett lägre tal på tillgänglig sidofriktion för kurva på vägsträcka med högre hastighetsgräns. I vissa länder förekommer också avdrag för högre trafikvolym. Begreppet "maximalt sidofriktionstal" för vägutformning ska inte förväxlas med verkligt uppmätta högre friktionstal, vilka påverkas av mätdäckets och vägytans materialegenskaper, föroreningar och mekanik (FHWA, 2009).

Genom att lösa ut hastighet från Formel 3 erhålls uttrycket i Formel 4. Denna formel kommer senare att jämföras med motsvarande formel från mer realistisk fordonsmodell.

Formel 4 **Kritisk fart för sladdrisk enligt p.m.-modell.** Granlund (2014).

$$v \approx \sqrt{R * g(\tan(\theta) + \mu_s)}$$

Analys för sladd- & vältrisk för tunga fordon

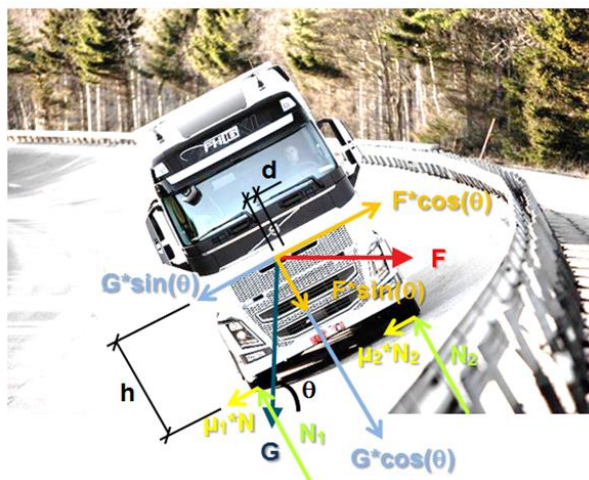
Granlund et al (2014) använde en lite mer komplex fordonsmodell som mer realistiskt kan representera även ett tungt fordon vid beräkning av lämpligt tvärfall i kurva.

Denna modell visas i Figur 26; bildkälla är Volvo Lastvagnar. Observera att fotot är taget när lastbilen kränger inåt under körning i låg fart på provbana med extremt stor skevning, utformad för frihandsstyrning i 180 km/tim med personbil. Skevningen på fotot är flerfaldigt större än lämplig skevning på landsväg.

Modellen beaktar tyngdpunktens position både i höjdled och i sidled, vilket gör det möjligt att beakta krängning och viktöverflyttning i sidled. Modellen ger också möjlighet att analysera olika vägfriktion ("split friction") i kontakten mellan däck och vägbanan under de inre hjulen respektive de yttre hjulen.

Analysen gjordes dels för sladdrisk och dels för vältrisk.

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	



Figur 26 Komplexare modell för analys av kurvtagning med lastbilar

Sladdrisk med hänsyn till viktöverflyttning och split friction

Analysen utgår från Figur 26. F betecknar centrifugalkraften vid kurvtagning, medan G betecknar gravitationskraften. Under innerhjulet anger N_1 normalkraften och μ_1 sidofriktionstalet. Under yttrehjulet anger N_2 normalkraften och μ_2 sidofriktionstalet. Spårbottentvärfallet utgörs av tangenten till vinkeln θ mot horisontalplanet. Observera att θ i Figur 26 avser samma vägvinkel som α i Figur 25.

För att inte glida i sidled (sladd eller liknande instabilitet), krävs kraftjämvikt parallellt med vägbanan. Denna jämvikt skrivs enligt Formel 5.

Formel 5 Kraftjämvikt parallellt med vägbanan

$$F \cdot \cos(\theta) - G \cdot \sin(\theta) - \mu_1 \cdot N_1 - \mu_2 \cdot N_2 = 0$$

Nu ersätts F med definitionen av centrifugalkraft, $F = m \cdot v^2 / R$, där m är fordonets massa, v är dess hastighet och R är kurvradien. Därefter kan "maximal hastighet utan sladdrisk" v_{sladd} lösas ut, och Formel 5 kan därmed skrivas som Formel 6.

Observera att konceptet sidofriktionstal innebär att kurvtagningen ska kunna ske utan att tappa styrförmåga och få sladd under inbromsning. D.v.s. den som inte bromsar kan köra fortare än v_{sladd} utan att få sladd, men landsvägars kurvor måste vara utformade så att trafikanterna kan både styra och bromsa samtidigt utan att drabbas av instabilitet.

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

Formel 6 Maximal hastighet utan sladdrisk (1)

$$v_{sladd} = \sqrt{\frac{R * (\mu_1 * N_1 + \mu_2 * N_2 + G * \sin(\theta))}{m * \cos(\theta)}}$$

Vid små vinklar, vilket vägars skevning utgör, är cosinusfunktionen nära 1.00. Därför kan Formel 6 efter insättning av definitionen för gravitationskraften, $G = m * g$, med god approximation ersättas av

Formel 7.

Formel 7 Maximal hastighet utan sladdrisk (2)

$$v_{sladd} \approx \sqrt{\frac{R * (\mu_1 * N_1 + \mu_2 * N_2 + m * g * \sin(\theta))}{m}}$$

Lösning efter vinkeln θ i Formel 7 leder fram till Formel 8 för optimal vägbanevinkel.

Formel 8 Optimal vägbanevinkel med hänsyn till sladdrisk

$$\theta \approx \sin^{-1}\left(\left(\frac{v^2 * m}{R} - \mu_1 * N_1 - \mu_2 * N_2\right) / (m * g)\right)$$

Vältrisk med hänsyn till tyngdpunktens höjd och sidoförskjutning

Analysen utgår från Figur 26. Bredden mellan centrum på fordonets hjul betecknas b [m]. Tyngdpunktens höjd över vägbanan är h , medan dess förskjutning från fordonets mitt under krängning är d . F betecknar centrifugalkraften vid kurvtagning, medan G betecknar gravitationskraften. Under innerhjulet anger N_1 normalkraften och μ_1 sidofriktionstalet. Under yterhjulet anger N_2 normalkraften och μ_2 sidofriktionstalet. Spårbottentvärfallet utgörs av tangenten till vinkeln θ mot horisontalplanet (θ i Figur 26 avser samma vägvinkel som α i Figur 25).

Momentjämvikt vid yterhjulet, hjul nr 2 i Figur 26, skrivs enligt Formel 9.

Formel 9 Momentjämvikt vid yterhjulet (1)

$$F * \cos(\theta) * h - F * \sin(\theta) * (b/2 + d) - G * \sin(\theta) * h - G * \cos(\theta) * (b/2 + d) + N_1 * b = 0$$

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

Vid tröskeln för vältning utåt i kurvan, då LTR uppnår 1, är $N_1 = 0$ (noll). Då verkar all normalkraft på ytterhjulet⁵, i N_2 . Efter division med $\cos(\theta)$ och omflyttning av termerna, kan Formel 9 renskrivas som Formel 10.

Formel 10 Momentjämvikt vid ytterhjulet (2)

$$h_{\text{rollover}} * (F - G * \tan(\theta)) = (b/2 + d) * (F * \tan(\theta) + G)$$

Genom att lösa ut kritisk tyngdpunktshöjd kan Formel 10 skrivas som Formel 11.

Formel 11 Vältkritisk tyngdpunktshöjd (1)

$$h_{\text{rollover}} = (b/2 + d) * (F * \tan(\theta) + G) / (F - G * \tan(\theta))$$

Efter insättning av definitioner av centrifugalkraften, $F = m * v^2 / R$, och av gravitationskraften $G = m * g$, kan Formel 11 skrivas som Formel 12.

Formel 12 Vältkritisk tyngdpunktshöjd (2)

$$h_{\text{rollover}} = \frac{\left(\frac{b}{2} + d\right) * \left(\frac{v^2}{R} * \tan(\theta) + g\right)}{\frac{v^2}{R} - g * \tan(\theta)}$$

⁵ Anm.: När fordonet är i närheten av välttröskeln, medför hård bromsning en stor risk för sladd runt den sida där hjulen då bär all normalkraft.

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

4.10 Cykelbanors tvärfall och skevning

Cyklisters singelolyckor är ett allvarligt problem

Cyklisters skallfrakturer är numera det enskilt största skadeslaget bland samtliga trafikanter, enligt Landstinget Dalarna (Borlänge Energi, 2004). Cyklister passerade år 2009 bilisterna som trafikantslag med störst antal svårt skadade, enligt data från myndigheten Trafikanalys. En uppenbar anledning till ökat antal cykelolyckor är trenden med ökad cykelpendling till arbetsplatser och skolor. Trots trafikskador är ökad cykling nyttigt på flera sätt, bl.a. genom att cyklande förebygger övervikt och därtill kopplade s.k. välfärdssjukdomar, samt genom att beroendet av bilen och av importerade fossila drivmedel minskar.

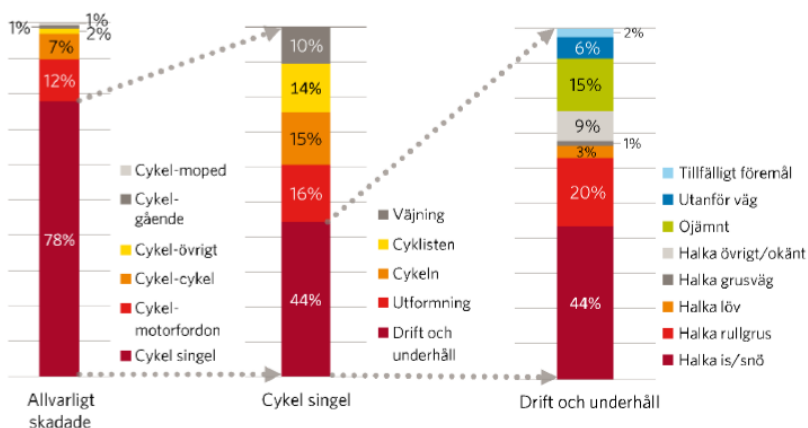
För att främja att pendlingsresor sker genom nyttig cykling framför bilåkning, är det viktigt att cykling blir trafiksäkrare, tryggare och samtidigt attraktivare även på längre avstånd (inklusive det nya perspektiv som eldrivna cyklar medför). Ökad cykling på längre sträckor ställer krav på ökad framkomlighet, d.v.s. högre cykelhastigheter och därmed krav på bra utformade cykelbanor och inte minst på cykelbanornas kurvor.

På uppdrag av Stockholms stad analyserade Granlund & Sik (2012) data över alla registrerade singelolyckor med oskyddade trafikanter i staden under 2010. Resultaten visar att fler än 330 cyklister respektive 1350 gående skadades i singelolyckor. Äldre trafikanter och män uppvisade svårare skador. Vanliga olycksfaktorer för GC-trafikanterna är låg vägfriktion p.g.a. snö, is, vatten och lösgrus (under sen höst och tidig vår) samt instabilitet i samband med ojämnheter i vägytan. GC-trafiken kan både ökas och göras säkrare, genom att satsa på mer och effektivare drift och underhåll av GC-vägnätet. Två vanliga olycksorsaker bland cyklister var vatten på vägbanan, samt att ett hjul låst sig vid bromsning. Detta indikerar problem med låg vägfriktion i kombination med sidkraft. En vanlig orsak till detta problem är dålig vattenavrinning på platser där GC-ytan har saknat tillräcklig snedlutning (kallas även resulterande lutning), vilket leder till vattenpölar. Detta understryker betydelsen av att i skevningsövergång före och efter kurvor som bankats upp till skevning åt rätt håll, måste projektören verkligen säkerställa att vägreglernas krav på minst 0.5 % snedlutning uppfylls.

Många olyckor i feldoserade kurvor på cykelbanor

Trafikverket hävdar att brister i cykelbanans utformning medverkat till 16 % av de cykelolyckor som gett allvarliga personskador, se mittre stapeln i Figur 27.

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	



Figur 27 Allvarligt skadade cyklister 2007 – 2012. Källa: Trafikverket.

Bergman (2004) hävdar att så mycket som en dryg tredjedel av alla cykelolyckor beror på fel utformade eller dåligt genomtänkta cykelbanor, vilket alltså är mer än dubbelt mot Trafikverkets uppgift ovan. Vidare skriver Bergman att feldoserade kurvor tillhör typiska brister i planering och utförande av cykelbanor. Ett problem vid cykling på feldoserad cykelbana är att vid halt väglag glider cykeln lätt iväg i sidled under tyngden från cyklistens kropp.

Trafikplaneraren och cykelexperten Krister Isaksson bloggar⁶ så här om feldoserade kurvor på cykelbanor:

”Bland det roligaste jag vet är att cykla i kurvor. Att ge mig ut på landsvägen, att bedöma farten in i kurvan, att lägga ner cykeln, se igenom kurvan, hur den svänger, känna däcken greppa asfalten och svischa igenom kurvan. Jag har mina rundor där jag mer eller mindre vet vilken fart jag kan ha in i kurvan och hur jag ska ta kurvan. Det är en sådan underbar njutning och lockar ofta fram ett leende på läpparna.

Sen har vi en annan sida med kurvan, eller kurvorna ska jag kanske säga. Ett tillstånd när svängfesten går i moll. Det är de kurvor som jag tvingas cykla i min vardag eller när jag transporterar mig till och från rundorna på landsvägen. Det är när jag kommer in på cykelbanorna som allt förändras. De kurvor som på landsvägen var en njutning är nu många gånger ett elände. Det är tvåra kurvor, smala kurvor, feldoserade kurvor som är mer standard än undantag. Och alla dessa kurvor delas oftast med gående. Under vintern och våren förstärks alla dessa brister genom snö, is och grus. Cykelbanan tar ofta en rundtur runt träd, runt busskurer, runt parkeringsplatser och korsningar.”

En annan erfaren cyklist är Linus Rispling, som under 8 månader cyklade från Sverige till Pakistan. Den eskapaden gick bra. Däremot kraschade Rispling på hemmaplan med cykeln i en nedförsbacke, vilket slutade med

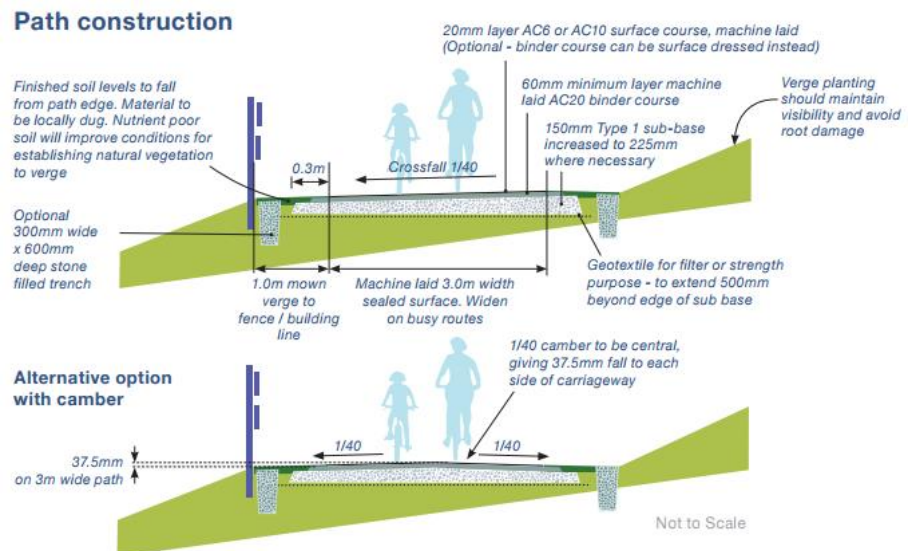
⁶ Isaksson, K. (2014). Svängfest. Internet: <http://www.bicycling.se/blogs/kristerisaksson/svangfest.htm>

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

en komplicerad fraktur ovanför armbågen. På olycksplatsen växer buskar och träd tätt ända fram till cykelbanan. Linjen som skiljer gångbanan från cykelbanan är omålad och i det närmaste osynlig. Plötsligt dök en person upp på banan, och Linus Rispling hade inte en chans. Rispling tycker att många cykelbanor är konstigt planerade: *-Som cyklist kör ju jag ett fordon, i likhet med bilister som kör bil. Jag skulle vilja ha fler graderade kurvor på cykelbanorna, och inte som idag skarpa kurvor och räta vinklar. I kombination med skymd sikt vid stora buskage och viadukter blir det en trafikfara*⁷.

Därför är trafikfarlig feldosering så vanligt i kurvor på cykelbanor

Cykelbanor byggs ofta med enkelsidigt tvärfall, inte sällan åt samma håll oavsett om cykelbanans kurvor kröker åt vänster eller höger. Detta medför att upp till hälften av cykelbanekurvorna kan vara så kraftigt feldoserade att de t.o.m. lutar åt helt fel håll. Sektion av cykelbana i normalutförande med enkelsidig skevning, samt alternativt (mer sällsynt) utförande med bombering, visas i Figur 28.



Figur 28 De flesta cykelbanor har enkelsidigt tvärfall, inte bombering.

