



Transportøkonomisk institutt
Stiftelsen Norsk senter for samferdselsforskning

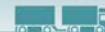
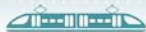


Vegers linjeføring og trafikksikkerhet

En kunnskapsoppsummering

Rune Elvik

1933/2023



Tittel:	Vegers linjeføring og trafiksikkerhet - En kunnskapsoppsummering
Tittel engelsk:	Road alignment and road safety - A synthesis of knowledge
Forfatter:	Rune Elvik
Dato:	05.2023
TØI-rapport:	1933/2023
Antall sider:	45
ISSN elektronisk:	2535-5104
ISBN elektronisk:	978-82-480-1990-9
Finansieringskilder:	Samferdselsdepartementet og Statens vegvesen
TØIs p.nr.:	1175 – Revisjon av Trafiksikkerhetshåndboka
Prosjektleder:	Alena Katharina Høye
Kvalitetsansvarlig:	Alena Katharina Høye
Fagfelt:	Sikkerhet og resiliens
Emneord:	Linjeføring, trafiksikkerhet, kunnskapsoppsummering, ulykkesmodeller

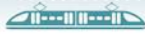
Kort sammendrag

Studier av sammenhengen mellom vegers linjeføring og trafiksikkerhet er oppsummert. Det er ikke mulig å oppsummere studiene ved å bruke vanlige metoder for metaanalyse. Resultatene av ulike studier er oppsummert ved å angi medianresultater. Sammenhengen mellom ulike aspekter ved linjeføring og ulykkestall er vist i form av funksjoner så langt dette er mulig. Trafiksikkerheten påvirkes av mange aspekter ved vegens linjeføring som har en sterk innbyrdes sammenheng med hverandre.

Summary

The results of studies of the relationship between road alignment and road safety have been summarized. It was not possible to apply meta-analysis to summarise study findings. Findings are represented by means of the median results of sets of studies. The relationship between specific alignment parameters and accidents is shown by means of functional relationships when this is possible. The number of accidents is influenced by many alignment parameters that tend to be correlated.

Transportøkonomisk institutt (TØI) har opphavsrett til hele rapporten og dens enkelte deler. Innholdet kan brukes som underlagsmateriale. Når rapporten siteres eller omtales, skal TØI oppgis som kilde med navn og rapportnummer. Rapporten kan ikke endres. Ved eventuell annen bruk må forhåndssamtykke fra TØI innhentes. For øvrig gjelder [Åndsverklovens](#) bestemmelser.



Forord

Som ledd i revisjonen av Trafikksikkerhetshåndboken utarbeides det noen ganger TØI-rapporter som supplerer og utdyper Trafikksikkerhetshåndboken. Disse rapportene er utvidede versjoner av de tiltakskapitler de dekker.

Denne rapporten handler om vegers linjeføring og trafikksikkerhet. Linjeføring er et komplisert element ved en vegs utforming, fordi det omfatter mange aspekter som henger tett sammen med hverandre. Endrer man ett av elementene, for eksempel, radius i en horisontalkurve, får det konsekvenser for flere andre elementer. En slakere kurve er lengre enn en krapp kurve ved samme retningsendring, og lengden av de rette strekningene mellom kurver endres dermed også. I tillegg kan, for eksempel, kravet til overhøyde i en kurve og lengden på overgangskurver bli endret dersom radius endres. Det er vanskelig å fange opp slike kombinerte virkninger på en god måte.

Ved utvalg og gjennomgang av relevante studier er derfor kun studier som benytter multivariate analyseteknikker og omfatter minst to aspekter ved linjeføring valgt ut. Det betyr at studiene i det minste må kontrollere for ett annet, helst flere andre, aspekter ved linjeføring når man studerer sammenhengen mellom ett bestemt element og antall ulykker. De aller fleste studier som er inkludert, er multivariate ulykkesmodeller som er føyd med ulike varianter av negativ binomial regresjonsanalyse.

Resultatene av disse studiene kan ikke oppsummeres ved hjelp av vanlige teknikker for metaanalyse. I stedet er resultatene av hver undersøkelse, om mulig, uttrykt i form av en funksjonssammenheng mellom et bestemt linjeføringselement og antall ulykker. Disse funksjonene er så veid sammen til en «oppsummert» funksjon ved å bygge på medianverdier fra de funksjoner som inngår.

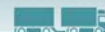
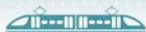
Rapporten er skrevet av Rune Elvik. Alena Katharina Høye har kvalitetssikret rapporten. Trude Kvalsvik har sluttredigert rapporten og publisert den elektronisk.

Oslo, mai 2023

Transportøkonomisk institutt

Bjørne Grimsrud
Administrerende direktør

Trine Dale
Avdelingsleder

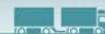
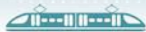


Innhold

Sammendrag

Summary

1	Bakgrunn og problemstilling	1
1.1	Bakgrunn	1
1.2	Problemstillinger	1
1.3	Tidligere studier	1
2	Kriterier for valg av studier	2
2.1	Multivariate modeller	2
2.2	Oppsummering av resultater	2
3	Utrekning av resultater fra hver undersøkelse	5
3.1	Ulike måter å trekke ut resultater på	5
3.2	En tilnæringsmodell for avbøyningsvinkel.....	6
3.3	Relevante variabler og verdier av disse	7
4	Sammenveiging av resultater	9
4.1	Diagnostiske verktøy uten statistiske vekter	9
4.2	Medianverdi som representativt resultat.....	10
5	Resultater	12
5.1	Horisontalkurveradius.....	12
5.2	Horisontalkurvers avbøyningsvinkel.....	13
5.3	Horisontalkurvers lengde.....	14
5.4	Overhøyde i horisontalkurver	15
5.5	Forekomst og lengde av overgangskurve	16
5.6	Lengde av rett strekning før kurve.....	17
5.7	Radius i nabokurver	18
5.8	Antall kurver før en gitt kurve.....	18
5.9	Stigning eller fall før kurve	19
5.10	Horisontalkurve i høybrekk og lavbrekk	19
5.11	Endring av stigning i høybrekk eller lavbrekk	20
5.12	Stigning generelt (absoluttverdi)	21
5.13	Stigningslengde	23
5.14	Siktlengde generelt	24
5.15	Stopsiktlengde i høybrekk.....	25
6	En norsk ulykkesmodell	26
6.1	Fordeling av ulykker mellom kurver	26
6.2	Beskrivelse av variabler inkludert i ulykkesmodeller.....	26
6.3	Resultater i beregnede ulykkesmodeller	27