Bildkälla: [Handbook for cycle-friendly design](http://www.cyclefriendlydesign.com/)

En orsak till traditionen att välja enkelsidigt tvärfall på cykelbanor är sannolikt grundad i begränsningar hos äldre tiders asfaltutläggningsmaskiner. En överväldigande majoritet av läggarna är byggda för bilkörfältsbredder (eller t.o.m. hela vägbanebredder på landsväg). Dessa maskiner har en basbredd på typiskt 2.5 m, med utskjut som ger maximal läggningsbredd från ca 3 m

⁷ Rispling, L. (2008). Cykelbanor ofta konstigt planerade. SvD. Internet 2016-05-10: <http://www.svd.se/cykelbanor-ofta-konstigt-planerade>

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

upp till - i vissa fall - långt över 10 meter. Mycket gamla läggare var inte byggda för att enkelt lägga ytor med två olika tvärfall samtidigt, vilket bidrog till traditionen att bygga cykelbanor med enkelsidigt tvärfall även på raksträcka, istället för med bombering som på breda landsvägar. Detta är dock ingen anledning till att idag hålla fast vid skevade raksträckor, eftersom alla moderna asfaltutläggningsmaskiner klarar att med en enkel knapptryckning skapa en överhöjning på mitten som ger ända upp till 4 % bombering. Dessutom finns idag speciellt smalbyggda cykelbaneutläggare. Exempel på sådana maskiner är [Vögele Mini Class Super 700-3i](#) och [Dynapac F1200](#), båda med 1.2 m basbredd. Detta gör det möjligt att lägga 2.4 m smal bomberad yta, utan att överhöja läggarens mittre del. Utvecklingen av asfaltläggare har alltså redan för tiotals år sedan utplånat den maskintekniska begränsningen mot att bygga cykelbanor med bombering. Traditionen att bygga cykelbanor med enkelsidigt tvärfall (skevning) på raksträcka kan därmed överges.

Ett exempel på trafikfarligt feldoserad kurva visas på foto i Figur 29. Kurvan ligger i lågpunkt mellan två långa backar, vilket innebär att hastigheten in mot kurvan lätt närmar sig 50 km/tim. Den som råkar köra av i denna kurva riskerar ramla utför en brant slänt, och därefter landa i ordinarie körfält på den tungt trafikerade E16. Kurvans tvärfall är enkelsidigt 2.8 % utåt. Trygg kurvtagning medför att cyklister bromsar ned till ca 10 km/tim, vilket i kombination med följande motlut medför avsevärt ökad restid och bidrar till försämrat konkurrensläge för cykelpendling gentemot bilpendling till Borlänge.



Figur 29 Trafikfarligt feldoserad kurva på GC-väg i Mellsta, Borlänge.
Foto: J. Granlund

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL RAPPORT	
Datum: 2016-02-08		
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

Kraftspel och teknik vid kurvtagning med cykel

Redan i slutet på 1800-talet analyserades rörelsemönster och kursstabilitet hos cyklar med vetenskaplig metodik, se t.ex. Carvallo (1899) respektive Whipple (1899). Trots detta finns fortfarande viktiga kunskapsluckor när det gäller stabilitet och säkerhet vid cykling. Exempelvis dröjde det ända till i år innan det störande kraftspelet från pedaltrampandet blev riktigt kartlagt.

Baines (2016) konstaterade att det årligen sker över 60 000 sladd- och vältolyckor (*"single sided accidents"*) med cykel enbart i Holland, samt att detta innebär behov av ökad kunskap om cyklars dynamik tvärs färdriktningen. Baines forskning visar att de krängningar och styrmoment som cykeln utsätts för till följd av trampandet, avgörs av en rad faktorer:

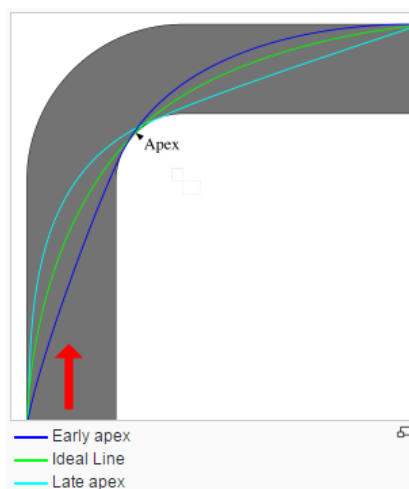
- vertikal acceleration av vänster och höger bens masscentrum,
- framåtriktad acceleration av benens masscentrum,
- benets massa,
- bredden hos cyklistens höft, samt
- trampfrekvensen.

Även beteendet hos cyklisten spelar in. Beteendet varierar med överkroppens rörelser och cyklistens kontroll, samt med ändrad hastighet och trampfrekvens. Vissa kombinationer av cykelegenskaper och cyklistbeteenden visades av Baines orsaka farliga resonanser, vilka kan förebyggas genom förbättrad utformning av framtida cyklar.

Bland kurvtagningstekniker⁸ för trafikanter på cyklar och andra tvåhjuliga fordon förekommer en rad knep, så som att styra med bakhjulsbromsen samt motstyrning. Motstyrning innebär att man vrider styret åt fel håll i kombination med att cykeln lutar kraftigt i sidled. Är vägbanan halkig p.g.a. vatten, is, lera eller lösgrus, eller om kurvans tvärfall är feldoserat, så är det farligt att luta cykeln. Då lutar istället överkroppen mer in mot kurvan. Vissa cyklister anser att de tar kurvor med jämn väg bana snabbast genom att hålla ytterpedalen i kl. 6 och luta överkroppen uppåt så att tyngden på denna pedal maximeras. Finns det risk för islag i ojämnheter föredrar många att istället hålla pedalerna vågrätt i position kl. 3 och kl. 9. Vissa tenderar att bromsa sent, låta kroppen glida framåt och via styret pressa framhjulet hårt mot underlaget, medan några t.o.m. åker med framsträckt innerben. Så snart cykeln passerat den punkt *apex* där kurvan kröker mest, trampar man hårt och flyttar kroppen bakåt. Ordet *apex* härstammar från *"pilspets"*. Vid snabb kurvtagning eftersträvas den flackaste kurvradien, då den medför lägst begränsning på hastigheten. Den kurs som ger flackaste kurvradie och därmed högsta hastighet kallas ideallinjen. Den skär på ett balanserat sätt genom *apex*, se Figur 30, utan tajtare radie vare sig före eller efter skärningen.

⁸ Kurvtagning med cykel. Internet 2016-05-12: <http://happyride.se/forum/read.php/1/23587/23615>

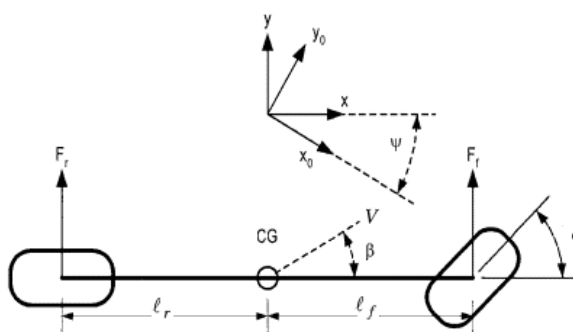
Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	



Figur 30 Snabbast kurvtagning sker via ideala linjen genom apex.
Källa: Wikimedia

Till skillnad från för bilar och tunga lastbilar, dominerar människokroppens vikt över cykelns vikt. Därmed är kroppens positioner under kurvtagningen av mycket stor vikt för kraftspelet. Vid kurvtagning lutar många cyklister olika mycket på cykeln och på sin kropp. Tyngdpunktens position flyttas både i sidled, vertikalt och i färdriktningen. Detta leder till ett komplicerat kraftspel som är komplext att prediktera och analysera. Många modeller för kördynamik under cykling beaktar över huvud taget inte tyngdpunktens förskjutning.

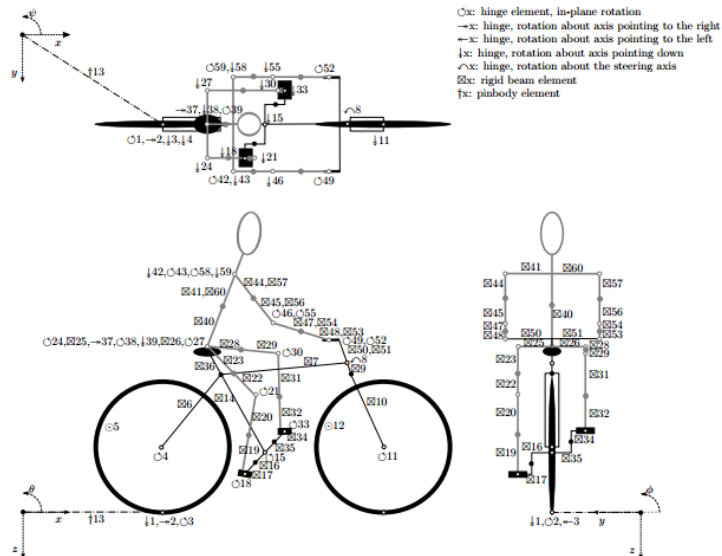
I litteraturen förekommer varianter på en grundläggande modell av en "cykel" med styrande framhjul, se exemplet i Figur 31. Många av dessa modeller används för grundläggande analys av kurvtagning med bilar, snarare än med egentliga cyklar. Gemensamt för dem är därför att de saknar en cyklist, med rörlig tyngdpunkt utöver fordonets egen tyngdpunkt.



Figur 31 Fordonsmodell för grundläggande analys av kurvtagning.
Källa: Rajamani (2012)

Vid tekniska universitetet i Delft (Holland) har en mer realistisk modell av cykel med cyklist utvecklats, se Figur 32.

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	



Figur 32 Ny modell för mer realistisk analys av kurvtagning med cykel.
Källa: Baines (2016)

Hittills har den "nya generationen" cykelmodell inte använts för att optimera anvisningar för utformning av tvärfall i kurvor. I de länder som har krav på tvärfall i kurvor på cykelbanor, bygger kraven typiskt på starkt förenklad analys med samma punktmassmodell som använts för biltrafikerade landsvägar, se exemplet i Figur 25.

Infrastruktur för cykling

I Sverige är cyklister på de flesta landsvägssträckor hänvisade till att cykla på *vägrenen*. För att detta ska vara "godkänd utformning enligt VGU" vid nybyggnation, förutsätts att vägrenen har minst 75 cm bredd. Vägrensräffling minskar olycksrisken rejält. Räffling i kombination med vägrensseparerad cykeltrafik förutsätter enligt VGU vägren bredare än 1 m.

Särskilt anordnad infrastruktur för cykling finns i form av *cykelfält* (på vägar med max 80 km/tim), *gång- och cykelbana* (GC-bana fysiskt avgränsad från vägbanan) samt renodlad *cykelväg*. I denna skrift används benämningen "cykelbana" som samlingsbegrepp.

GC-bana medför högre olycksrisk, genom att där blandas fordonstrafik (cyklister) med gående med och utan rullator, rullstolsbundna, med barnvagn, med husdjur i koppel osv. Trafikförordning (1998:1276) 7 kap 1§ säger att "*Gående som använder vägrenen eller körbanan skall om möjligt gå längst till vänster i färdriktningen*". En stor olycksrisk finns alltså redan det stora tolkningsutrymmet för vilken sida som gående ska hålla sig på, i kombination med att de flesta hört talas om högerregeln. Ett annat exempel på risk är

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

att gående har möjlighet att blixtnabbt förflytta sig i sidled, vilket kan överraska cyklister (vilka ofta håller över 30 km/tim).

Kurvradier och skevning hos cykelbanor i Sverige

Cykelbanor delas in i två väsensskilda kategorier. Den ena kategorin är ytor för renodlad cykling och därmed strikt högertrafik. Den andra kategorin är ytor för blandtrafik mellan fordon (cyklar) och gående, rullstolsbundna osv.

Ytor för renodlad cykling bör naturligtvis optimeras för trafiksäker framkomlighet med cykel. Det innebär bl.a. att de kurvor som har snäva radier byggs med stor skevning. Återkommer till det nedan.

Ytor för blandtrafik däremot, måste utformas med hänsyn till ex.vis rullstolsbundnas låga tolerans för tvärfallets storlek.

Den svenska anvisningen för Vägars och Gators Utformning (VGU) är utgiven gemensamt av Trafikverket och Sveriges Kommuner & Landsting. Den gäller inte för egenskaper hos befintliga vägar, utan enbart för utformning av nya vägar, samt i viss mån vid förbättring av befintliga vägar.

I VGU föreskrivs 0.5 % tvärfall för ytor som utformas för rullstolstrafik (VGU tabell 3.2-8); i undantagsfall godtas upp till 1.5 % (lokálnät) å 2.0 % (huvudnät). Denna restriktion på skevning måste rimligtvis matchas med hårda krav på lägsta tillåtna kurvradie, men där brister VGU's logik. VGU anger samma krav på minimiradie för GC-bana med blandtrafik (max 1.5 – 2 % skevning) som på renodlad cykelväg där stor skevning tillåts; se Tabell 1.

Tabell 1 Minsta horisontalradie för cykelbana, enligt VGU 3.2-3

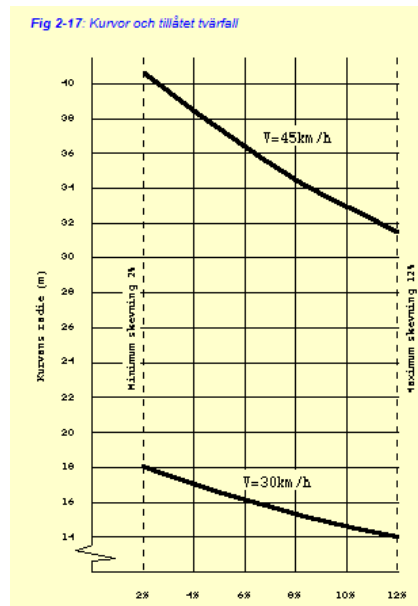
Horisontalradie (m)	Önskvärd minsta horisontalradie	Minsta godtagbara horisontalradie *)
Dim hastighet 30 km/h	30	20
Dim hastighet 20 km/h	20	10

*) Endast efter väghållarens godkännande

För renodlad cykelbana anger VGU krav på tvärfall endast för raksträcka, vilket ska ligga mellan 0.5 % och 2.5 % (VGU tabell 3.2-9). Dagens VGU anger inget krav alls på skevning i kurva på cykelbana.

Bergman (2004) visar ett diagram som förefaller vara en äldre svensk anvisning för skevning på cykelbanor. Diagrammet gäller för önskade hastigheter upp till 45 km/tim och beroende på kurvradie anges skevningsvärden från +2 % till +12 %, se Figur 33. Figuren återfinns inte i dagens anvisning för VGU. Därmed är den tyvärr inte gällande och VGU saknar alltså krav på skevning.

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL RAPPORT	
Datum: 2016-02-08		
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	



Figur 33 Äldre svensk anvisning för skevning på cykelbana.
Källa: Bergman (2004).

VGU avsnitt 3.2.2.7 anger tydligt krav på resulterande lutning $\geq 0.5\%$, vilket förebygger vattenansamlingar och därmed halkrisk. Detta innebär att projektören inte kan placera skevningsövergångar (där tvärfallet byter riktning (tecken) och därmed passerar 0%) i sektioner med mindre längslutning än $\pm 0.5\%$.

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

Kurvradier & skevning hos cykelbanor utomlands

Storbritanniens anvisning "Cycle Infrastructure Design" (2008) kräver att alla kurvor på cykelbanor ska luta inåt, samt motiverar detta med att negativ skevning medför ökad halkrisk. Tvärfallet ska vara 1 - 2.5 %.

Även regelverket "Bicycle Paths" (1994) i US North Carolina anger att negativ skevning är förkastligt. Här ska kurvor skevas med +2 % till +5 %, varefter minsta kurvradie bestäms enligt den traditionella punktmassemodellen (se Formel 3). Modellens relevans motiveras med att otrygga cyklister inte vågar luta cykeln i sidled under kurvtagning. Regelverksförfattarna verkar ha blandat ihop totalt friktionstal med sidofriktionstal. Detta räddas i någon mån genom en "säkerhetsfaktor" som reducerar friktionstalet med 50 %. Friktionstalen är hursomhelst så höga att de är oanvändbara för åretruntcykelbanor i länder med kallt klimat, så som Sverige. Designhastigheten går från 30 ända upp till 65 km/tim (!).

Ett land med gedigen cykeltradition är Australien. Regelverket "AustRoad Guides to Road Design - Part 6A, Pedestrian and Cyclist Paths" har i efterhand granskats av Austroads självt, i rapporten "Cycle aspects of AustRoads Guides" (2011). Tvärfallet ska på belagd cykelbana vara 2 - 4 % för att säkerställa vattenavrinning; på cykelbana med grusslittlager rekommenderas 5 %. Cykelbana som även trafikeras av funktionshindrade bör inte ha mer än 2.5 % tvärfall eller 3 % skevning. Granskningen av horisontell linjeföring är inledd med det kloka påpekandet att på sträckningar utan topografiska eller andra fysiska hinder bör cykelbanans linjeföring vara generös, med raksträckor och stora kurvradier. Detta motiveras med såväl trafiksäkerhet som komfort. Negativ skevning ska av trygghetsskäl undvikas. Kurvradier ska i normalfall vara betydligt större än minimiradierna, för att undvika att trafikanter genar bredvid cykelbanan. Regelverket anger krav på minsta kurvradie uppdelat på kurvor med skevning, respektive kurvor där det av någon anledning inte gått att banka upp skevning (dessa minimiradier sammanfaller i stort sett med radier för 2 % skevning). Kraven bygger på beräkningar med höga sidofriktionstal, jämfört med sidofriktion vid i Sverige vanligt förekommande vägslag. Minimiradierna redovisas i Tabell 2.