7	Sammensatte mål på linjeføring – linjeføringsklasser	30
8	Diskusjon og konklusjoner	37
8.1	Metoder for kunnskapsoppsummering	37
8.2	Usikkerhet i resultatene.....	39
8.3	Betraktninger om anvendelse av resultatene.....	40
	Referanser	42

Vegers linjeføring og trafikksikkerhet

En kunnskapsoppsummering

TØI rapport 1933/2023 • Forfatter: Rune Elvik • Oslo 2023 • 45 sider

Rapporten oppsummerer studier av sammenhengen mellom vegers linjeføring og ulykkestall. Oppsummeringen bygger kun på studier som har benyttet multivariate metoder og har inkludert minst to aspekter ved linjeføring. Resultater som gjelder et bestemt linjeføringselement er, så langt mulig, vist i form av en funksjonssammenheng mellom vedkommende linjeføringselement og antall ulykker. Kunnskapsoppsummeringen omfatter 15 ulike linjeføringselementer. Alle disse har sammenheng med ulykkestall. Horisontale linjeføringselementer (kurver) er bedre studert enn vertikale (bakker) og synes å ha sterkere sammenheng med ulykkestall enn vertikale linjeføringselementer.

Vegers linjeføring er en svært kompleks side ved deres utforming. Linjeføring omfatter mange elementer som henger sammen med hverandre i den forstand at dersom ett av dem endres, får det konsekvenser for flere andre som også endres. Det er ikke mulig å endre ett bestemt linjeføringselement uten at andre også endres. Likevel har forskningen om linjeføring og trafikksikkerhet ofte fokusert på ett og ett element. I denne rapporten er kunnskap om sammenheng mellom vegers linjeføring og trafikksikkerhet oppsummert. Kunnskapsoppsummeringen bygger kun på multivariate studier der minst to linjeføringselementer inngår. Nesten alle disse studiene er ulykkesmodeller som er utviklet ved hjelp av negativ binomial regresjon.

Linjeføringselementer som inngår

Følgende linjeføringselementer inngår i kunnskapsoppsummeringen:

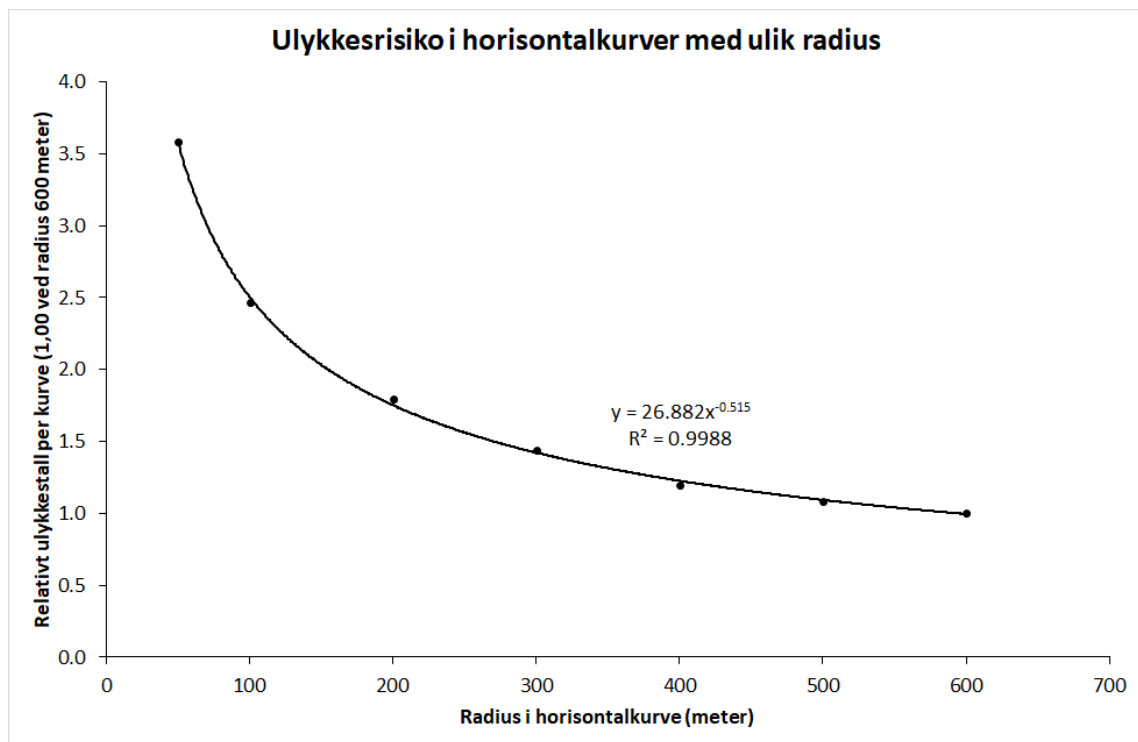
1. Horisontalkurveradius
2. Horisontalkurvers avbøyningsvinkel
3. Horisontalkurvers lengde
4. Overhøyde i horisontalkurver
5. Variasjon i overhøyde i kurver
6. Forekomst og lengde av overgangskurver (klotoider)
7. Lengde av rett strekning før kurve
8. Radius i nabokurver
9. Antall kurver før en gitt kurve
10. Stigning eller fall før horisontalkurve
11. Horisontalkurve i høybrekk eller lavbrekk
12. Endring av stigning i høybrekk eller lavbrekk
13. Stigning generelt (absoluttverdi)
14. Stigningers lengde

15. Sikt lengde generelt
16. Stoppsikt i høybrekkskurver

Ingen studier har inkludert alle disse linjeføringselementene og få studier har inkludert mer enn tre av dem.