Tabell 2 **Minsta radie i horisontalkurva på cykelbana.** Austroad Guides

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

	Superelevation (%)				
	2	3	4	5	6
Speed (km/h)	Minimum radius (m)				
20	10	9	9	9	9
30	24	23	22	21	21
40	47	45	43	42	41
50	86	82	79	76	73

5. BERÄKNINGAR FÖR TYPFALL

Nedan analyseras tre fall:

- Rondell (eller tvär lågfartsramp vid vägkorsning).
- Modern landsvägskurva.
- Gammal feldoserad landsvägskurva

5.1 Ökad skevning ger minskad sladdrisk

Punktmassemodellen överskattar säker kurvtagningsfart

Genom att jämföra Formel 4 med Formel 7 ses vilken överskattning av stabil kurvtagningshastighet som punktmassemodellen kan ge.

Sladdrisken är hög vid körning i landsvägsfart i en platt tvär sväng, där vikt flyttas till yttre hjul ($N_2 > N_1$), samtidigt som en ojämnt hal vägbana ger lägre friktion under yttre hjul än under inre hjul ($\mu_2 < \mu_1$). Vid analys av sladdrisk antas viktöverflyttningen inte vara större än motsvarande Load Transfer Ratio (LTR) = 0.6, vilket motsvarar acceptabel marginal mot vältnings.

Kritisk hastighet för sladd i liten rondell

Betrakta en cirkulationsplats med radie $R = 8$ m och negativ skevning $\tan(\theta) = -0.03$ (de flesta rondeller har utåtriktat tvärfall, bl.a. av hastighetsdämpande skäl). För att studera sladd vid barmarksfriktion är det rimligt att ansetta sidofriktionstalet $\mu_{medel} = 0.30$ (låg fart). Punktmassemodellen och Formel 4 ger då att $v_{sladd} = 4.6$ m/s = 17 km/t. Vid vinterhalka kan sidofriktionstalet istället bli $\mu_{medel} = 0.075$. Formel 4 ger för vinterhalkan att $v_{sladd} = 7$ km/t.

Med den komplexare fordonmodellen fås något lägre sladdhastighet. Barmarksfriktion med samma medelvärde som ovan, kan motsvaras av $\mu_1 = 0.35$ och $\mu_2 = 0.25$. Lastbilssläpvagnens aktuella axel bär vikten $m = 10\,000$ kg. Med viktöverflyttning LTR = 0.6 fås $N_1 = 20$ kN och $N_2 = 80$ kN. Formel 7

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL RAPPORT	
Datum: 2016-02-08		
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

ger $v_{sladd} = 4.4 \text{ m/s} = 16 \text{ km/t}$. Vid vinterhalka kan sidofriktionstalen istället bli $\mu_1 = 0.10$, $\mu_2 = 0.05$ (odubbat på våt is nära väggkanten). Med massa och normalkrafter som ovan, ger Formel 7 ger att $v_{sladd} = 1.6 \text{ m/s} = 6 \text{ km/t}$. Detta innebär att punktmassemodellen ger ca 5-15 % överskattad hastighet för sladd i liten rondell.

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

Kritisk hastighet för sladd i stor rondell

Betrakta en cirkulationsplats med radie $R = 25$ m och negativ skevning $\tan(\theta) = -0.03$. Vid sladd i stor radie är hastigheten lite högre än i fallet ovan, med liten rondell. Vid ganska hög barmarksfriktion är det då rimligt att ansätta ett något lägre sidofriktionstal. Här ansätts $\mu_{medel} = 0.25$. Punktmassemodellen och Formel 4 ger då att vid samtidig bromsning (eller kraftigt gaspådrag) blir $v_{sladd} = 7.4$ m/s = 27 km/t. Vid vinterhalka kan sidofriktionstalet istället bli $\mu_{medel} = 0.075$. Formel 4 ger för vinterhalkan att $v_{sladd} = 12$ km/t.

Med den komplexare fordonsmodellen fås något lägre sladdhastighet. Barmarksfriktion med samma medelvärde som ovan, kan motsvaras av $\mu_1 = 0.30$ och $\mu_2 = 0.20$. Det tunga släpets axel bär vikten $m = 10\,000$ kg och med LTR = 0.6 fås som i tidigare fall $N_1 = 20$ kN och $N_2 = 80$ kN. Formel 7 ger $v_{sladd} = 6.9$ m/s = 25 km/t. Vid vinterhalka kan sidofriktionstalen istället bli $\mu_1 = 0.10$, $\mu_2 = 0.05$ (odubbats på våt is nära väggkanten). Med massa och normalkrafter som ovan, ger Formel 7 att $v_{sladd} = 2.8$ m/s = 10 km/t.

Ovanstående exempel innebär att punktmassemodellen kan ge 8 - 20 % överskattad hastighet för sladd i stor rondell.

Kritisk hastighet för sladd i modern landsvägskurva

Betrakta en modern landsvägskurva med dimensionerande hastighet 80 km/tim, kurvradie $R = 500$ m och skevning $\tan(\theta) = 0.025$; denna kurva uppfyller geometriska krav i VGU. För att studera sladd vid barmarksfriktion är det rimligt att ansätta sidofriktionstalet $\mu_{medel} = 0.20$ (hög fart). Punktmassemodellen och Formel 4 ger då att $v_{sladd} = 33.3$ m/s = 120 km/t. Vid vinterhalka kan sidofriktionstalet istället bli $\mu_{medel} = 0.075$. Formel 4 ger för vinterhalkan att $v_{sladd} = 80$ km/t, vilket innebär att säkerhetsmarginal saknas i förhållande till den dimensionerande hastigheten 80 km/t.

Med den komplexare fordonsmodellen fås lägre sladdhastighet. Barmarksfriktion med samma medelvärde som ovan, kan motsvaras av $\mu_1 = 0.25$ och $\mu_2 = 0.15$. Lastbilssläpets axel bär vikten $m = 10\,000$ kg. Med viktöverflyttning LTR = 0.6 fås $N_1 = 20$ kN och $N_2 = 80$ kN. Formel 7 ger $v_{sladd} = 112$ km/t. Vid vinterhalka kan sidofriktionstalen istället bli $\mu_1 = 0.10$, $\mu_2 = 0.05$ (odubbats på våt is nära väggkanten). Med massa och normalkrafter som ovan, ger Formel 7 att $v_{sladd} = 74$ km/t. Sladdhastigheten är klart under den dimensionerande hastigheten 80 km/t.

Ovanstående exempel innebär att punktmassemodellen kan ge 7-8 % överskattad hastighet för sladd i modern landsvägskurva.

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

Kritisk hastighet för sladd i gammal feldoserad landsvägskurva

Betrakta en kurva på gammal landsväg, hastighetsgräns 70 km/t, med kurvradie $R = 125$ m och feldoserat tvärfall $\tan(\theta) = -0.03$. För att studera sladd vid barmarksfriktion är det rimligt att ansätta sidofriktionstalet $\mu_{medel} = 0.25$ (anpassad fart, lägre än 70 km/t). Punktmassemodellen och Formel 4 ger då att $v_{sladd} = 59$ km/t. Vid vinterhalka kan sidofriktionstalet istället bli $\mu_{medel} = 0.075$. Formel 4 ger för vinterhalkan att $v_{sladd} = 27$ km/t, vilket är mycket långt under skyltad hastighetsgräns 70 km/t.

Med den komplexare fordonsmodellen fås lägre sladdhastighet. Barmarksfriktion med samma medelvärde som ovan, kan motsvaras av $\mu_1 = 0.25$ och $\mu_2 = 0.15$. Lastbilssläpets axel bär vikten $m = 10\,000$ kg. Med viktöverflyttning $LTR = 0.6$ fås $N_1 = 20$ kN och $N_2 = 80$ kN. Formel 7 ger $v_{sladd} = 56$ km/t. Vid vinterhalka kan sidofriktionstalen istället bli $\mu_1 = 0.10$, $\mu_2 = 0.05$ (odubbelt på våt is nära vägkanten). Med massa och normalkrafter som ovan, ger Formel 7 ger att $v_{sladd} = 22$ km/t. Sladdhastigheten är bara en bråkdel av skyltad hastighetsgräns 70 km/t.

Ovanstående exempel innebär att punktmassemodellen kan ge upp till åtminstone 23 % överskattad hastighet för sladd i gammal landsvägskurva.

Punktmassemodellen underskattar behovet av skevning

Genom att jämföra Formel 8 med Formel 3 ses vilken underskattning av lämplig skevning som punktmassemodellen kan ge, avseende sladdrisk.

Regelmässigt negativ skevning i rondeller

Cirkulationsplatser byggs med negativ skevning, ca 2.5 – 3 %, av bl.a. hastighetsdämpande skäl. Därmed utförs ingen "dimensionering" av olika skevningsvärden i rondeller.

Skevning underdimensioneras för sladd i modern landsvägskurva

Vid vinterhalka kan sidofriktionstalet bli $\mu_{medel} = 0.075$. I en modern landsvägskurva med dimensionerande hastighet 80 km/tim och kurvradie $R = 500$ ger punktmassemodellen och Formel 4 ger att skevning $\tan(\theta) = 0.025$, d.v.s. 2.5 %. Detta är i VGU godkänd skevning för nämnda kurvgeometri.

Den komplexare fordonsmodellen visar på ökat behov av skevning. Vid vinterhalka kan medelfriktionstalet $\mu_{medel} = 0.075$ vara fördelat som $\mu_1 = 0.10$ och $\mu_2 = 0.05$ (odubbelt på våt is nära vägkanten). Lastbilssläpets axel bär vikten $m = 10\,000$ kg. Med viktöverflyttning $LTR = 0.6$ fås $N_1 = 20$ kN och $N_2 = 80$ kN. Formel 7 ger skevning $\tan(\theta) = 0.040$, d.v.s. 4.0 %.

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

Ovanstående exempel innebär att punktmassemodellen "tillåter" 2.5 % skevning i en modern landsvägskurva, där den komplexare modellen påkallar minst 4.0 % skevning. Punktmassemodellen underskattar alltså behovet av skevning.

Skevning underdimensioneras mot sladd i gammal landsvägskurva

Betrakta en kurva på gammal landsväg, anpassad vinterhastighet 50 km/t, med kurvradie $R = 125$ m. Vid vinterhalka kan sidofriktionstalet bli $\mu_{medel} = 0.075$. Punktmassemodellen och Formel 4 ger då att skevning $\tan(\theta) = 0.082 = 8.2$ %.

Den komplexare fordonsmodellen visar på ökat behov av skevning. Vid vinterhalka kan medelfriktionstalet $\mu_{medel} = 0.075$ vara fördelat som $\mu_1 = 0.10$ och $\mu_2 = 0.05$ (odubbat på våt is nära vägkanten). Lastbilssläpets axel bär vikten $m = 10\,000$ kg. Med viktöverflyttning $LTR = 0.6$ fås $N_1 = 20$ kN och $N_2 = 80$ kN. Formel 7 ger att skevning $\tan(\theta) = 0.097 = 9.7$ %.

Observera att varningsskylt för anpassad hastighet behövs.

Ovanstående exempel innebär att punktmassemodellen kan underskatta skevningen mer än 15 % för acceptabel sladdrisk i gammal landsvägskurva.

Jämförbara förutsättningar leder alltså till högre skevningsvärde när den mer realistiska fordonsmodellen används.

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

5.2 Ökad skevning ger minskad vältrisk

Ren vältning på vägbanan förutsätter hög vägfriktion, vilket medför att analys av vinterhalka är överflödigt.

Observera att följande vält-analyser inte beaktar risk för "sekundär vältning", d.v.s. efter glidning med islag mot lågt "snubbelhinder" av typ kantsten eller lågt vägräcke.

Vältrisk i rondell och tvär lågfartsramp

Nedanstående bekräftar hög vältrisk i många svenska rondeller, liksom i många snäva lågfartsrampar vid vägkorsningar.

Analys av vältrisk i liten rondell

I Formel 12 insätts lastbilssläpets spårvidd (mitten) $b = 2.20$ m, tyngdpunktens sidoförskjutning $d = -0.3$ m, hastigheten $v = 4.7$ m/s (17 km/t) som enligt tidigare exempel utgör sladdhastighet vid $\mu_{medel} = 0.30$, cirkulationens radie $R = 8$ m, tvärfall $\tan(\theta) = -0.03$ (de flesta rondeller är skevade utåt) och $g = 9.82$ m/s². Med dessa data beräknas vältkritisk tyngdpunktshöjd till 2.53 m. Detta är bara marginellt högre än 2.3 m som är tyngdpunktshöjd för exempelvis släpvagnar med dubbla lastplan med ogynnsam nyttolastkombination, se Dahlberg (1999).

Analys av vältrisk i stor rondell

Jämfört med fallet med liten rondell ovan, sätts i Formel 12 in en större cirkulationsradie $R = 25$ m, hastigheten $v = 6.9$ m/s (25 km/t) som enligt tidigare exempel utgör sladdhastighet vid $\mu_{medel} = 0.25$. Med övriga data lika som ovan, beräknas vältkritisk tyngdpunktshöjd till 3.51 m. Detta är klart högre, men ger inte betryggande säkerhetsfaktor mot referensvärdet 2.3 m.

Vid vägförhållanden som ger högre sidofriktion än $\mu_{medel} = 0.25$ kan ekipaget köra fortare utan att sladda. Med $\mu_{medel} = 0.35$ fås sladdkritisk hastighet på uppemot 32 km/t. Med hastighet på 32 km/t beräknas med Formel 12 den vältkritiska tyngdpunktshöjden till 2.25 m; sämre än referensvärdet 2.3 m.

Ingen vältrisk i modern landsvägskurva

Jämfört med analysen för liten rondell, ändras kurvradien till $R = 500$ m, tvärfallet $\tan(\theta) = +0.025$ och hastigheten till $v = 22.2$ m/s (80 km/t). Med Formel 12 beräknas vältkritisk tyngdpunktshöjd till 8 m. Detta är flerfaldigt högre än hos någon lastbil.

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

Ovanstående innebär god säkerhetsmarginal mot ren vältolycka på vägbanan, även i kombination med ogynnsamma omständigheter så som byiga sidvindar, vägojämnheter och liknande.

Vid utformning av moderna landsvägskurvor bör alltså skevningen beräknas med den komplexare modellen i syfte att minimera krängning och sladdrisk (se tidigare avsnitt). Med tillräckligt låga dimensionerande sidofriktionstal (vinterhalka motsvarande $\mu_{medel} = 0.075$) ger sådan dimensionering marginal även för vältrisk till följd av krängning på barmark med hög friktion.

Hög vältrisk i gammal feldoserad landsvägskurva

Jämfört med analysen för modern landsvägskurva ansätts kurvradien $R = 125$ m, sommarhastighet 70 km/t, och det feldoserade tvärfallet till $\tan(\theta) = -0.03$. Med Formel 12 beräknas vältkritisk tyngdpunktshöjd till 2.34 m. Detta är i samma storleksordning som vissa förekommande tyngdpunktshöjder, se Dahlberg (1999).

Ovanstående idealiserade utredningsfall, utan ogynnsamma omständigheter så som en undanmanöver, vägojämnheter eller liknande, visar alltså att det saknas säkerhetsmarginal mot ren vältolycka på vägbanan.

För en sektion av kurvan där tvärfallet mellan hjulspårens bottnar ökat till $\tan(\theta) = -0.10$, orsakat av lokal deformation vid vägens kantlinje, beräknas vältkritisk tyngdpunktshöjd till 1.9 m.

Med skevning $\tan(\theta) = 10\%$ enligt tidigare avsnitt om sladdrisk, beräknas för sommarhastighet 70 km/t vältkritisk tyngdpunktshöjd till 3.96 m.

Vid förbättring av gamla tvära landsvägskurvor bör alltså skevningen beräknas med den komplexare modellen i syfte att minimera krängning och sladdrisk (se tidigare avsnitt). Med tillräckligt låga dimensionerande sidofriktionstal (vinterhalka motsvarande $\mu_{medel} = 0.075$) och vettig vinterhastighet ger sådan dimensionering marginal även för vältrisk till följd av krängning på barmark med hög friktion. Varningsskylt för anpassad hastighet behövs; gärna med radarstyrd blinkfunktion.

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

5.3 Nyttokostnadskalkyl för ökad skevning

Vid nybyggnation av väg kan tvärsektionens skevning ökas "med bara ökad lutning på CAD-linjalen". Ökningen sker alltså genom att justera lutningen hos terrassen under den givna vägöverbyggnaden. Detta medför inte nämnvärd merkostnad i vare sig projekterings- eller byggskedet. Därmed är ökad skevning vid nybyggnation mycket lönsam redan vid minimal reduktion av frekvensen för trafikolyckorna. Därmed behövs inte vare sig kostnads- eller nyttokostnadskalkyl för ökad skevning vid nybyggnation.

För befintliga vägar förutsätts att justering av tvärfall till ökad skevning alltid genomförs i samband med ordinarie periodiskt underhållsbeläggningssprojekt. Därmed tillkommer inga merkostnader för t ex etablering eller trafik-anordningar under byggtiden, utan kalkylen avgränsas till ren merkostnad för vägmateriäl och direkt arbete för att ändra tvärfallet från ett värde till ett annat värde; d.v.s. utläggning och packning av bärlager (ev. rivning av befintlig beläggning), men inte slittlager, vägmarkering mm som alltså ingår i det ordinarie beläggningssunderhållet.

Kostnad för ökad skevning

Kostnadskalkylen är upprättad tillsammans med David Gullberg och Catharina Björkegren, båda vid WSP. Ritningar och volymlberäkningar är utförda i CAD-programmet Civil3D. Kostnadskalkylen är utförd med å-priser från pågående statliga vägunderhållsprojekt i Sverige.

Erforderlig mängd vägmateriäl

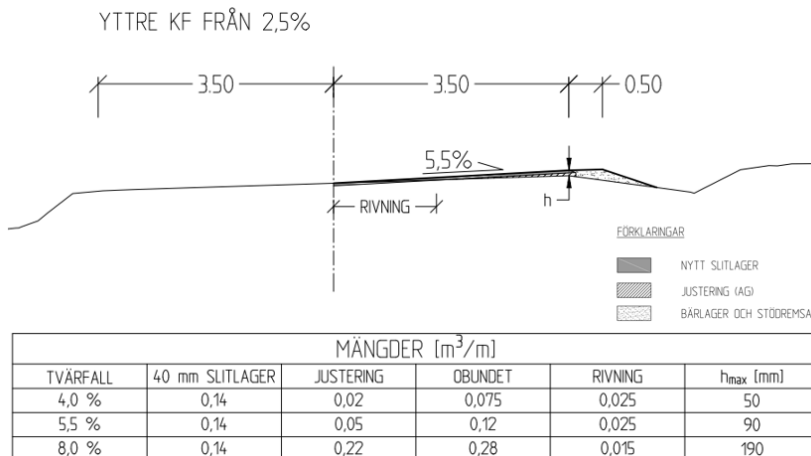
Vid underhåll av vägbana ökas skevningen enklast genom att lägga på mer asfaltmassa i ett eller flera trapetsformade lager (samt komplettering med obundet grus till bl.a. ny stödremsa). Asfaltmassa är avsevärt dyrare än obundet grus. I kurvor med mycket tjock fyllning, kan det vara klokt att istället utföra rekonstruktion av vägbanan. Detta innebär att vägbeläggningen i yttre körfältet, alternativt i båda körfälten, rivs och läggs på upplag för återanvändning. Därefter justeras tvärfallet upp med obundet 0-35 mm bergkross, varefter vägen beläggs med återvunnet beläggningssmateriäl.

Nedan analyseras enbart volymer inne i horisontalkurvans huvudbåge. I start och slut av kurva åtgår självklart mindre mängder vägmateriäl.

Vid underhåll av vägbana är kostnaden för ökad skevning naturligtvis mycket lägre om enbart det yttre körfältet behöver åtgärdas. Detta är ett mycket vanligt fall. Många innerkurvor har sedan urminnes tider stort tvärfall (och åt rätt håll), medan ytterkurvor däremot regelmässigt har för lite skevning eller t.o.m. negativ skevning.

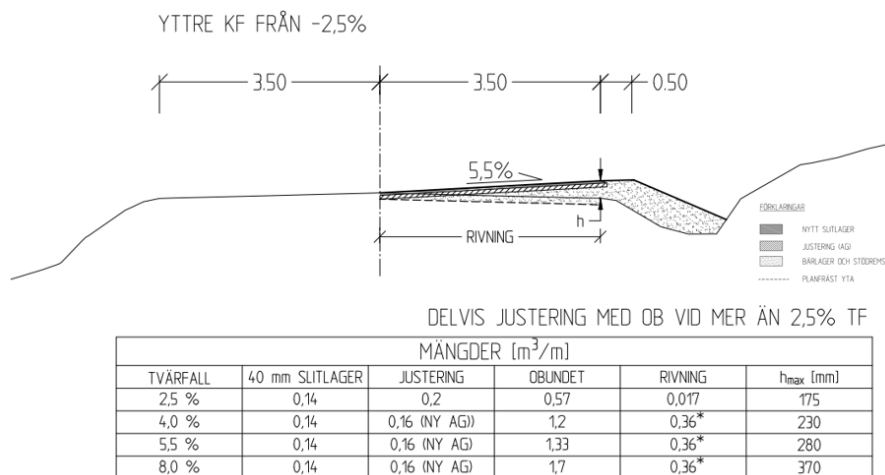
Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

Figur 34 visar hur skevningen i yttre körfältet ökas från +2.5 % till 4 %, 5.5 % respektive 8 % genom påbyggnad med asfaltmassa typ AG. I figuren redovisas även volymbereäkning.



Figur 34 Ökad skevning i yttre körfältet genom påbyggnad med AG

Figur 35 visar hur skevningen i ett yttre körfält med negativ skevning ökas från -2.5 % till +2.5 %, 4 %, 5.5 % respektive 8 %. Att skapa +4 % eller mer skevning i en sektion med negativ skevning (bombering), det innebär justering med typiskt större maxhöjd än 200 mm vid vägkanten; se måttet h_{max} i figuren. Vid så stor ombyggnation av vägbanan är det ofta klokt att ersätta AG-påbyggnad med rekonstruktion med obundet krossat bärlagergrus.

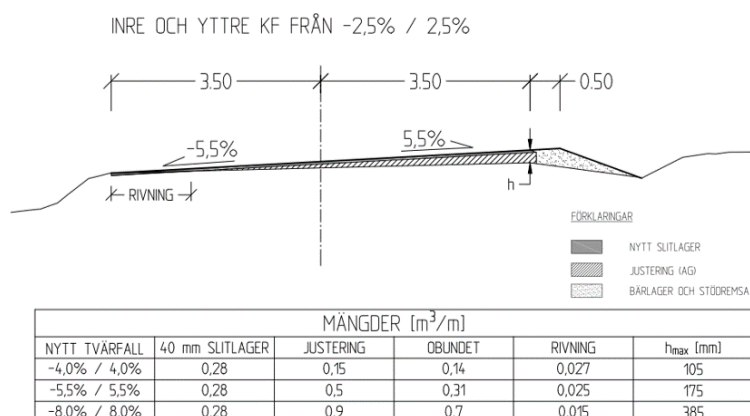


*HELA KF PLANFRÅSES 100 mm,
JUSTERING UTGÖRS AV 60 mm NY AG

Figur 35 Större ombyggnad p.g.a. negativt skevat yttre körfält

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

Vissa kurvor har trafikfarligt lite tvärfall även i det inre körfältet. Figur 36 visar hur hela vägbanans tvärfall ökas från 2.5 % till 4 %, 5.5 % respektive 8 % genom påbyggnad med påbyggnad med asfaltmassa typ AG.



Figur 36 Ökad skevning hos hela vägbanan genom påbyggnad med AG

A-priser och genomsnittskostnad

Ett par exempel på å-priser i pågående projekt på statliga landsvägar (2015 års prisläge):

Alt. 1: Justering genom trapetsformad påbyggnad med asfaltmassa AG 22, medeltjocklek 150 mm: 320:-/m².

Alt. 2: Befintlig asfalt rivs för ÅÅ. Justering med obundet bärlagergrus 0-32 mm fraktion och där ovanpå 90 mm AG 22: 565:-/ m².

På vägar med mindre tung trafik används billigare bundet bärlager typ MJAG, samt vid rekonstruktion även tunnare eller inget bundet bärlager alls, innan ordinarie slitlagerbeläggning utförs.

I priserna ovan ingår påslag 9 % för arbetsledning, 12 % till entreprenörarvode samt 15 % till risk/vinst. Kostnad för etablering, trafikordningar, slitlager mm ingår i samordnad ordinarie underhållsbeläggingsbudget.

Enligt ovanstående uppskattas överslagsmässig medelkostnad på vägnätsnivå hamna på cirka 400 kr/m² för åtgärdade körfältsytor (2015 års prisläge). För typfallet uppjustering av skevning i det yttre körfältet på väg med bredd 7 m är kostnaden därmed ca $3.5 \cdot 400 = 1\,400$ kr/m.

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

Nyttovärdering för ökad skevning

Denna studie fokuserar på att förebygga svåra personskadeolyckor, i synnerhet vältolyckor med tunga lastbilsekipage med mycket hög risk för svår skadeföljd, genom att förbättra feldoserade ytterkurvor.

Skevningen ökas genom påbyggnad med vägmateriäl. Detta medför en förstärkningseffekt som ökar vägens livslängd. Denna nytta beaktas inte i följande kalkyl.

Långsiktigt bestående olycksreduktion värderas högre

Det råder ett välbelagt positivt samband mellan betalningsviljebaserade kalkylvärden och ekonomisk tillväxt. Vid analyser med en tidshorisont på 10 år eller längre ska därför långsiktig påverkan på olyckskostnader värderas högre än i dagsläget. Uppräkning av riskvärderingen sker enligt ASEK 5 (2012) med en faktor 1.34.

Den värdering som Trafikverket beslutat använda för projekt med bestående olycksreduktion redovisas i Tabell 3. Denna långsiktiga värdering är tillämplig på ökad skevning i föreliggande utredning,

Tabell 3 **Långsiktiga olycksvärden [kr/skadad] i 2010 års prisläge. ASEK 5**

	Materiella	Riskvärdering	Totalt
Dödsfall	1 411 000	29 920 000	31 331 000
Svårt skadad	706 000	4 966 000	5 672 000
Lindrigt skadad	71 000	196 000	267 000
Egendomsskada	15 000	0	15 000

I Tabell 3 kan även utläsas hur olycksvärderingen stiger med ökande skadegrad.

Personskadeolycka på landsväg kostar över 550 000 kr

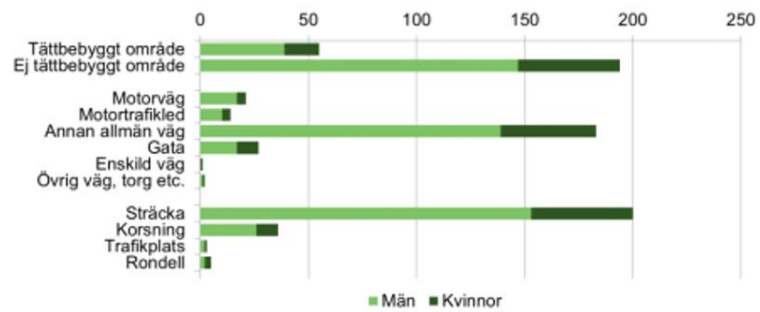
Enligt MSB (2009) uppgick de direkt mätbara kostnaderna för personskador efter vägtrafikolyckor i Sverige under år 2005 till 20 939 miljoner kr, d.v.s. cirka 21 miljarder kr/år.

Databasen STRADA visar att i svensk vägtrafik skadas i storleksordning 50 000 personer/år, se <http://www.ntf.se/olyckor/>.

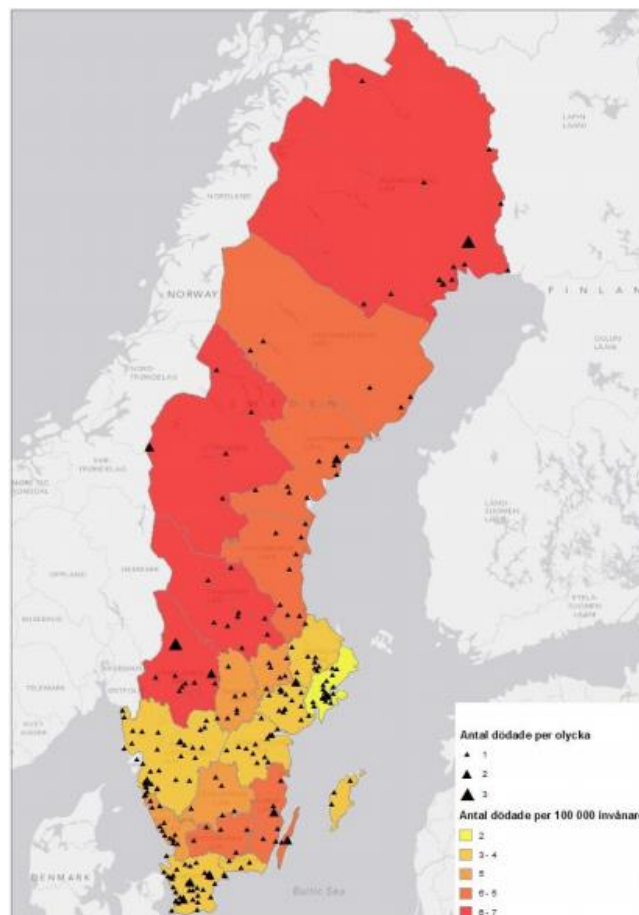
Ovanstående leder till en genomsnittskostnad på ca 420 000 kr per personskadeolycka, vid normal fördelning av skadegrad (2005 års prisläge). Efter justering enligt KPI, motsvarar detta 470 000 kr i 2014 års prisläge.

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

Av de svåraste trafikolyckorna sker en överväldigande majoritet på landsvägar (ca 85 %) framför gator, se Figur 37. Dödligheten i vägtrafik är flerfaldigt högre i skogslänen än i storstadsregionerna, se Figur 38.



Figur 37 Omständigheter vid dödsolyckor år 2013. Vägtrafikskador (2014)

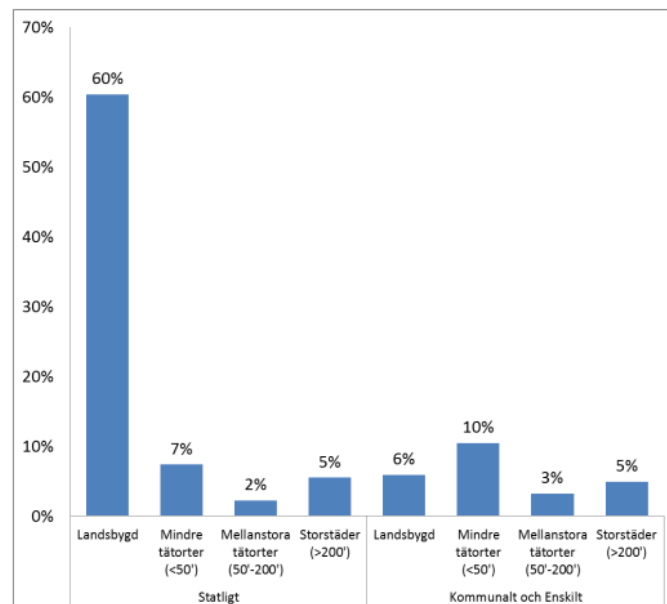


Figur 38 Dödlighet i vägtrafik 2004 – 2013, samt plats och antal omkomna 2013. Vägtrafikskador (2014)

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

Landsvägarnas högre dödlighet innebär att på dessa vägar är genomsnittskostnaden per personskadeolycka signifikant högre, än för personskadeolyckor på kommunala gator. Föreliggande utredning har inte funnit explicit värdering för personskadeolyckor på landsväg vare sig i allmänhet eller i feldoserade kurvor i synnerhet. Därför estimeras den kostnaden utifrån en uppjustering av medelkostnaden för personskadeolyckor på alla typer av vägar (inkl gator) med 20 %. Detta leder till en estimerad genomsnittskostnad på ca 564 000 kr per personskadeolycka på landsväg.

Den höga dödligheten på landsvägar förklaras delvis av att så pass som 3/5 av trafikarbetet sker på dessa vägar, se Figur 39. Å andra sidan är trafikarbetet per km högre på landsvägar än på gator, se Figur 40. Detta diskuteras vidare, lite längre in i föreliggande utredning.



Figur 39 Trafikarbetets fördelning över landsbygd och tätortsstorlekar, samt över väghållare. WSP (2015).

Kategori	Väglängd, km	Antal fordonskm (miljarder km)
Statliga vägar	98 500	58
Kommunala gator och vägar	42 200	24

Figur 40 Statliga och kommunala vägar och gator 2015. Trafikverket.

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

Olyckors frekvens och kostnad per körd km

Nyttokalkylen avser minskad olyckskostnad vid ombyggnad av feldoserade kurvor. Denna kostnad estimeras enligt följande samband.

Andelen kurvor på statliga belagda vägnätet estimeras utifrån en studie av 100 km länsväg 360, där andelen kurvor visades vara 13 % enligt Yaqub (2014). Därmed kan vägnätets olycksfrekvens uttryckas enligt Formel 13.

Formel 13 Vägnätets olycksbidrag från både kurvor och raksträckor

$$ol.frekvens_{Vägnät} = 0.13 * ol.frekvens_{MedelKurva} + 0.87 * ol.frekvens_{Raksträcka}$$

Olyckskvoten är för kurvor typiskt 2 till 4.5 gånger högre än för raksträckor, se Johnston (1982) samt Leonard et al. (1994). Här ansätts medelfaktorn 3.25, vilket leder till Formel 14.

Formel 14 Avvägning i olycksrisk mellan kurvor och raksträckor

$$ol.frekvens_{MedelKurva} = 3.25 * ol.frekvens_{Raksträcka}$$

Insättning av Formel 14 i Formel 13 ger, efter förenkling, Formel 15:

Formel 15 Vägnätets olycksrisk som funktion av risken i kurvor

$$ol.frekvens_{Vägnät} = 0.40 * ol.frekvens_{MedelKurva}$$

På vissa vägar är ungefär var tredje till var fjärde kurva feldoserad, se Granlund (2008). Sett över hela vägnätet är dock andelen lägre. I Formel 16 ansätts att var femte kurva är feldoserad.