Funksjonssammenhenger

Sammenhengen mellom hvert linjeføringselement og antall ulykker er, så langt mulig, uttrykt i form av en funksjonssammenheng. Figur S.1 viser et eksempel på en slik sammenheng.



Figur S.1: Sammenheng mellom horisontalkurveradius og ulykkestall.

Figuren viser sammenhengen mellom radius i horisontalkurver og relativt ulykkestall. Ulykkestallet er satt lik 1 ved en radius på 600 meter. Relativt ulykkestall ved en radius på 50 meter er 3,58. Dette er medianverdien av anslagene på relativt ulykkestall i de undersøkelser som inngår. Medianverdien betyr at halvparten av anslagene på relativ risiko viser høyere verdier, halvparten viser lavere.

Sammenhengen mellom linjeføringselementer og ulykkestall

Tabell S.1 oppsummerer anslag på relativ ulykkesrisiko knyttet til ulike linjeføringselementer.

Tabell S.1: Betydningen av linjeføringselementer for antall ulykker. Relative ulykkestall.

Linjeføringselement	Gunstigste verdi	Relativt ulykkestall	Minst gunstige verdi	Relativt ulykkestall
Horisontalkurveradius	600 m	1,00	50 m	3,58
Horisontalkurvers avbøyningsvinkel	30 grader	1,00	100 grader	2,52
Horisontalkurvers lengde	50 m	1,00	600 m	5,86
Overhøyde i horisontalkurver (#)	10 %	1,00	0 %	1,21
Variasjon i overhøyde i horisontalkurver (#)	0 %	1,00	10 %	1,21
Forekomst av overgangskurve (#)	Ja	1,00	Nei	1,12
Økning av lengde på overgangskurve (#)	10 m	1,00	0 m	1,02
Lengde av rett strekning før kurve	0,1 km	1,00	1,0 km	1,38
Radius i nabokurver	50 m	1,00	600 m	1,11
Antall kurver før en gitt kurve (#)	5	1,00	0	1,41
Stigning før horisontalkurve (#)	0 %	1,00	1 %	1,45
Fall før horisontalkurve (#)	0 %	1,00	1 %	1,56
Horisontalkurve i høybrekk	Nei	1,00	Ja	1,91
Horisontalkurve i lavbrekk	Nei	1,00	Ja	2,08
Stigning generelt (absoluttverdi)	0 %	1,00	7 %	1,30
Stigningers lengde	0,1 km	1,00	1,0 km	8,72
Siktlengde generelt	227 m	1,00	45 m	1,58
Stoppstikkrav ved høybrekkskurver	Oppfylt	1,00	For kort	1,99

(#) Dette resultatet bygger på en norsk undersøkelse

Sammensatte mål på linjeføring – linjeføringsklasser

I en del studier er vegnettet delt inn i linjeføringsklasser på grunnlag av horisontal og vertikal linjeføring. En inndeling i tre klasser er mest vanlig. En oppsummering av resultater av disse undersøkelsene viser i gjennomsnitt at ulykkesrisikoen kan reduseres med 15 % ved å gå fra laveste til mellomste linjeføringsklasse, med 17 % ved å gå fra mellomste til høyeste linjeføringsklasse og med 28 % ved å gå fra laveste til høyeste linjeføringsklasse.

Road alignment and road safety

A synthesis of knowledge

TØI Report 1933/2023 • Author: Rune Elvik • Oslo 2023 • 45 pages

This report summarises knowledge about the relationship between road alignment and road safety. This relationship is complex, because alignment is a multidimensional design element. In general, if one element of alignment is changed, this will result in changes in other elements. The summary of knowledge is based on studies that developed multivariate accident prediction models including at least two elements of alignment. Whenever possible, the relationship between an element of alignment and the number of accidents has been expressed as a functional relationship. A total of 15 elements of alignment were included.

The alignment of a road defines its curvature in space. A distinction is normally made between horizontal and vertical alignment. There is much more research about horizontal alignment than about vertical alignment. Although elements of alignment are closely related to each other, most research has focused on a single or a few elements of alignment. This study aimed at summarising knowledge for as many elements of alignment as possible.

Alignment parameters included in study

The following alignment parameters have been included:

1. Radius of horizontal curves
2. Deflection angle of horizontal curves
3. Length of horizontal curves
4. Super-elevation in horizontal curves
5. Variation of super-elevation in horizontal curves
6. Existence and length of spiral transition curves
7. Length of straight section ahead of a horizontal curve
8. Radius of neighbouring curves
9. Number of neighbouring curves
10. Vertical grade ahead of a horizontal curve
11. Horizontal curves located in crest or sag vertical curves
12. Algebraic difference in vertical grades
13. Vertical grades in general (absolute grade)
14. Length of vertical grades
15. Sight distance
16. Stop sight distance at crest vertical curves

Most studies focus on just one or two of these elements and very few studies have included more than three.

Functional relationships

The relationship between each alignment parameter and the number of accidents has been summarised as a functional relationship whenever possible. An example of such a relationship is shown in Figure S.1.