Formel 16 Inverkan av feldoserade resp. normala kurvor på medelkurvan

$$ol.frekvens_{MedelKurva} = 0.2 * ol.frekvens_{FeldoseradKurva} + 0.8 * ol.frekvens_{NormalKurva}$$

Insättning av Formel 16 i Formel 15 ger, efter förenkling, Formel 17:

Formel 17 Vägnätets olycksbidrag från feldoserade resp. normala kurvor

$$Ol.frekvens_{Vägnät} = 0.08 * ol.frekvens_{FeldoseradKurva} + 0.32 * ol.frekvens_{NormalKurva}$$

Feldoserade kurvor antas ha i snitt cirka 5 procentenheter för lite skevning. Genom åtgärd väntas olycksfrekvensen sjunka ca 4 % per procentenhet

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

ökad skevning (Läs mer i avsnitten *FHWA*: 3 % fler bilolyckor per procent saknad skevning; samt *TERNZ*: 5 % fler tunga olyckor per procent saknad skevning). Nettoeffekten av åtgärden är därmed ca -20 % olycksfrekvens, vilket kan uttryckas enligt **Fel! Hittar inte referenskälla..**

Formel 18 Eliminering av feldosering sänker olycksfrekvensen med 20 %

$$ol.frekvens_{FeldoseradKurva} = 1.20 * ol.frekvens_{NormalKurva}$$

Insättning av Formel 18 i Formel 17 ger, efter förenkling, Formel 19.

Formel 19 Vägnätets olycksfrekvens som funktion av feldoserade kurvor

$$ol.frekvens_{Vägnät} = 0.35 * ol.frekvens_{FeldoseradKurva}$$

Trafikarbetet på svenska vägar var 2015 cirka 82 000 miljoner fordonskm, se Figur 40. Av detta trafikarbete skedde 66 % på landsvägar (se Figur 39), vilket motsvarar 54 000 miljoner fordonskm.

Erinrar att, enligt tidigare stycke, skadas i svensk vägtrafik i storleksordning 50 000 personer/år, se <http://www.ntf.se/olyckor/>. Landsvägarnas frekvens av personskadeolyckor estimeras till i storleksordning (85 % av 50 000 ol.) / 54 000 m fkm = 0.79 ol per miljon fordonskm. Insättning av detta i Formel 19 ger, efter förenkling, Formel 20.

Formel 20 Olycksfrekvens i feldoserade kurvor

$$ol.frekvens_{FeldoseradKurva} = 2.25 \text{ ol per miljon fordonskm}$$

Sambandet i Formel 20 ger tillsammans med Formel 18 att olycksfrekvensen i normala kurvor på landsväg är enligt Formel 21.

Formel 21 Olycksfrekvens i normala kurvor

$$ol.frekvens_{NormalKurva} = 1.87 \text{ ol per miljon fordonskm}$$

Nyttan av att bygga om feldoserade kurvor är alltså ca 0.4 ol per miljon fordonskm (Differens mellan Formel 21 och Formel 20).

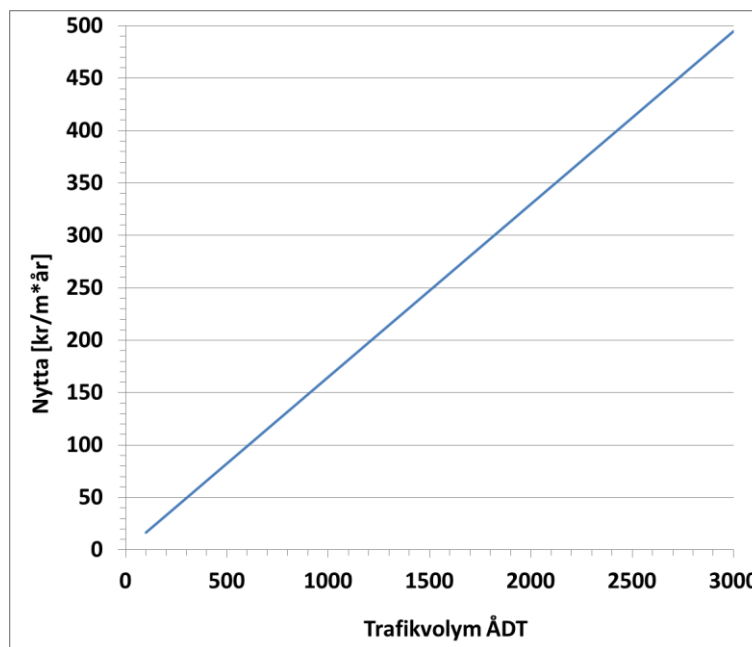
Med genomsnittsvärderingen 564 000 kr/personskadeolycka är nyttan av att öka skevningen ca 226 000 kr per miljon fordonskm. Emellertid ger feldoserade kurvor proportionerligt hög andel vältolyckor med ofta svår skadeföljd. Lindholm (2002) visade att ytterkurvor har fem gånger högre förekomst av

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

dödliga singelolyckor än innerkurvor. Granlund (2008) visade att trafikfarlig feldosering är avsevärt vanligare i yttre kurvor än i innerkurvor. Värderingen av olyckskostnaden ökar med svårare skadeföljd, se Tabell 3. Därför ansätts att nyttan av sänkt olycksfrekvens genom ökad skevning är två gånger värdet av genomsnittsoolyckan, d.v.s. ca 452 000 kr per miljon fordonskm.

I en kurva med trafikvolym 1500 ÅDT är värdet av att öka skevningen $452\,000 \cdot 1\,500 \cdot 365 / (1\,000 \cdot 1\,000\,000) = 248 \text{ kr/m}^*\text{år}$. Denna värdering bygger på en rad antaganden här ovan. En jämförelse med beräkningsresultat från Norge ger vid handen att den resulterande värderingen är i rimlig storleksordning. Statens vegvesen (Rapport 384 - 2015) visade att för vägar med trafikvolym 1500 ÅDT är olyckskostnaden cirka 704 NOK/m*år, sett till både raksträckor och rätt- respektive feldoserade kurvor. Ett nyckelantagande ovan är att eliminering av feldosering sänker kurvans olycksfrekvens med 20 %. Därmed innebär utredningens värdering 248 kr/m*år att feldoserade kurvor har olyckskostnad ca $5 \cdot 248 = 1240 \text{ kr/m}^*\text{år}$. Sett till kurvors överrisk i förhållande till raksträckor, samt kurvors andel av vägnätets längd, framstår detta som rimligt överensstämmande med den norska värderingen av vägnätets övergripande olyckskostnad per meter väg och år.

Nytta av ökad skevning, räknat som funktion av trafikvolym [kr/m*år], visas grafiskt i Figur 41.



Figur 41 **Nytta av ökad skevning i feldoserad yttre kurva [kr/m*år]**

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

Nyttokostnadskalkyl för ökad skevning

Enligt tidigare avsnitt är kostnaden för typfallet uppjustering av skevning i det yttre körfältet på väg med bredd 7 m ca $3.5 \cdot 400 = 1\,400$ kr/m.

Nedanstående beräkningar avser väg med trafik 1500 ÅDT (senare följer re-
doisning för intervallet $100 < \text{ÅDT} < 3000$ fordon).

Nyttan av ökad skevning i trafikfarligt feldoserad kurva är enligt ovan estimate-
rad till ca 248 kr/m*år.

Pay-Off tiden blir därmed ca $1\,400 / 248 = 5.6$ år.

Räknat över två beläggningscykler (d.v.s. 40 år), med 4 % kalkylränta och 0
kr restvärde, blir nuvärdet (NV) av nyttan ca 4 900 kr/m. Eftersom detta
överstiger investeringskostnaden på 1 400 kr/m är åtgärden lönsam.

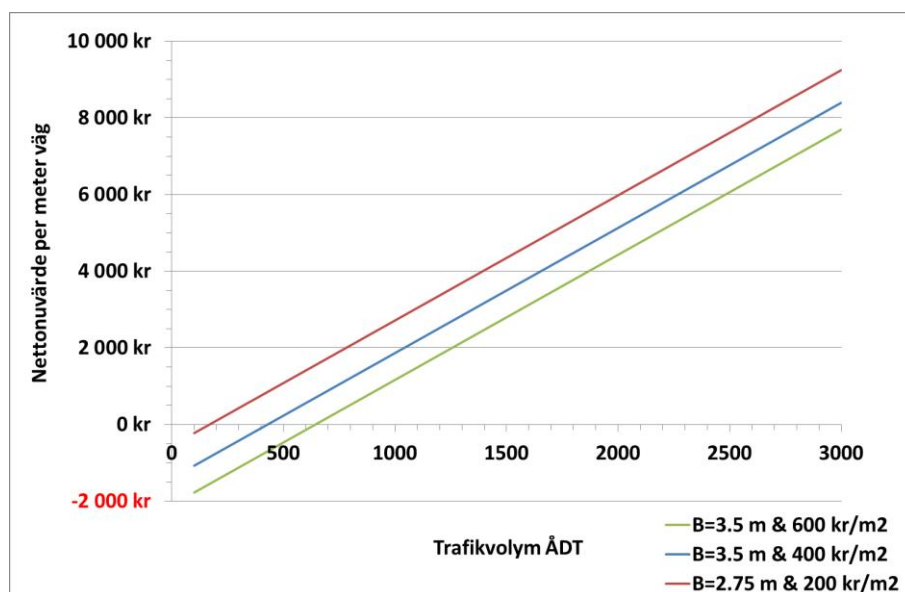
Måttet nettonuvärde (NNV) inkluderar jämförelse med investeringen. NNV
blir ca $4\,900 - 1\,400 = 3\,500$ kr/m. Eftersom NNV är större än 0 kr/m, så är
investeringen lönsam.

Nettonuvärdeskvoten (NNK) anger NNV i förhållande till grundinvesteringen.
NNV blir därmed ca $4\,900 / 1\,400 = 3.5$. Eftersom NNK är större än 0, så är
investeringen lönsam.

Nettonuvärde för ökad skevning vid tre kombinationer av körfältsbredd (3.5
m eller 2.75 m) och grundinvesteringskostnad 200 kr/m² (uppbankning av
grusväg), 400 kr/m² (AG-justering) respektive 600 kr/m² (rekonstruktion av
asfalterad vägbana) visas som funktion av trafikvolym ÅDT i Figur 42.

Vid låg trafikvolym ÅDT är sannolikt både körfältsbredd och åtgärdens me-
deltjocklek låg. Det senare talar för lågt kvadratmeterpris för åtgärden. Om-
vänt innebär hög ÅDT sannolikt både bredare körfält och tjockare åtgärd,
d.v.s. högre kvadratmeterpris. Som synes kan ökad skevning vara en lön-
sam investering på vägar med ned till trafikvolym ÅDT ca 150 fordon. I kur-
vor med förstärkningsbehov ökar nyttan, vilket gör åtgärden lönsam även vid
lägre trafikvolym än vad figuren visar.

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	



Figur 42 Nettonuvärde för ökad skevning

Känslighetsanalys

Restvärden i intervallet 15 – 35 % av grundinvesteringen påverkar Nuvärdet tämligen lite, genom en ökning med max ca 100 kr efter diskontering till investeringsåret.

Ökad skevning kan alternativt ses som en investering med "evig livslängd". Nuvärdet kan då beräknas som en geometrisk talserie med oändlig utsträckning. Nuvärdet blir då kvoten mellan den årliga nyttan och räntan. Exemplet ovan med 248 kr/år (vid 1 500 ÅDT) och 4 % ränta ger därmed nuvärdet $248 / 0.04 = 6\,200$ kr, vilket är påtagligt högre än vid beräkning på 40 år och restvärde under 35 %.

Med 0 % räntesats flyttas gränsen för trafikvolym där ökad skevning kan vara en lönsam investering från ÅDT ca 150 fordon till under 100 fordon. Detta är nivåer klart under ÅDT 250 fordon, vilket är Trafikverkets skiljelinje för beslut om vägar alls ska ha slitlager av grus eller av asfalt.

Ökad skevning ger god lönsamhet

Resultaten ovan visar att det är mycket god samhällsekonomi i att öka skevningen i feldoserade kurvor. Generellt sett, leder varje skattekrona som investeras i ökad skevning till flera kronor i återbäring. Avkastningen är avsevärt högre än i traditionella infrastrukturprojekt.

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

6. DISKUSSION OCH SLUTSATS

I etiskt sund väghållning ingår att följa upp olycksfrekvens och vid behov omgående sätta upp förstärkt varning för vältrisk till tung trafik. Detta gäller oavsett vilka planer som upprättas för att förbättra vägens tvärfall.

6.1 Kunskapsläget

Kurvor är flerfaldigt överrepresenterade i olycksstatistiken. Feldoserade ytterkurvor medverkar till de svåraste olyckorna. Tunga lastbilar av typ dragbil med ogynnsamt lastad EU-semitrailer uppvisar högst frekvens bland de extremt dödliga välto lyckorna.

Vid ca 300 e.Kr började vägar byggas med sadeltakformat tvärfall (bomboring). Skevning av ytterkurvor började bli vanligt på 1930-talet. Vetenskaplig beräkning med den s.k. punktmassemodellen etablerades 1936.

Skevningsvärdet beräknas med punktmassemodellen utifrån ett (i Sverige och många andra länder hastighetsberoende) dimensionerande sidofriktionstal. Sidofriktionstalet är ungefär hälften av bromsfriktionstalet, och konceptet skapar vägutformning som gör det möjligt att både bromsa och styra samtidigt utan att fordonet blir instabilt på hal vägbana. Friktionstalen kan vara bestämda utifrån endera bedömd åkkomfort, eller genom mätning av däck-/vägbanefriktion i kombination med någon form av säkerhetsfaktor.

Vid kurvtagning under körning i vägens dimensionerande hastighet märks feldosering inte bara i byxbaken, utan även genom rattutslag och styroment. I en välutformad kurva ska man vid den dimensionerande hastigheten i princip inte behöva vrida på ratten.

Den svenska anvisningen för vägars och gators utformning (VGU), anger felaktigt att: *"Dimensionerande friktionstal f motsvarar ca 2/3 av uppmätta friktionsvärden på relativt nybelagda vägar med bra däck vid vått väglag och låsta hjul."* Detta påstående stämmer inte, och VGU är därför direkt missledande. Enligt Vägverket (1983) är de friktionsvärden som används även i dagens VGU i själva verket bestämda utifrån åkkomfort. Trots komfortkriteriet saknar VGU's friktionstal rimlig säkerhetsmarginal, eftersom svenska vägar är vinterhalkiga under halva året. Därmed finns anledning att öka de skevningsvärden som anges i VGU.

Ett sammanfattande intryck av vägregler för skevning i Sverige, Norge och Danmark är att de är slarvigt eller rent av okunnigt författade, i strid med Newtons lagar, med missvisande formuleringar, motstridiga krav mellan nybyggnation och underhåll, uppenbart usel kostnadseffektivitet, samt direkt oanvändbara toleranskrav.

Bartlett (2016) har gjort en Internationell State-Of-The-Art för utformning av horisontalkurvor. Slutsatsen är att regelverken är både alltför komplicerade

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

och alltför förenklade. Det finns inte behov av så olika friktionsvärden och gränsvärden. Vidare tar anvisningarna inte hänsyn till tunga fordon's behov.

Amerikanska Federal Highway Administration bedömer vägars säkerhetsprestanda, genom att kombinera:

1. Historisk trafikolycksdata.
2. Statistiska modeller.
3. Resultat från studier före och efter åtgärder.
4. Värderingar utförda av trafiksäkerhetsexperter.

Med denna metodik estimerar FHWA att feldoserade kurvor ökar olycksutfallet avseende personbilar's avåknings och mötesolyckor, på så vis att olycksökningen är ca 3 % för varje procentenhet för lite skevning i en kurva.

Tre färskas studier har bekräftat att feldoserade kurvor är vanlig olycksorsak på landsvägar både i Sverige och i Norge. Bogdashova (2012) visar att tvärfallsfel är vanligt förekommande på E6 i Sør-Trøndelag, samt att olycksfrekvensen för avåknings och mötesolyckor stiger där vägen har fel tvärfall. Studien inkluderar en kostnads kalkyl för reparation av tvärfallsfel större än 2 procentenheter. Tyvärr användes en enhetskostnad för vägreparationen som var ca 7.5 gånger högre än marknadsmässigt pris, vilket gör att kalkylen måste "kalibreras om" och att åtgärdens lönsamhet fördunklats. Vissa erfarenheter från Norge kring skevade innerkurvor (!) saknar relevans i Sverige. Lofthaug (2012) konstaterade att tvärfallsfel var den klart största orsaken till olyckor på E6 i Nord Trøndelag och Nordland. Lofthaug använde tyvärr Bogdashova's grovt felaktiga å-pris för tvärfallsjustering. Yaqub (2014) studerade personskadeolyckor på väg 360 Lycksele – Vilhelmina. Efter bortfiltrering av 1/3 av olyckorna, visades att på 80 % av återstående olycksplatser uppvisade två eller fler vägparametrar allvarliga brister. På 65 % av olycksplatserna överskred sidofriktionsbehovet den dimensionerande sidofriktionen enligt vägreglerna i VGU, d.v.s. kurvan hade alltför feldoserat tvärfall alternativt var för tvär för hastighetsgränsen, eller. Lösningen består dels i varningsskyltar vid feldoserade kurvor alternativt hastighetssänkning, samt att stor kraft läggs på att vid underhållsbeläggning skapa korrekt utformade tvärfall som minimerar sidkraften vid kurvtagning.

Svenska VGU föreskriver -2.5 % tvärfall vid negativ skevning. Data från tyska Autobahn visar att olycksfrekvensen i negativt skevad vänsterkurva/ytterkurva ökar med ökande negativ skevning över -1.5 %. Utifrån de tyska erfarenheterna bör alltså VGU revideras, så att på de sträckor där negativ skevning utförs ska normalt väljas -1.5 % tvärfall istället för -2.5 %.

På flerfältsvägar utan mötande trafik måste sidofriktionsbehovet räknas upp med hänsyn till ökad sidkraft vid lagliga omkörningar. I praktiken leder detta till krav på ökad skevning på flerfältsvägar. Det enda alternativet är att införa filbytesförbud i kurvor på flerfältsväg, åtminstone vid våt eller på annat sätt halkig vägbanas (utomlands förekommer förbudsskylt "Stay in lane"). Svenska VGU bör revideras så att skevningsvärdet ökas på flerfältsvägar.

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

Det finns flera skäl att tillämpa gränser för högsta skevningsvärde. Ett argument som vid modern riskbedömning dock har låg relevans, är risken för glidning i sidled vid låg fart. Orsaken är att glidning typiskt ger harmlös konsekvens i form av startbesvär, vilket innebär låg risk för svår personskada jämfört med avåkning eller mötesolyckor i hög fart p.g.a. för låg skevning.

Särskilt för specialfallet kurva med korsande landsväg finns goda skäl att vässa VGU's råd om att välja låg skevning (+2.5 %), till ett skall-krav om låg skevning (förslagsvis max +4 % och fortsatt råd att normalt välja +2.5 %).

Befintlig kunskap visar att tunga fordon behöver extra stor skevning. Särskilt vid hård kurvtagning på ishala vägar kan sidofriktionen under styrdäcken störtdyka, vilket förklarar överrisken med avåkningar i ramper och andra mycket snäva kurvradier. Avancerade studier har visat att tunga fordon har betydligt större variation i sidofriktionskraft under hjulen vid kurvtagning, bl.a. till följd av lastbilssläpets krängning. Detta medför att lastbilar behöver cirka 10 % högre sidofriktionstal än vad vägreglerna hittills beaktat. Hög tyngdpunkt ökar vältrisen. Kombinationen av högre tyngdpunkt och högre sidoacceleration (till följd av "bakåtförstärkning") gör att släpfordon regelmässigt välter innan dragbilen eller lastbilen ens börjat lämna från marken. Detta gör det mycket svårt för chauffören att få feedback på hur nära släpet är att välta, vilket gör att många fortsätter köra nära vältgränsen utan att ha en aning om det. Omfattande studier i Nya Zeeland visar att för varje procentenhet skevning som saknas, ökar frekvensen av "Loss-of-control" olyckor med tunga lastbilar med 5 %.

I specialfallet kurva i nedförsbacke behövs extra hög skevning. FHWA rekommenderar att dock att skevningen i "utförskurvor" begränsas till 12 %. Studier på vintervita vägar i West Virginia visar att olycksfrekvensen ökade efter minskning (!) av skevning till 8 % i utförskurvor. Idag är 5.5 % max skevning i svenska VGU. Detta är uppenbart alldeles för liten skevning, vilket innebär att max skevning i VGU behöver höjas rejält.

Efter en mycket detaljerad utredning av vältolycka med svensk timmerbil på E6 i Norge, drog norska Haverikommissionen slutsatsen att dagens vägnormer för utformning av skevning m.m. hos påfartsramper inte tar tillräcklig hänsyn till stora tunga fordon och att deras dynamik ställer högre krav på vägutformningen än vad personbilars behov gör. Haverikommissionen rekommenderade därför att vägnormerna revideras för utformning respektive byggande av skevade påfartsramper.

Klotoider kan öka vägens risknivå. Vissa forskare framhåller att kördynamiken förbättras om vägen utformas med övergångskurvor, där kurvradien ändras gradvis mellan raklinje och radien i kurvans huvudbåge. Därmed underförstås att övergångskurvor ger ökad trafiksäkerhet. Detta är inte validerat. Tvärtom pekar studier på att klotoider kan öka olycksrisken. En av orsakerna är att klotoider gör det svårare för förare att korrekt bedöma hur tvärhuvudbågen i kurvan är. Detta leder till systematisk överskattning av hur fort man kan köra i kurvan och därmed till sena inbromsningar inne i kurvan.

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

Före-efter studier på sträckor där klotoider byggts bort visar att olycksfrekvensen sänkts med upp till 80 %. En annan orsak till att klotoider kan öka olycksrisken, är att kurvans huvudbåge måste göras tvärare (och därmed farligare) för att "få plats" med klotoider mellan två givna tangentpunkter.

Traditionell analys av kraftspelet vid kurvtagning (så som i svenska vägutformningsreglerna VGU) har endast avsett analys av sladdrisk för personbil, utförd med den s.k. *punktmassemodellen*. Den analysen visar att pådrivande sidkraft måste uppvägas av summan av tvärfallet och sidofriktion mellan vägyta och däck. Detta innebär att när vägfriktionen sjunker mot noll, som på våt glattis, blir skevningen helt avgörande för sladdrisken. I sambandet ingår tvärfallets riktning (tecken), vilket innebär att tvärfall med ogynnsam riktning ger kraftigt ökad sladdrisk. Sidofriktionstalet är typiskt mindre än hälften av det friktionstal som mäts upp med friktionsmätare.

För cykelbanor behövs en översyn av minsta tillåtna horisontalradie, i synnerhet för GC-vägar med låga tvärfall som anpassats för funktionshinder begränsningar. För renodlade cykelvägar behöver Sverige införa krav på högre skevning än vad som krävs i länder med varmt vinterklimat.

6.2 Diskussion om resultat för granskade typfall

"Rätt skevningsvärde" blir betydligt högre när kraftspelet vid kurvtagning analyseras med mer relevant fordonmodell än den traditionella "punktmassemodellen". En relevant modell beaktar såväl tyngdpunktens höjd och sidoförskjutning vid krängningsrelaterad viktöverflyttning, som situationer med lägre friktion under ytterhjul. I föreliggande utredning analyseras tre typfall; rondell/ramp, modern landsvägskurva samt gammal feldoserad tvär landsvägskurva. Resultaten visar att traditionell analys med punktmassemodellen överskattar högsta säkra kurvtagningshastighet samt underskattar erforderlig skevning sett med hänsyn till kriteriet sladdrisk. Kriteriet vältrisk visas gränssättande för såväl rondeller (liksom tvära lågfartsramper) och för gamla tvära kurvor.

Rondeller ska vara lagom feldoserade

Ett av syftena med rondell som korsningstyp, är att dämpa farten. Negativ skevning tillhör de nyckelfaktorer som gör rondeller fartdämpande. Därmed kan det vara direkt olämpligt att bygga rondeller utan en viss mån av "feldosering". Detta får lastbilstrafiken helt enkelt förhålla sig till. TYA har under 2014 tagit fram handboken "*Vältrisker och säkrare körning med hög tyngdpunkt*", med tydliga instruktioner för säkrare körning i bl.a. just rondeller. Under 2016 lanserar TYA också en chaufförskurs med samma benämning.

Riskerna med negativ skevning medför stort ansvar på väghållare / byggherre / projektör / byggherreprenör, att rondeller ska byggas och underhållas

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

så att tvärfallet aldrig kommer utanför snäv tolerans från tvärfallsvärde projekterat med insikt om dess inverkan på vältrisk. I rondeller byggda i backe, måste längslutningen beaktas vid val av tvärfallsvärde.

Viktigt ha krav på minsta tillåtna skevning i lågfartsramper

Föreliggande utredning visar tydligt att sannolikheten för olycka i tvära ramper ökar kraftigt vid låg skevning. Därför är det viktigt att vägregelverk ställer krav på minsta tillåtna skevning i ramper.

I ramper byggda i backe, måste längslutningen beaktas vid val av tvärfallsvärde.

Till dess befintliga suboptimalt skevade ramper byggs om, är det viktigt att snarast sätta upp varningsskyltar.

Ökad skevning minskar sladdrisk på moderna landsvägar

Vid utformning av moderna landsvägskurvor bör skevningen beräknas med den komplexare modellen i syfte att minimera sladdrisk vid krängning. Med tillräckligt låga dimensionerande sidofriktionstal (så som $\mu_{medel} = 0.075$, motsvarande ishalka) ger sådan dimensionering god marginal även för vältrisk på barmark med hög friktion.

Åtgärda farligt feldoserade gamla kurvor snarast

Föreliggande utredning visar höga risker i feldoserade gamla kurvor för både instabilitetsolyckor (singelolyckor samt mötesolyckor där föraren av ena fordonet tappat herraväldet över sitt fordon) samt vältoolyckor.

Nyttokostnadskalkylen visar mycket hög lönsamhet för att öka skevningen i trafikfarligt feldoserade kurvor. Detta gäller för vägar med trafikvolym ända ned till nivåer under Trafikverkets skiljelinje vid ÅDT 250 fordon för beslut om vägar ska ha slitlager av grus eller av asfalt. Detta betyder att trafikfarlig feldosering är lönsamt att bygga bort på alla normala landsvägar.

Det är ont om reformer för ökad trafiksäker framkomlighet på låg- och medeltrafikerade landsvägar. Högtrafikerade vägar har fått mitträcken och stadsgator har fått rondeller, medan lite eller inget gjorts med de vägar och i de landsändar som har överlägset högst trafikdödlighet. Därför framstår satsningar mot feldoserade kurvor som särskilt angelägna. Detta särskilt med tanke på att nuvarande olyckstrend inte tycks räcka till för att klara Nollvisionens etappmål till år 2020 om max 220 vägtrafikdödade per år.

Lönsamhetskalkylen förutsätter att ombyggnation av trafikfarligt feldoserade kurvor kostnadseffektivt utförs i samband med ordinarie underhållsbelägg-

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

ning. Detta är särskilt viktigt för lågtrafikerade vägar. Åtgärds cyklern för ordinarie underhållsbeläggning är drygt 20 år lång. Den kan förkortas genom att budgeten för vägunderhåll och tidigarelägga beläggningsprojekt.

Tills dessa farliga landsvägskurvor byggts om, är det viktigt att snarast sätta upp varningsskyltar.

6.3 Allmänna reflektioner

Analys med den nya fordonsmodellen visar att olycksrisken stiger avsevärt i situationer där yttre hjul har lägre friktion, t ex orsakat av löst grus, snömodd, våt is eller andra typer av föroreningar. Detta behöver beaktas vid både vägutformning och vägdrift, men så har hittills inte skett i tillräcklig utsträckning.

De flesta olyckor orsakas inte av en enskild faktor, utan av flera gemensamma faktorer. Analyserna i föreliggande utredning har bara i begränsad omfattning beaktat störande faktorer. Olycksrisken kan minskas radikalt genom att minska eller eliminera inverkan av en eller flera riskfaktorer, så som feldoserad skevning. Exempel på riskfaktorer som ofta spelar in i olyckor är:

- Kurvradiet alldeles för skarp för skyltad hastighet.
- Tvärt filbyte i kurva på flerfältsväg.
- Ojämnt deformerade vägkanter.
- Andra former av vägojämnheter.
- Vindbyar.
- För lågt däcktryck.
- Nyttolast med tyngdpunkt förskjuten i sidled.
- Fortkörning.
- Olämplig manövrering.

Resultat från analysen av vältrisk visar att tvärfall som utformat olämpligt i förhållande till vägens referenshastighet, horisontalkurvatur och backighet kan, trots låg hastighet, vara en primär orsak till vältolyckor vid hård kurvtagning så som i rondeller, tvära ramper och skarpa kurvor. Analysen visar å andra sidan att trots mycket hög hastighet är olämpligt tvärfall i flacka motorvägskurvor tämligen osannolik som primär orsak till vältning. Däremot kan viktöverflyttning i ogynnsamt skevade motorvägskurvor naturligtvis öka risken för olämpliga körmanövrer, samt öka risken för sladd följt av sekundär vältning över låga hinder så som kantstenar eller allt för låga vägräcken.

Resultat från analys av sladdrisk visar att vägens tvärfallutformning i horisontalkurvor kan ge oavsiktligt låg trafiksäkerhetsmarginal, på grund av att den traditionella punktmassemodellen inte tar hänsyn till effekterna av viktöverflyttning (*weight transfer*) samt inverkan av ganska normalt förekommande friktionsskillnad i inre respektive yttre hjulspår. Inverkan av storleken

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

hos vägens tvärfall på sladdrisk verkar vara ganska liten inom ett relativt brett spektrum runt "optimalt" tvärfall, men sannolikt ökar betydelsen av tvärfallet kraftigt när värdet kommer utanför nämnda stabila område (varefter inverkan av viktöverflyttning och känsligheten för split friction ökar snabbt).

Asfaltlappning är en grupp av väg reparationsmetoder, varav vissa versioner kraftigt ifrågasätts för att extremt öka olycksrisken under vissa väglag. Lappning är ofta helt nödvändigt av kostnadsskäl. Särskilt ifrågasättande måste dock riktas mot rutinmässigt lappande av underdimensionerade vägar med otillräcklig bärförmåga (t.ex. orsakad av bristande sidostöd därför att bred vägren saknas). Nya asfaltlappar har ofta en blank yta (för lite makrotextur). Ibland har förseglingar av längsgående skarvar mellan asfalt drag misslyckats, så att all avsandning släppt och efterlämnat en spegelblank ca 2 dm bred rand. Dessa blanka ytor kan i vått tillstånd bli hala som is. Nya svarta lappar kan även i kallt väder medföra en överraskande olycksrisk, då tunn is soltinar snabbare och därmed tidigare på mörka lappar än på intilliggande gammal gråaktig asfalt. Resultatet kan bli 100 % väggrepp på bar lappad asfalt friktion i ena hjulspåret, medan extremt hal våt tunn is ger 5 % väggrepp i det andra hjulspåret. Detta medför extrem sladdrisk vid hård bromsning. En hållbar lösning på det grundläggande problemet är förstärkning av vägkroppen, ofta i kombination med breddning av vägrenen. För att förhindra split friction efter oundviklig lappning, bör avslutningsvis hela körfältsbredden - inte enbart asfaltlappningen - ytbehandlas för att skapa homogen vägyta avseende både textur (ytskrovlighet) och svärta.

Spårningsavvikelsen hos tunga lastbilsekipage påverkas av tvärfallet. En stor tvärfallsförändring på 6 % ändrar ekipagets sidoutrymmesbehov med cirka 2 dm. Detta understryker betydelsen av breda körfält, i synnerhet i feldoserade kurvor.

Analysen av risken för instabilitetsolyckor visar att tvärfall som utformats olämpligt i förhållande till kurvradie, längslutning kan ge ökad olycksrisk redan vid mycket låga referenshastigheter (där detta medfört mycket snäva kurvradier). Detta gäller alla fordon med påtaglig viktöverflyttning i sidled, jämfört med positionen för normalkrafter via däcken. En typ av sådant fordon är cykel. Idag saknar VGU relevanta krav på skevning i kurva på cykelvägar.

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

7. FELKÄLLOR OCH OSÄKERHET

7.1 Fordonsmodellen

Analysen med den mer representativa fordonsmodellen inkluderar ett par storheter vars parametervärden valts subjektivt och som påverkar beräkningsresultaten. Följande värden har satts utifrån utredarens bedömningar:

Måttet på tyngdpunktens sidoförskjutning; $d = -0.3$ m.

Normalkrafterna $N_1 = 20$ kN och $N_2 = 80$ kN motsvarar tio tons standardaxel-last under beaktande av villkoret Load Transfer Ratio (LTR) = 0.6.

7.2 Nyttokostnadskalkylen

Estimat av absoluta tal i olycksanalyser är typiskt behäftade med hög osäkerhet. Föreliggande utredning fokuserar dock på relativ förändring av olyckstal, till följd av ökad skevning. Detta innebär att nyttoanalysen av olycksminskningen blir betydligt mer träffsäker än analys av enskilt värde. Förutsatt att bedömd relativ olycksreduktion i [%] stämmer, så spelarmåttliga avvikelser i absolut olycksfrekvens före åtgärd inte särskilt stor betydelse för riktigheten i utredningens slutsats och rekommendation.

Utredningens bedömda relativa olycksreduktion vid ökad skevning "4 % färre personskadeolyckor per procentenhet ökad skevning" är baserad på två gedigna utredningar. Bedömningen är i princip ett medelvärde av effektsamband från dels US FHWA (3 % fler personbilsolyckor per procentenhet saknad skevning) och dels TERNZ (5 % fler lastbilsolyckor per procentenhet saknad skevning). Därmed bedöms osäkerheten vara låg.