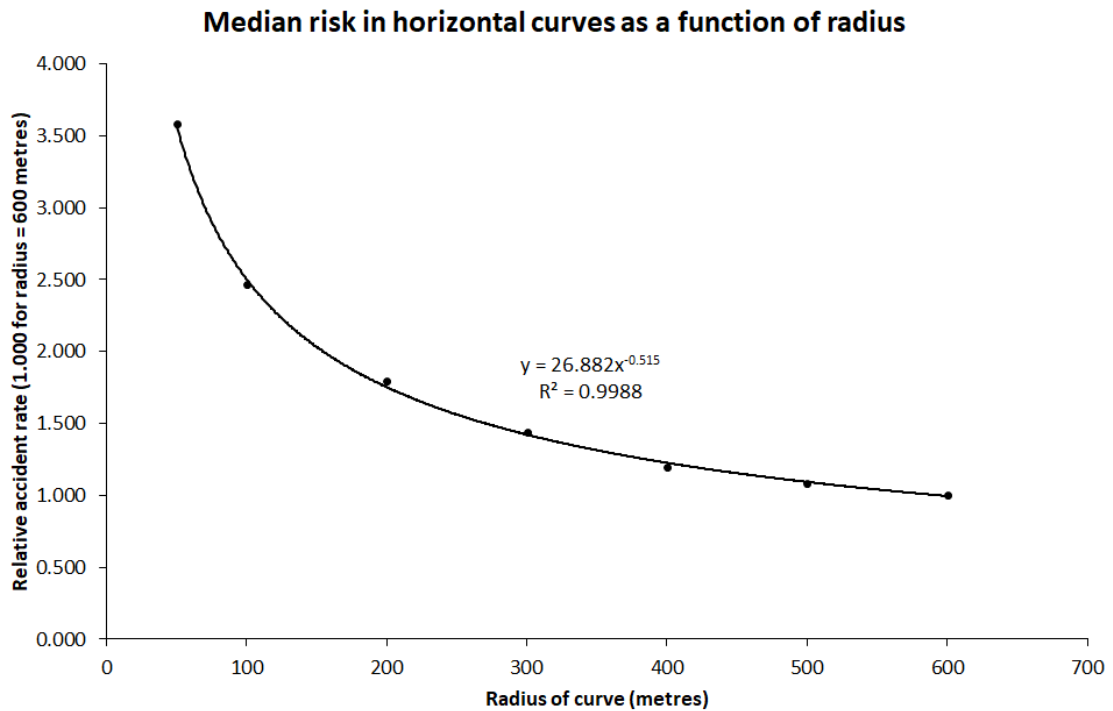


Figure S.1: Relationship between horizontal curve radius and the relative number of accidents.

The functional relationship shown in figure S.1 is based on 46 functional relationships derived from the primary studies. It shows the median values of relative risk estimated in these studies. The median value is representative, in that half of estimates show a smaller increase in risk, half show a larger increase in risk.

Risks associated with alignment parameters

Table S.1 shows the relative risks associated with each alignment parameter included in the study.

Table S.1: Risks associated with alignment parameters.

Alignment parameter	Safest value	Relative number of accidents	Least safe value	Relative number of accidents
Radius of horizontal curve	600 m	1.00	50 m	3.58
Deflection angle of horizontal curve	30 degrees	1.00	100 degrees	2.52
Length of horizontal curve	50 m	1.00	600 m	5.86
Super-elevation in horizontal curve (#)	10 %	1.00	0 %	1.21
Variation of super-elevation in curve (#)	0 %	1.00	10 %	1.21
Existence of spiral transition curve (#)	Yes	1.00	No	1.12
Increasing length of spiral transition curve (#)	10 m	1.00	0 m	1.02
Length of straight section ahead of curve	0.1 km	1.00	1.0 km	1.38
Radius of neighbouring curve	50 m	1.00	600 m	1.11
Number of curves ahead of a curve (#)	5	1.00	0	1.41
Upward grade before horizontal curve (#)	0 %	1.00	1 %	1.45
Downward grade before horizontal curve (#)	0 %	1.00	1 %	1.56
Horizontal curve in crest vertical curve	No	1.00	Yes	1.91
Horizontal curve in sag vertical curve	No	1.00	Yes	2.08
Vertical grade in general (absolute value)	0 %	1.00	7 %	1.30
Length of vertical grade	0.1 km	1.00	1.0 km	8.72
Sight distance	227 m	1.00	45 m	1.58
Stop sight in crest vertical curves	Adequate	1.00	Too short	1.99

(#) This result is based on a Norwegian study

Compound measures of alignment – alignment classes and design consistency

In some studies, roads have been classified according to the quality of their alignment. The most common classification uses three classes: poor, medium and good. A summary of studies using this classification found that by going from poor to medium, accident rate can, on the average, be reduced by 15 %. Going from medium to good may reduce accident rate by 17 %. Going from poor to good may reduce accident rate by 28 %.

1 Bakgrunn og problemstilling

1.1 Bakgrunn

Sammenhengen mellom vegers linjeføring og trafiksikkerhet er et komplisert tema som har vært studert i lang tid. Utvikling av ulykkesmodeller de siste 20-30 årene har gjort det mulig å studere flere sider av vegers linjeføring i sammenheng med hverandre enn tidligere, da mange studier ofte studerte bare ett eller et fåtall aspekter ved linjeføring. Eksempelvis vet vi i dag at ulykkesrisikoen i en horisontalkurve avhenger ikke bare av kurvens radius, som var noe av det første man studerte, men også av om radius er konstant eller varierer gjennom kurven, kurvens lengde, om den ligger på flat veg eller i en stigning, om den har en overgangskurve eller ikke, avstanden til en nabokurve, overhøyden gjennom kurven og variasjon i denne, samt muligens andre faktorer (Elvik 2017). Få, om noen studier, har inkludert alle disse faktorene, men det finnes etter hvert en del studier som har inkludert noen av dem.

Det er imidlertid krevende å oppsummere disse studiene på en god måte. Ulike studier har inkludert ulike faktorer og benyttet ulike statistiske modeller i analyser. Man kan ikke uten videre forutsette at resultatene av ulike undersøkelser er sammenlignbare og kan vektas sammen statistisk (Card 2012). Det er følgelig behov for at man først skaffer en oversikt over hvilke studier som finnes og hvilke metoder disse har brukt. På grunnlag av dette kan det vurderes hvilke studier som har så mye til felles at det gir mening å oppsummere resultatene av dem formelt ved hjelp av metaanalyse.