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

8. REKOMMENDATION

Vägutformningsanvisningen VGU bör revideras i en rad avseenden:

- Det dimensionerande sidofriktionstalet enligt Formel 1 samt i Figur 7 bör generellt sänkas med 10 %, samt vid låga hastigheter med upp till 20 %. Detta medför att skevningsvärdet ökas med 1 – 2 procentenheter vid nybyggnation.
- Det är viktigare att tvärfallsreglerna är kostnadseffektiva för underhåll (berör ca 5 % per år av vägnätet) än enkla att använda vid nybyggnad. Därför bör VGU inte ange tillåtet tvärfall i de diskreta stegen 2.5 %, 4 % och 5.5 %. Istället bör VGU följa principen i Danmarks vejrregler, vilka anger intervall där tvärfallet får väljas fritt. Detta medför att underhållsåtgärden i hög grad kan anpassas mot befintliga tvärfall. (I praktiken medför reformen snarare att VGU överhuvudtaget blir användbar vid underhåll; i dagsläget följer knappast någon underhållsingenjör VGU's ineffektiva anvisningar för diskreta värden på tvärfall).
- Max skevning i kurvor på vanlig platt terräng bör höjas från 5.5 % till 10 %, vilket innebär radikalt ökad tillämpbarhet för VGU vid underhåll av kurvor med understandard för kurvradie.
- Inför ett nytt krav "Max skevning i kurvor i utförsbackar". Kravets gränsvärde bör vara 12 %.
- Inför skall-krav på "Max +4 % skevning i kurva som har plankorsning med annan allmän väg". Vid behov i kombination med varningsskyltar, t ex "Farlig kurva".
- Vid negativ skevning bör tvärfall -2.5 % ersättas med -1.5 %.
- För flerfältsväg utan mötande trafik bör krav införas på extra stor skevning, med hänsyn till ökad sidkraft i samband med tvärt filbyte. Alternativt bör spärmlinje användas, tillsammans med ett nytt vägmärke "Förbjudet att byta körfält" i aktuell horisontalkurva.
- Inför krav på skevning på renodlade cykelvägar.

I framtiden bör projekterad vägmodell till nya vägar utvärderas med hjälp av datormodeller för typfordon, istället för att enbart kontrolleras mot tabellerade krav. Se exempel i Figur 21.

Trafikfarlig feldosering är lönsamt att bygga bort på alla normala landsvägar, förutsatt att ombyggnation utförs kostnadseffektivt i samband med ordinarie underhållsbeläggning. Åtgärds-cykeln för ordinarie underhållsbeläggning är drygt 20 år lång. Den bör förkortas genom att öka budgeten för vägunderhåll och tidigarelägga beläggningsprojekt.

Tills dessa farliga landsvägskurvor byggts om, är det viktigt att snarast sätta upp varningsskyltar. Gärna radarstyrda med budskap "Rek max hastighet".

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

9. SAMMANFATTNING

Transportstyrelsen ska föreskriva om tekniska egenskapskrav för vägar och gator. Föreliggande utredning ska ge underlag för beslut om ett av säkerhetskraven på tvärfall ska vara att "krängningsrisken i kurvor minimeras". Utredningen har genomförts dels genom litteraturstudie av överrisk för olyckor i feldoserade kurvor, dels genom analys av sladdrisk samt vältrisk med hjälp av en fordonmodell som beaktar tyngdpunktens höjdläge och sidoförskjutning samt inverkan av olika friktion i inre respektive yttre hjulspår. Detta gör analysen relevant även för höga tunga fordon (tunga lastbilar med släp samt bussar). Utredningen har även kartlagt förändringar i byggherrekostnad för ökad skevning tvärfall, såväl anläggningskostnad vid nybyggnad som vid asfaltunderhåll.

Kurvor är flerfaldigt överrepresenterade i olycksstatistiken. Feldoserade ytterkurvor medverkar till de svåraste olyckorna. Tunga lastbilar av typ dragbil med ogynnsamt lastad semitrailer uppvisar högst frekvens bland de extremt dödliga våltolyckorna.

År 1936 etablerades vetenskaplig beräkning av skevning hos ytterkurvor med den s.k. punktmassmodellen. Skevningsvärdet beräknas utifrån ett dimensionerande sidofriktionstal, vilket är ungefär hälften av bromsfriktionstalet. Den svenska anvisningen för vägars och gators utformning (VGU), anger felaktigt att dimensionerande friktionstal är härlett från våtfriktion på asfalt. Enligt Vägverket (1983) är de friktionsvärden som används även i dagens VGU i själva verket bestämda utifrån åkkomfort på sommarvägslag. Trots komfortkriteriet saknar VGU's friktionstal rimlig säkerhetsmarginal, eftersom svenska vägar är vinterhalkiga under halva året. Färsta studier har bekräftat att feldoserade kurvor är vanlig olycksorsak på landsvägar i Sverige. Att VGU's avsnitt om tvärfall/skevning måste revideras, det står därmed utom rimligt tvivel.

Efter kombination av:

- historiska trafikolycksdata,
- statistiska modeller,
- resultat från studier före och efter åtgärder, samt
- värderingar utförda av trafiksäkerhetsexperter, har

US FHWA estimerat att feldoserade kurvor ökar personbilars avåknningar och mötesolyckor med ca 3 % för varje procentenhet för lite skevning i en kurva. Omfattande studier i Nya Zeeland visar att för varje procentenhet skevning som saknas, ökar frekvensen av "Loss-of-control" olyckor med tunga lastbilar med 5 %.

Vägutformningsanvisningar världen över är baserade på förenklad analys (anno 1936) av personbilars dynamik, och beaktar inte befintlig kunskap som sedan decennier visat att tunga fordon behöver extra stor skevning.

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

Särskilt vid hård kurvtagning på ishala vägar kan sidofriktionen under tunga fordonas styrdäck sjunka dramatiskt, vilket förklarar överrisken med avåkningar i ramper och andra mycket snäva kurvradier. Avancerade studier har visat att tunga fordon har betydligt större variation i sidofriktionskraft under hjulen vid kurvtagning, bl.a. till följd av lastbilssläpets krängning. Detta medför att lastbilar behöver cirka 10 % högre sidofriktionstal än vad vägreglerna hittills beaktat. Kombinationen av högre tyngdpunkt och högre sidoacceleration (till följd av "bakåtförstärkning") gör att släpfordon regelmässigt välter innan dragbilen eller lastbilen ens börjat lämna från marken. Detta gör det mycket svårt för chauffören att få feedback på hur nära släpet är att välta, vilket gör att många ofta kör nära vältgränsen utan att ha en aning om det. Relevant kriterie vid utformning av skevning är alltså stabilitet hos ogynnsamt lastade tunga semitrailers under körning dels på torr asfalt och dels på våt is, inte kurvtagningskomfort i en personbilsmodell från år 1936 på regnvåt asfalt som i dagens VGU.

Utredningen ger rekommendation om reviderat krav på tvärfallets storlek vid s.k. negativ skevning, samt på flerfältsvägar utan mötande trafik.

Idag är 5.5 % max skevning i svenska VGU. Detta gränsvärde bör höjas avsevärt. Det finns flera skäl att tillämpa gränser för högsta skevningsvärde. Ett argument som vid modern riskbedömning har låg relevans, är risken för glidning i sidled vid låg fart. Orsaken är att glidning typiskt ger harmlös konsekvens i form av startbesvär, vilket innebär låg risk för svår personskada jämfört med avåkning eller mötesolyckor i hög fart p.g.a. för låg skevning.

I specialfallet kurva i nedförsbacke behövs extra hög skevning, upp till 12 %.

Särskilt för specialfallet kurva med korsande landsväg finns goda skäl att vässa VGU's råd om att välja låg skevning (+2.5 %), till ett skall-krav om låg skevning (förslagsvis max +4 % och fortsatt råd att normalt välja +2.5 %).

Klotoider kan öka vägens risknivå. En av orsakerna är att klotoider gör det svårare för förare att korrekt bedöma hur tvär huvudbågen i kurvan är. Detta leder till systematisk överskattning av hur fort man kan köra i kurvan och därmed till sena inbromsningar inne i kurvan.

Utredningens resultat visar att traditionell analys med punktmassemodellen överskattar högsta säkra kurvtagningshastighet samt underskattar erforderlig skevning sett med hänsyn till kriteriet sladdrisk. Kriteriet vältrisk visas gränssättande för såväl rondeller (liksom tvära lågfartsramper) och för gamla tvära kurvor.

Vid utformning av moderna landsvägskurvor bör skevningen beräknas med den komplexare fordonmodellen i syfte att minimera sladdrisk vid krängning. Med tillräckligt låga dimensionerande sidofriktionstal (så som μ_{medel} =

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

0.075, motsvarande ishalka) ger sådan dimensionering god marginal även för vältrisk på barmark med hög friktion.

Föreliggande utredning visar höga risker i feldoserade gamla kurvor för både instabilitetsolyckor (singelolyckor samt mötesolyckor där föraren av ena fordonet tappat herraväldet över sitt fordon) samt vältoolyckor.

Nyttokostnadskalkylen visar mycket hög lönsamhet för att öka skevningen i trafikfarligt feldoserade kurvor på alla normala landsvägar.

För cykelbanor behövs en översyn av minsta tillåtna horisontalradie, i synnerhet för GC-vägar med låga tvärfall som anpassats för funktionshinderbegränsningar. För renodlade cykelvägar behöver Sverige införa krav på högre skevning än vad som krävs i länder med varmt vinterklimat.

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

10. REFERENSER

A Policy on Geometric Design of Highways and Streets. (1994). American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Washington D.C.

A Policy on Highway Types (Geometric). (1940). American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington D.C.

Albert, W. (1972). *The Turnpike Road System in England, 1663 - 1840*. Cambridge University Press.

Andersson, L. (2008). *Det ska bärgas i tid*. Rikstväns service AB.
Internet 2016-01-19: <http://www.rikstvaan.se/>

Assum, T. & Sørensen, M.W.J. (2010). *130 dødsulykker med vogntog – Gjennomgang av dødsulykker i 2005-2008 gransket av States vegvesens ulykkesanalysegrupper*. Transportøkonomisk institutt, TØI- rapport 1061/2010. Internet 2016-01-25: <http://www.vegvesen.no/attachment/266318/binary/618810>

ATB Vinter. (2003). Vägverket, publikation 2002:148.
Internet 2015-12-04: <https://online4.ineko.se/trafikverket/Product/Detail/44463>

Banked frictionless curve and flat curve with friction. Mastering Physics Solutions.
Internet 2015-12-01: <http://www.masteringphysicsolutions.net/mastering-physics-solutions-banked-frictionless-curve-and-flat-curve-with-friction/>

Baines, P. M. (2016). *The influence of pedaling on the lateral dynamics of cycling*. M.Sc. thesis. Delft University of Technology.
Internet 2016-05-10: <http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid%3Afd56cd-ad77-4ca2-8635-a75fd9111898/>

Barnett, J., Haile, E.R. & Moyer, R.A. (1936). *Safe Side Friction Factors and Superelevation Design*. Proceedings of the Sixteenth Annual Meeting of the Highway Research Board. Washington, D.C. Highway Research Board Proceedings, Vol. 16.

Bartlett, R. (2016). *Minimum horizontal radius – Revision 05*. Comparative Geometrics. Internet 2016-01-31: <https://comparativegeometrics.wordpress.com/2016/01/19/minimum-horizontal-radius-again/>

Bergman, M. (2004). *Effektivare cykeltrafik: Planeringsmässiga och tekniska förutsättningar för ökad cykelanvändning*. Examensarbete vid Arkitekturskolan KTH.

Bicycle Paths. (1994). North Carolina Department of Transport.
Internet 2016-05-13: <https://connect.ncdot.gov/projects/bikeped/documents/bicycle%20projects%20planning%20and%20design%20guidelines%20-%20chapter%207%20-%20bicycle%20paths.pdf>

Bitumenbundna lager. (2014). Trafikverket, TDOK 2013:0529.
Internet 2016-01-19: <http://trvdokument.trafikverket.se/>

Bogdashova, N. (2012). *En studie av sammenheng mellom horisontalkurvatur, tverrfall og trafikkulykker på vegnettet*. Norges Teknisk-Naturvitenskaplige Universitet. Internet 2016-01-19: <http://ntnu.diva-portal.org/smash/get/diva2:566538/FULLTEXT01.pdf>

Bonneson, J.A. (2000). *Superelevation Distribution Methods and Transition Designs*. Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C. NCHRP report 439.

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

Carvalho, E. (1899). *Théorie du Mouvement du Monocycle et de la Bicyclette*. Gauthier-Villars, Paris, France.

Chatburn, G.R. (1921). *Highway engineering: Rural roads and pavements*. Wiley & Sons, New York.

Internet 2016-01-31: <http://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=wu.89090506528;view=1up;seq=9>

Chudworth, C. J. & Stewart, D. (1990). *A Remedy for Accidents at Bends*. Traffic Engineering & Control. Vol. 31, p.88-93.

Internet 2016-01-14: <http://trid.trb.org/view.aspx?id=312495>

Conquering Roads. (1937). General Motors.

Internet 2015-12-01: <https://www.youtube.com/watch?v=AO4TVoaCPI> (se från t = 3 min 55 s).

Cooper, I. (2007). *All Roads Lead...* Grantville Gazette, Vol 10.

Internet 2016-01-14: https://grantvillegazette.com/wp/article/all_roads_lead/

Cycle Infrastructure Design. (2008). UK Department for Transport.

Internet 2016-05-13: https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/329150/ltn-2-08_Cycle_infrastructure_design.pdf

Cycling Aspects of AustRoads Guides. (2011). AustRoads.

Internet 2016-05-13: http://www.bcs.asn.au/austroads_cycling.pdf

Dahlberg, E. (1999). *Stabilitet hos lastbilar med dubbla lastplan*. Scania CV AB.

De Pont J.J. (2006). *Heavy Truck Safety in Tasmania*. International Forum for Road Transport Technology 9th International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions, Pennsylvania.

Internet 2016-01-28: <http://road-transport-technology.org/Proceedings/9%20-%20ISHVWD/Session%2010/Heavy%20Truck%20Safety%20in%20Tasmania%20-%20de%20Pont.pdf>

De Pont, J.J., Baas, P. & Latto, D. (2002). *Improving the Safety of a Log Transport Fleet*. International Large Truck Safety Symposium, Tennessee, USA.

De Pont J.J., Charlton S.G., Latto D. & Baas P.H. (2004). *Heavy Vehicle Speed through Curves*. International Forum for Road Transport Technology 8th International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions, South Africa.

Internet 2016-01-28: <http://road-transport-technology.org/Proceedings/8%20-%20ISHVWD/HEAVY%20VEHICLE%20SPEED%20THROUGH%20CURVES%20-%20de%20Pont.pdf>

Dokumentation av färdtekniska grundvärden och linjeföring. Vägverket, meddelande TU 1983:4.

Eck, R.W. & French, L.J. (2002) *Effective Superelevation for Large Trucks on Sharp Curves and Steep Grades*. West Virginia University.

Internet 2016-01-28: http://ntl.bts.gov/lib/23000/23200/23230/EFFECTIVE_SUPERELEVATION.PDF

Elvik, R., Vaa, T., Høy, A. & Sørensen, M. (2016). *Trafikksikkerhetshåndboken. Kapittel 1.13, Utbedring av vegers linjeføring og siktforhold*.

Internet 2016-01-27: <http://tsh.toi.no/>

Ervin, R.D., Nisonger, R.L., MacAdam, C.C. & Fancher, P.S. (1983). *Influence of Size and Weight Variables on the Stability and Control Properties of Heavy Trucks*. University of Michigan Transportation Research Institute, Ann Arbor. Report No. UMTRI-83-10/1.

Internet 2016-01-28: <http://deepblue.lib.umich.edu/handle/2027.42/262>

Granlund, J. (2008). *Health Issues Raised by Poorly Maintained Road Networks. The ROADX III project*.

Internet 2016-01-29: <http://www.roadex.org/wp-content/uploads/2014/01/Health-Issues-RIII.pdf>

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

Granlund, J. (2010.a). *E4 Förbifart Stockholm – Granskning av vägbanans planerade geometri*. Rapport från tredjepartsgranskning utförd vid Vectura på uppdrag av WSP/Sweco/Tyréns och Vägverket.

Granlund, J. (2010.b). *Safer Curves on Multiple Lane Roads*. Transportation Research Arena Europe, Brussels. Internet 2015-12-01: <http://www.slideshare.net/Johan-Granlund/safer-curves-on-multiple-lane-roads-granlund>

Granlund, J. (2012). *Vehicle and human vibration due to road condition*. The ROADDEX IV project. Internet 2016-01-29: <http://www.slideshare.net/JohanGranlund/vehicle-and-human-vibration-due-to-road-condition-roadex-iv>

Granlund, J. (2013). *Bättre eller sämre trafiksäkerhet med klotoider?* Swecos blogg om infrastruktur och trafikdesign. Internet 2016-01-29: <http://blogs.sweco.se/infrastruktur-och-trafikdesign/battre-eller-samre-trafiksakerhet-med-klotoider/>

Granlund, J. (2015). *Så kan vägunderhållet ta hänsyn till trailerekipagens behov*. Nordiskt Vägforum seminarium "Trafiksäkerhetsrisker med EU-trailer på hala vägar", Karlstad. Internet 2016-01-26: <http://www.nvfnorden.org/library/Files/Utskott-och-tema/For-don-och-transporter/Seminar/Trafiks%C3%A4kerhetsrisker-med-EU-trailer-p%C3%A5-hala-v%C3%A4gar/11%20S%C3%A5%20kan%20asfaltun-derh%C3%A5llet%20ta%20h%C3%A4nsyn%20till%20trailerekipagens%20behov,%20J%20Granlund%20WSP.pdf>

Granlund, J. & Sik, I. (2012). *Åtgärdsförslag till handlingsplan för Drift och Underhåll i Stockholms stad - Med fokus på ökad säkerhet för oskyddade trafikanter*. Uppdragsrapport från Vectura till Stockholms stad, Trafikkontoret.