1.2 Problemstillinger

De viktigste spørsmålene som tas opp i denne rapporten er:

1. Hvilke linjeførings-elementer har vært studert med tanke på deres betydning for trafiksikkerheten? Hvilke resultater har ulike undersøkelser kommet til?
2. Hvor god er den metodiske kvaliteten på undersøkelser om linjeføring og trafiksikkerhet? Hvilke felles elementer bør undersøkelser ha for at det skal være forsvarlig å kombinere resultatene av dem tallmessig i form av metaanalyse?
3. Hvordan kan resultater av undersøkelser om linjeføring og trafiksikkerhet best oppsummeres? Kan vanlige metoder for metaanalyse benyttes?
4. Hvordan henger ulike aspekter ved linjeføring sammen med ulykkesrisikoen i horisontalkurver?

1.3 Tidligere studier

Rapporten tar utgangspunkt i artikler der studier av linjeføring er drøftet (Elvik 2013, 2016, 2017, 2019, 2022), samt to kapitler i Trafiksikkerhetshåndboken: 1.13, vegers linjeføring, og 1.17, tiltak i horisontalkurver. Det er i tillegg gjort litteratursøk i Google Scholar og Scencedirect.

2 Kriterier for valg av studier

2.1 Multivariate modeller

Ulike aspekter ved linjeføring påvirker sammen antall ulykker. For å kunne identifisere hvilken betydning en bestemt egenskap ved linjeføring har for antall ulykker, er det derfor viktig at man kontrollerer for flest mulig andre egenskaper ved linjeføring. Eksempelvis er økningen i antall ulykker knyttet til mindre radius i kurver avhengig både av hvor lang rett strekning det er foran kurven og av hvor lang selve kurven er. Vet man ikke dette, er det vanskelig å tolke resultatene av en undersøkelse.

I denne kunnskapsoppsummeringen inngår derfor kun studier som har benyttet en multivariat metode, det vil si studier som inkluderer minst to aspekter ved linjeføring, slik at man i det minste kan kontrollere for ett annet aspekt enn det studien primært handler om. Studiene som inngår har, med et par unntak, føyd ulykkesmodeller til data ved hjelp av negativ binomial regresjon. Det varierer hvor mange variabler studiene har inkludert. Definisjoner av variablene varierer også. Ulike variabeldefinisjoner er ikke noe problem dersom de kan omregnes til samme definisjon. Eksempelvis kan fot, som ofte brukes i amerikanske studier, omregnes til meter (1 fot = 0,3048 meter). En annen ofte brukt variabel i amerikanske studier, «degree of curve» (kan oversettes som kurvens krapphet), kan omregnes til kurveradius i meter (Hauer 1999).

2.2 Oppsummering av resultater

I metaanalyse tilordnes hvert resultat en statistisk vekt som er omvendt proporsjonal med usikkerheten i resultatet. Jo mer usikkert et resultat er, desto mindre vekt tillegges det. I multivariate modeller er resultatene beregnede regresjonskoeffisienter. Usikkerheten i disse vises av standardfeilen. Dessverre oppgir ikke alle undersøkelser standardfeilen til hver regresjonskoeffisient. Dessuten er verdiene av koeffisienter som gjelder ulikt definerte variabler ikke sammenlignbare. Dermed er standardfeilene til koeffisientene heller ikke sammenlignbare. Et eksempel kan vise dette.

Saleem og Persaud (2017) utviklet ulike ulykkesmodeller for horisontalkurver. I en av modellene var koeffisienten for kurveradius, angitt som den naturlige logaritmen til radius i meter, angitt til -0,5175 med standardfeil 0,0549. Gooch, Gayah og Donnell (2018) utviklet en modell der «degree of curve» ble brukt, med koeffisient 0,062 og standardfeil 0,003. Hvis man bare bruker standardfeil direkte til å beregne statistisk vekt, får man i disse eksemplene:

$$\text{Saleem og Persaud: } \frac{1}{0,0549^2} = 331,78; \text{ Gooch, Gayah og Donnell: } \frac{1}{0,003^2} = 111111,11$$

Undersøkelsen til Gooch, Gayah og Donnell får kolossalt mye større statistisk vekt enn undersøkelsen til Saleem og Persaud. Men ser vi på relativ usikkerhet i koeffisientene, er ikke undersøkelsene så ulike:

$$\text{Relativ usikkerhet} = 0,0549/0,5175 = 0,106 \text{ og } 0,003/0,062 = 0,048$$

Den relative usikkerheten hos Saleem og Persaud er bare litt over dobbelt så stor som hos Gooch, Gayah og Donnell. Dette tilsier at den statistiske vekten til Gooch, Gayah og Donnell bør være omkring dobbelt så stor som til Saleem og Persaud. Men den beregnede statistiske vekten til Gooch, Gayah og Donnell, basert på standardfeilen, er 335 ganger så stor som den statistiske vekten til Saleem og Persaud.

Forklaringen på dette er at både koeffisienter og statistiske vekter avhenger av variabeldefinisjoner. Man får ulike verdier alt ettersom kurveradius inngår som radius i kilometer, radius i meter, naturlig logaritme til radius i meter, radius i fot, eller degree of curve. Koeffisientene og standardfeilene er ikke sammenlignbare og kan ikke konverteres til en felles skala. Det er derfor ikke gjort noe forsøk på å beregne statistiske vekter for hver undersøkelse.

Resultatene av ulike undersøkelser er oppsummert på følgende måte: For hver undersøkelse er koeffisienten for en bestemt variabel brukt til å beregne en kurve som viser hvordan vedkommende variabel påvirker antall ulykker i kurver. Eksempelvis er koeffisienten for kurvens lengde i en av modellene til Saleem og Persaud (2017) 0,9783. Denne koeffisienten gjelder den naturlige logaritmen til kurvelengde i meter. Ved hjelp av koeffisienten, kan man regne ut et predikert ulykkestall for enhver kurvelengde. Her følger et eksempel hvor dette er beregnet for kurver med lengde mellom 100 meter og 1000 meter.