Granlund, J., Haakanes, I. & Ibrahim, R. (2014). *Lowered Crash Risk with Banked Curves Designed for Heavy Trucks*. International Heavy Vehicle Transport Technology Symposia HVT13, San Luis, Argentina. Internet 2016-01-25: <http://www.slideshare.net/JohanGranlund/hvt13-granlund-et-al-lowered-crash-risk-with-banked-curves-designed-for-heavy-trucks-with-high-co-g3>

Haywood, J. C. (1980). *Highway alignment and superelevation: Some design-speed misconceptions*. Transportation Research Record, 757: 22–25.

Heavy vehicle stability guide. Land Transport Safety Authority, New Zealand. Version 1.0. Internet 2016-02-07: <https://www.nzta.govt.nz/assets/resources/heavy-vehicle-stability-guide/docs/heavy-vehicle-stability-guide.pdf>

Hjort, M. (2009). *Däckens betydelse för antisladdsystems funktion på isigt underlag*. Väg- och Transportforskningsinstitutet, VTI Rapport 662. Internet 2015-12-03: <https://www.vti.se/sv/publikationer/pdf/dackens-betydelse-for-antisladdsystems-funktion-pa-isigt-underlag.pdf>

Hoogvelt, R. B. J., Ruijs, P. A. J. & Klootwijk, C. W. (1997). *Kantelonevallen met zwaar verkeer op Nederlandse wegen. (Vältolyckor med tunga fordon på holländska vägar)*. TNO, Delft. Internet 2016-01-28: <http://publicaties.minienm.nl/documenten/kantelonevallen-met-zwaar-verkeer-op-nederlandse-wegen>

Johnston, I. R. (1982). *Modifying driver behaviour on rural road curves: A review of recent research*. Proceedings of 11th Australian Road Research Board (ARRB) Conference, 11(4): 115–24.

Kamnik, R., Boettiger, F. & Hunt, K. (2003). *Roll Dynamics and Lateral Load Transfer Estimation in Articulated Heavy Freight Vehicles: A Simulation Study*. Internet

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

2016-02-26: http://users.isy.liu.se/fs/frisk/tmp/iQDrive_Articles/Roll%20dynamics%20and%20lateral%20load%20transfer%20estimation%20in%20articulated%20heavy%20freight%20vehicles.PDF

Kostnader og nytte ved økt vegbredde. (2015). Statens vegvesen. Rapport nr 384. Internet 2016-02-26: <http://www.vegvesen.no/attachment/895572/binary/1035535>

Krammes, R.A., Fitzpatrick, K., Blaschke, J.D. & Fambro, D.B. (1996). *Speed. Understanding Design, Operating and Posted Speed*. Texas Transportation Institute, Report No. 1465-1. Internet 2016-02-26: <http://d2dtl5nnlpr0r.cloudfront.net/tti.tamu.edu/documents/1465-1.pdf>

Krav för vägars och gators utformning (VGU). Trafikverkets publikation 2015:086. Internet 2015-12-03: <http://online4.ineko.se/trafikverket/Product/Category/12443>

Krebs, H. G., Lamm, R., Blumhofer, M. & Schneider, J. (1982). *Beurteilung der Unfallssituation auf Verwindungsstrecken im Bereich ungenügender Längsneigung und auf Strecken mit negativer Querneigung*. Universität Karlsruhe, Institut für Straßenbau und Eisenbahnwesen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 366.

Laws of Motion. Internet 2015-12-01: http://www.physics365.com/blog/?page_id=314

Lay, M.G. (1998). *Handbook of Road Technology*. Vol. 1: 99 pp. and Vol. 2: 705 pp. Sinclair Knight Merz Ltd. Australia.

Leonard, J., Bilse, D., & Recker, W. (1994). *Superelevation rates at rural highway intersections*. Report no. RTA-53P434. Irvine CA: University of California Institute of Transportation Studies.

Lindholm, M. (2002). *Analys av singelolyckor med dödlig utgång på det statliga vägnätet*. Vägverket, publ 2002:109.

Linneas cykelolycka - Olyckskostnader och prioritering av gång- och cykeltrafiken. (2004). Borlänge Energi. Internet 2016-05-10: <https://www.ltdalarna.se/PageFiles/5573/EN%20CYKELOLYCKA.pdf>

Liu, P.J., Rakheja, S. & Ahmed, A.K. (1998). *Dynamic rollover threshold of articulated freight vehicles*. International Journal of Heavy Vehicle Systems. Volume 5, Issue 3-4. Internet 2016-01-28: <http://www.inderscience-online.com/doi/abs/10.1504/IJHVS.1998.054619?journalCode=ijhvs>

Lofthaug, F. (2014). *Veg-geometriens betydning for trafikkulykker*. Norges Teknisk-Naturvitenskaplige Universitet. Internet 2016-01-19: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:746607/FULLTEXT01.pdf>

MacAdam, C.C., Fancher, P.S. & Segel, L. (1985.a). *Side Friction for Superelevation on Horizontal Curves*. The University of Michigan Transportation Research Institute, UMTRI. Volume I: Executive Summary Report. Internet 2016-01-25: http://ntl.bts.gov/lib/55000/55800/55863/FHWA-RD-86-024_SIDE_FRICTION.PDF

MacAdam, C.C., Fancher, P.S. & Segel, L. (1985.b). *Side Friction for Superelevation on Horizontal Curves*. The University of Michigan Transportation Research Institute, UMTRI. Volume II: Final Technical Report. Internet 2016-01-25: <http://deepblue.lib.umich.edu/handle/2027.42/169>

MacAdam, C.C., Fancher, P.S. & Segel, L. (1985.c). *Side Friction for Superelevation on Horizontal Curves*. The University of Michigan Transportation Research Institute, UMTRI. Volume III: Appendices A-G. Internet 2016-01-25: <http://deepblue.lib.umich.edu/handle/2027.42/198>

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

Milliken, P. & de Pont, J. (2005). *The Effect of Cross-Sectional Geometry on Heavy Vehicle Performance and Safety*. Transfund New Zealand Research, Report No. 263. Internet 2015-12-10: <http://www.nzta.govt.nz/assets/resources/research/reports/263/docs/263.pdf>

Mueller, T.H., de Pont, J.J & Baas, P.H. (1999). *Heavy Vehicle Stability versus Crash Rates*. TERNZ report for the New Zealand Land Transport Safety Authority.

Prediction of the Expected Safety Performance of Rural Two-Lane Highways. (2000). US Department of Transportation. Federal Highway Administration Publication FHWA-RD-99-207.

Internet 2015-12-03: <http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/safety/99207/99207.pdf>

Premisser for geometrisk utformning av veger. (2014.a). Statens vegvesen, Vegdirektoratet. Håndbok V120.

Internet 2015-12-03: <http://www.vegvesen.no/attachment/61500/binary/963993>

Quality of Curve – iRAP Road Attribute Risk Factors. (2013).

Internet 2016-01-12: <http://www.irap.org/en/about-irap-3/methodology?download=97:irap-road-attribute-risk-factors-quality-of-curve>

Rajamani, R. (2012). *Vehicle Dynamics and Control*. Mechanical Engineering Series. Springer Science & Business Media.

Report on incident near Svinesund in Østfold County on 5 May 2014. (2015). The Accident Investigation Board Norway, AIBN report ROAD 2015/06. Internet 2016-01-25: <http://www.aibn.no/Road-Traffic/Published-reports/2015-06>

Samhällets kostnader för vägtrafikolyckor. (2009). Myndigheten för samhällsskydd och beredskap. MSB publ. 0047-09.

Internet 2016-02-02: <https://www.msb.se/RibData/Filer/pdf/25604.pdf>

Samhällsekonomiska principer och kalkylvärden för transportsektorn: ASEK 5. Trafikverket. Internet 2016-02-02: <http://www.trafikverket.se/contentassets/f250787d665a41f6ad73f76c95b70c9a/samhallsekonomiska-principer-och-kalkylvar-den-asek-5-remissversion.pdf>

Sankar, S. & Surial, S. (1994). *A Sensitivity Analysis Approach for fast Estimation of Rollover Stability of Heavy Articulated Vehicles during Steady State Turning*. International Journal of Vehicle Design, Volume 1, Issue 3.

Spacek, P. (1987). *Quergefälle in Geraden und Kurven*. Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Straßen- und Eisenbahnbau. Internet 2016-01-10: <https://www.baufachinformation.de/literatur/Quergef%C3%A4lle-in-Geraden-und-Kurven/1989049317175>

Speed Concepts: Informational Guide. (2009). US Department of Transportation, Federal Highway Administration, publication FHWA-SA-10-001.

Internet 2016-01-27: http://safety.fhwa.dot.gov/speedmgt/ref_mats/fhwas10001/fhwas10001.pdf

Standard for drift og vedlikehold av riksveger. (2014.b). Statens vegvesen, Vegdirektoratet. Håndbok R610. Internet 2015-12-03: <http://www.vegvesen.no/attachment/61430/binary/964067>

Superelevation Criteria for Sharp Horizontal Curves on Steep Grades. (2014). NCHRP report 774.

Internet 2015-12-03: http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_774.pdf

The roll stability secret. (2013). Global Trailer Magazine.

Internet 2016-01-27: <http://www.globaltraileromag.com/components/view/the-roll-stability-secret>

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

Tomar, A. S. (2015). *Estimation of Steady State Rollover Threshold for High Capacity Transport Vehicles using RCV Calculation Method*. Chalmers University of Technology. Internet 2016-01-01: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/230725/230725.pdf>

Tracéring i åbent land. (2012). Vejdirektoratet. Internet 2015-12-03: <http://vejregler.lvoportaler.dk/ShowDoc.aspx?schultzlink=vd-anlaeg-vejgeo-tracering#pkt8>

Trafikarbetet i Sverige. (2015). WSP, rapport nr 2015:1018451. Internet 2016-02-02: http://www.wsp-pb.com/Documentsn/pdf/pdf-rapporter/Trafikarbetet%20i%20Sverige%20Rapport_150529.pdf

Truck Rollover Prevention Program. (2011). VicRoads. Internet 2016-01-06: <http://youtu.be/mV9NebHbtus>

Vegbygging. (2014.c). Statens vegvesen, Vegdirektoratet. Håndbok N200. Internet 2015-12-03: http://www.vegvesen.no/_attachment/188382/binary/980128

Veg- og gateutforming. (2014.d). Statens vegvesen, Vegdirektoratet. Håndbok N100. Internet 2015-12-03: http://www.vegvesen.no/_attachment/61414/binary/964095

Vägars och gators utformning (VGU) – begrepp och grundvärden. Trafikverket, publikation 2015:090. Internet 2015-12-03: <http://online4.ineko.se/trafikverket/Product/Category/12443>

Vägars och gators utformning – Krav. Version 2. (2015). Trafikverket, publikation 2015:086. Internet 2016-01-26: <http://online4.ineko.se/trafikverket/Product/Detail/48631>

Vägars och gators utformning – Råd. Version 2. (2015). Trafikverket, publikation 2015:087. Internet 2016-01-26: <http://online4.ineko.se/trafikverket/Product/Detail/48632>

Vägtrafikolyckor 2013. (2014). Trafikanalys, Statistik 2014:8. Internet 2016-02-06: http://trafa.se/globalassets/statistik/vagtrafik/vagtrafikskador/vagtrafikskador_2013.pdf

Vältrisker och säkrare körning med hög tyngdpunkt. (2014). TYA handbok. Internet 2016-01-25: <http://shop.tya.se/detail.asp?cart=446324&user=403502&item=484&page=1&sc=0&ss=v%E4ltrisk>

Vältrisker och säkrare körning med hög tyngdpunkt. (2016). TYA kurs. Internet 2016-01-25: http://www.tya.se/tya-skolan/kurskatalog?view=course&course_id=%7bE1109EC4-394B-E511-99F2-0050569836FB%7d

Whipple, F. J. (1899). *The stability of the motion of a bicycle*. Quarterly Journal of Pure and Applied Mathematics, 30(120):312–321.

Winkler, C. (2000). *Rollover of Heavy Commercial Vehicles*. Internet 2016-01-25: http://www.umtri.umich.edu/content/rr31_4.pdf

Woodrooffe, J., Bereni, M., Germanchev, A., Eady, P., Glaeser, K-P., Jacob, B. & Nordengen, P. (2010). *Safety, Productivity, Infrastructure Wear, Fuel Use and Emissions Assessment of the International Truck Fleet. A Comparative Analysis*. OECD & International Transport Forum. Internet 2016-02-29: <http://www.internationaltransportforum.org/itrc/infrastructure/heavyveh/TruckBenchmarking.pdf>

Yaqub, S. (2014). *Vägparametrar och deras inverkan på trafiksäkerheten. Fallstudie på länsväg 360 Lycksele - Vilhelmina*. Mälardalens Högskola. Internet 2016-01-25: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:692740/FULLTEXT01.pdf>

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL RAPPORT	
Datum: 2016-02-08		
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

[Denna sida är avsiktligt blank]

Uppdragsnr: 10221487	UTFORMNING AV TVÄRFALL	
Datum: 2016-02-08	RAPPORT	
Reviderad: 2016-05-13		
Författare: Johan Granlund	Status: Version 2.0, inkl. cykelbana	

UTFORMNING AV TVÄRFALL FÖR MINSKAD KRÄNGNINGSRISK I KURVA

Transportstyrelsen ska föreskriva om tekniska egenskapskrav för vägar och gator. Föreliggande utredning ska ge underlag för beslut om ett av säkerhetskraven på tvärfall ska vara att "krängningsrisken i kurvor minimeras". Utredningen har genomförts dels genom litteraturstudie av överrisk för olyckor i feldoserade kurvor, dels genom analys av sladdrisk samt vältrisk med hjälp av en fordonsmodell som beaktar tyngdpunktens höjdläge och sidoförskjutning samt inverkan av olika friktion i inre respektive yttre hjulspår. Detta gör analysen relevant även för höga tunga fordon (tung lastbilar med släp samt bussar). Utredningen har även kartlagt förändringar i byggherrekostnad för ökad skevning tvärfall, såväl anläggningskostnad vid nybyggnad som vid asfaltunderhåll. Kurvor är flerfaldigt överrepresenterade i olycksstatistiken. Feldoserade yterkurvor medverkar till de svåraste olyckorna. Tunga lastbilar av typ dragbil med ogynnsamt lastad semitrailer uppvisar högst frekvens bland de extremt dödliga vältolyckorna. Feldoserade kurvor bedöms öka olycksfrekvensen med ca 4 % för varje procentenhet för lite skevning. Jämfört med bilar har tunga fordon betydligt större variation i sidofriktionskraft under hjulen vid kurvtagning, bl.a. till följd av lastbilssläpets krängning. Detta medför att lastbilssläp behöver cirka 10 % högre sidofriktionstal än vad vägreglerna hittills beaktat. Kombinationen av högre tyngdpunkt och högre sidoacceleration (till följd av "bakåtförstärkning") gör att släpfordon regelmässigt välter innan dragbilen eller lastbilen ens börjat lämna från marken. Relevant kriterie vid utformning av skevning är alltså stabilitet hos ogynnsamt lastade tunga semitrailers under körning dels på torr asfalt och dels på våt is, inte kurvtagningskomfort i en personbilsmodell från år 1936 på regnvåt asfalt som i dagens VGU. Idag är 5.5 % max skevning i svenska VGU. Detta gränsvärde bör höjas avsevärt. I specialfallet kurva i nedförsbacke behövs extra hög skevning, upp till 12 %. Utredningen visar höga risker i feldoserade gamla kurvor för både instabilitetsolyckor (singelolyckor samt mötesolyckor där föraren av ena fordonet tappat herraväldet över sitt fordon) samt vältolyckor. För cykelbanor konstateras dels behov av krav på skevning på cykelväg, dels översyn av minimiradier på GC-väg. Nyttokostnadskalkylen visar mycket hög lönsamhet för att öka skevningen i trafikfarligt feldoserade kurvor på alla normala landsvägar.



Civilingenjör Johan Granlund är av IPMA certifierad Senior Project Manager och vägteknisk expert. Johan har arbetat med färdkvalitet och trafiksäker framkomlighet sedan 1991. Johan har uppfunnit två patenterade metoder för mätning av vägegenskaper och lett tre projekt inom EU ROADEx. Johan är sekreterare för svenska avdelningen inom Nordiskt Vägforums utskott «Fordon och Transporter». På uppdrag av Statens Havarikommisjon for Transport har Johan medverkat i utredning av vältolycksproblematiken för lastbilsekipage och i samband med detta granskat valda delar av anvisningar för vägutformning i Norge och Sverige, samt hur krav i dessa harmonierar med andra vägregler så som för drift och underhåll. Johan medverkar i standardiseringsarbetet inom både vägens egenskaper och vibrationers inverkan på människan. Johan är lärare i Asfaltskolan och vid flera universitet, är eftersökt föredragshållare och har skrivit artiklar i internationella vetenskapliga tidskrifter i så väl fordons- som väg- och flygfältsteknologi.