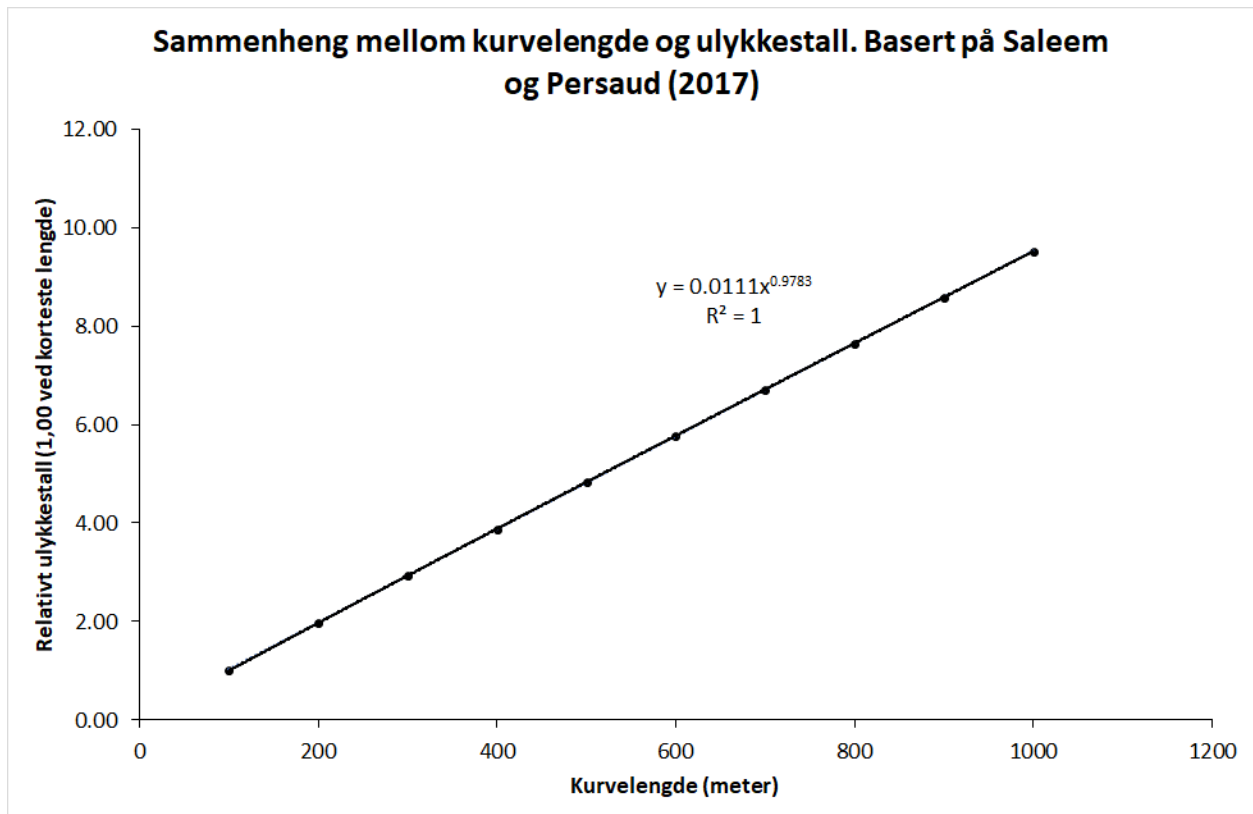
For en kurve med lengde 100 meter blir beregnet ulykkestall: $e^{(0.9783 \cdot \ln(100))} = 90,49$

Det predikerte ulykkestallet er ikke reelt, siden de øvrige variabler i modellen (medregnet konstantleddet) ikke er inkludert. Koeffisienten for kurvelengde viser imidlertid hvordan relativt ulykkestall varierer med ulik kurvelengde. Dette er beregnet slik:

Lengde	Relativt ulykkestall	Beregnet ulykkestall
100	1,00	90,49
200	1,97	178,28
300	2,93	265,07
400	3,88	351,23
500	4,83	436,92
600	5,77	522,23
700	6,71	607,24
800	7,65	691,98
900	8,58	776,49
1000	9,51	860,80

Relativt ulykkestall settes lik 1,00 ved korteste kurvelengde. I dette tilfellet øker relativt ulykkestall nesten proporsjonalt med kurvelengden. En grafisk framstilling av sammenhengen er vist i figur 2.1. En potensfunksjon passer data perfekt, slik man kan vente ut fra variabelnes definisjon.

For hver undersøkelse, og hver linjeføringsparameter, er resultater trukket ut på denne måten. I neste kapittel sammenlignes ulike måter å tolke undersøkelser på og det vises hvordan ulike tolkninger gir ulike resultater. Deretter begrunnes hvorfor koeffisientene til de enkelte variabler er brukt som grunnlag for å trekke ut resultater av hver undersøkelse. Et unntak fra denne regelen er gjort for kurvers avbøyningsvinkel.



Figur 2.1: Sammenheng mellom kurvelengde og relativt ulykkestall. Basert på Saleem og Persaud (2017).

3 Uttrekning av resultater fra hver undersøkelse

3.1 Ulike måter å trekke ut resultater på

Resultater av multivariate undersøkelser kan trekkes ut på ulike måter. Disse gir ikke nødvendigvis samme resultater. En undersøkelse av Bil mfl. (2018) kan brukes som eksempel på dette. De utviklet en ulykkesmodell for horisontalkurver av følgende form:

$$\text{Antall ulykker} = e^{\beta_1 + \beta_2 \left(\frac{L}{R}\right)} AADT^{\beta_3} L^{\beta_4} R^{\beta_5} \quad (1)$$

Her er β_1 konstantledd. L er kurvens lengde i meter, R er radius i meter, og AADT er trafikkmengde. L/R er forholdet mellom lengde og radius; ved en gitt radius betyr økende verdi av L/R økende avbøyningsvinkel. I en anvendelse av modellen forutsatte Elvik (2019) at L = R, slik at L/R kan settes lik 1.

Koeffisientene i modellen ble beregnet til følgende: $\beta_1 = -10,10$; $\beta_2 = 0,78$; $\beta_3 = 0,88$; $\beta_4 = -0,15$; $\beta_5 = 0,32$. Ved hjelp av disse koeffisientene kan man regne ut et predikert ulykkestall i kurver med ulike kjennetegn. Ved anvendelse av modellen i 2019 (Elvik 2019) ble dette gjort ved at trafikkmengden ble satt lik 2000 og L/R satt lik 1. Dette innebar at L og R økte parallelt med hverandre L = 100 R = 100; L = 200 R = 200, og så videre. Tre mål på sikkerheten i kurver kan beregnes:

1. Antall ulykker per kurve, for kurver med radius 50, 100, 200 meter, osv. Disse kurvene vil også ha lengde 50, 100, 200 meter osv. (metode 1)
2. Antall ulykker per million kjøretøykilometer i kurver med ulik radius og lengde (metode 2).
3. Antall ulykker per kurve som følge av at radius alene varierer og alt annet holdes konstant (metode 3).

Disse tre måtene å angi sikkerheten på gir følgende mål på relativ sikkerhet når kurveradius varierer (relativt ulykkestall eller ulykkesrisiko settes lik 1,00 ved radius 600 meter) (se tabell 3.1).

Tabell 3.1: Resultater av ulike måter å trekke ut resultater fra Bil mfl. (2018) på.

Kurveradius (m)	Relativt ulykkestall (metode 1)	Relativt ulykkestall (metode 2)	Relativt ulykkestall (metode 3)
50	0,655	7,865	0,452
100	0,737	4,425	0,564
200	0,830	2,489	0,704
300	0,889	1,778	0,801
400	0,933	1,400	0,878
500	0,969	1,163	0,943
600	1,000	1,000	1,000

Dersom man beregner predikert ulykkestall per kurve (metode 1), øker dette med økende kurveradius. Forklaringen på dette er at kurvens lengde er forutsatt å øke proporsjonalt med radius. Koeffisienten for radius er positiv (0,32) og gir et større bidrag til predikert ulykkestall enn koeffisienten for lengde, som er negativ (-0,15). De to koeffisientene kan sammenlignes direkte, siden alle kurver er forutsatt å ha samme lengde som radius. Summen av dem er positiv.

Regner man derimot antall ulykker per million kjøretøykilometer i hver kurve (metode 2), får kurvene med minst radius høyest risiko. Forklaringen på dette, er disse kurvene under de valgte forutsetninger er de korteste. Trafikkarbeidet blir dermed, alt annet likt, minst i de korteste kurvene.

I metode 3 er koeffisienten for kurveradius anvendt direkte og det er sett bort fra alle andre variabler. Ulykkestall i kurver med ulik radius er beregnet ved å opphøye radius i koeffisienten. Kurver med størst radius blir da de sikreste.

Metode 3 er den enkleste og anvender kun koeffisienten for kurveradius. Men den gir strengt tatt ikke korrekte anslag på hvordan sikkerheten i kurver varierer som funksjon av radius. Grunnen til det, er at verdien av L/R , alt annet likt, også vil variere når kurveradius varierer. Hvis vi holder L konstant, blir verdien av L/R halvert når kurveradius øker fra 50 til 100 meter. Ved kun å bruke koeffisienten for kurveradius, tas det ikke hensyn til dette. Koeffisienten for L/R burde også inngå.

I undersøkelser som inneholder både en variabel for radius (R) og en samspillsvariabel mellom radius og en annen variabel, er variasjonen i risiko med kurveradius beregnet med metode 2. I andre undersøkelser er derimot koeffisienten for radius benyttet direkte og alt annet er holdt konstant.

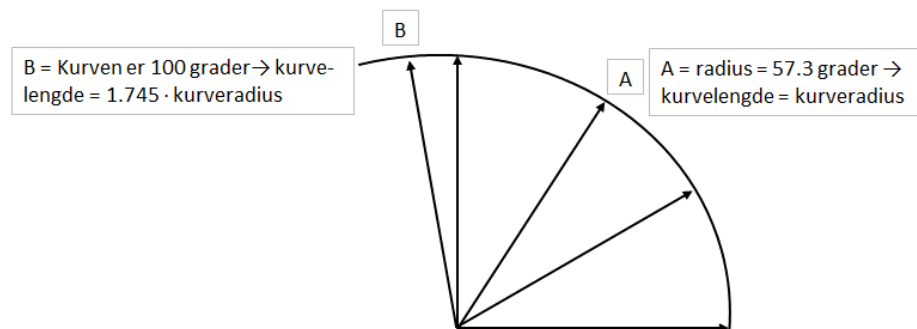
Begrunnelsen for dette, er at det varierer fra undersøkelse til undersøkelse hvilke andre variabler som inngår i modellene. I undersøkelsen til Bil mfl. (2018) inngikk forholdstallet L/R . Dermed kan man kontrollere for endringer i dette som funksjon av at kurvens radius, men ikke dens lengde, endrer seg. I andre modeller inngår ikke variabelen L/R . Det er da ikke mulig å kontrollere for endringer i verdien av L/R når man beregner virkningen av kurveradius. Kurvers lengde, L , inngår i mange modeller, men koeffisienten for L er ikke nødvendigvis lik koeffisienten for L/R . Man kan heller ikke estimere den ved ta koeffisienten for L og dividere med koeffisienten for R .

Strengt tatt burde man for hver variabel som inngår i en ulykkesmodell definere et sett av verdier. Så burde predikerte verdier beregnes for alle logisk mulige kombinasjoner av verdier på variablene som inngår i modellen. Deretter burde mønsteret i disse predikerte verdier analyseres og marginale effekter av hver variabel identifiseres. I praksis er dette uoverkommelig, men multivariate ulykkesmodeller oppfyller tilnærmet en slik funksjon. Hver koeffisient i en multivariat modell viser «virkningen» av den enkelte variabel, kontrollert for alle andre variabler i modellen. Så får vi heller godta at resultatene kan bli litt feilaktige når noen av de variabler som inngår i en ulykkesmodell er definert ved hjelp av andre variabler, slik tilfellet er for L/R .

3.2 En tilnæringsmodell for avbøyningsvinkel

Ved en gitt radius, betyr økende kurvelengde at kurvens avbøyningsvinkel øker. Dette kan vises ved en figur (se figur 3.1).

Kurvens radius er angitt ved en pil. Ved å rotere denne mot urviseren avtegnes deler av en sirkel. I punktet A er lengden av sirkelbuen lik radius det vil si at kurven har en vinkel på 57,3 grader. Hvis man fortsetter rotasjonen mot venstre, vil sirkelbuen avtegne kurver med økende avbøyningsvinkel. I punktet B er avbøyningsvinkelen 100 grader. Kurvens lengde er da lik 1,745 ganger radius.



Figur 3.1: Økende kurvelengde ved en gitt kurveradius betyr økende avbøyningsvinkel.

I studier der avbøyningsvinkel ikke er målt direkte ved L/R, er tilnærmingen over benyttet for å beregne sammenhengen mellom avbøyningsvinkel og ulykkestall. Radius er da satt lik 300 meter og kurvens lengde, L, variert slik at man får avbøyningsvinkler mellom 30 grader og 100 grader.

3.3 Relevante variabler og verdier av disse

Linjeføring omfatter mange variabler og samspillet mellom dem. Ved oppsummering av kunnskap fra flere undersøkelser, er de aspekter ved linjeføring som er nevnt i tabell 3.2 inkludert.

Det er valgt å beregne funksjoner for et utvalgt antall verdier på hver linjeføringsvariabel. Valgene som er gjort, kan begrunnes slik.

Tabell 3.2: Egenskaper ved vegers linjeføring som inngår i kunnskapsoppsummeringen.

Variabel	Måleenhet	Verdier som er inkludert
Horisontalkurveradius	Meter	50, 100, 200, 300, 400, 500, 600
Horisontalkurvers avbøyningsvinkel	Grader	30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100
Horisontalkurvers lengde	Meter	50, 100, 200, 300, 400, 500, 600
Overhøyde i horisontalkurver	Prosent	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
Forekomst og lengde av overgangskurve	Ja/nei, meter	Ja eller nei; lengde 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60
Lengde av rettstrekning før kurve	Meter	100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000
Radius i nabokurver	Meter	50, 100, 200, 300, 400, 500, 600
Antall kurver før en gitt kurve	Antall	0, 1, 2, 3, 4, 5
Stigning eller fall før kurve	Prosent	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7
Horisontalkurve i høybrekk eller lavbrekk	Ja eller nei	Ja hvis høybrekk eller lavbrekk
Endring av stigning i høybrekk eller lavbrekk	Prosent	Fra +7 til -7 = 14 prosent
Stigning generelt (absoluttverdi)	Prosent	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7
Stigningslengde	Meter	100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000
Sikt lengde	Meter	45, 65, 105, 115, 150, 227
Stopsikt lengde i høybrekkskurver	Kritisk verdi	Over eller under minste stopsikt lengde

Horisontalkurveradius er i de fleste tilfeller mellom 50 og 600 meter. I et norsk datasett som omfattet 63,969 kurver (Elvik og Haugvik 2022), varierte minste radius mellom 7 og 696 meter, med et gjennomsnitt på 261 meter og et standardavvik på 166 meter. Gjennomsnittet pluss eller minus et standardavvik dekker kurver med radius mellom 95 og 427 meter. Tidligere studier (Sakshaug 1998) tyder videre på at ulykkesrisikoen er uavhengig av radius når radius er mer enn ca. 450 meter.

Avbøyningsvinkler på mellom 30 og 100 grader er tatt med. Det finnes ikke data om vanlige avbøyningsvinkler i kurver, men i det norske datasettet (Elvik og Haugvik 2022), var gjennomsnittlig lengde på en kurve 98 meter. Gjennomsnittlig radius var 261 meter. Som nevnt over, kan avbøyningsvinkel måles ved forholdstallet L/R, som her blir $98/261 = 0,375$. Når L/R er lik 1, er avbøyningsvinkelen 57,3 grader. Når L/R er lik 0,375, betyr det en gjennomsnittlig avbøyningsvinkel på 21,5 grader. Avbøyningsvinkler mellom 30 og 100 grader er medregnet. Disse ligger i det området der avbøyningsvinkelen kan ventes å påvirke ulykkesrisikoen. Ved lavere avbøyningsvinkler antas risikoen å bli lite påvirket.

For lengde på horisontalkurver benyttes de samme verdier som for radius. I et norsk materiale (Elvik og Haugvik 2022) varierte kurvenes lengde mellom 11 og 820 meter, med et gjennomsnitt på 98 meter og et standardavvik på 66 meter. Gjennomsnitt pluss eller minus et standardavvik dekker kurvelengder mellom 32 og 164 meter.

Overhøyde i horisontalkurver angis i prosent tverrfall. I det norske materialet varierte dette mellom 0 og 17,9 %. Gjennomsnittet var 3,6 % og standardavviket 2,2 %. Verdier mellom 0 og 10 % er benyttet. Kravet til overhøyde er 8 %.

Få studier har undersøkt betydningen av om horisontalkurver har overgangskurver eller ikke og lengden på disse. I det norske datasettet varierer lengden av overgangskurver mellom 0 og 1012 meter (den siste verdien virker tvilsom). Gjennomsnittet var 23 meter og standardavviket 51 meter. Lengder mellom 0 og 60 meter er inkludert.

Lengden av en rett strekning før en kurve har vist seg å påvirke ulykkesrisikoen i en kurve. I de norske dataene (Elvik og Haugvik 2022) varierte lengden av den rette strekningen før en kurve fra 1 meter til 6950 meter, med et gjennomsnitt på 90 meter og et standardavvik på 177 meter. Lengder mellom 100 meter og 1000 meter er benyttet ved uttrekning av data fra de enkelte undersøkelser.

Radius i nabokurver har vist seg å påvirke ulykkesrisikoen i en kurve. Her benyttes samme verdier for radius som i den kurven risikoen beregnes for, det vil si mellom 50 og 600 meter.

Det foreligger data om antall kurver før en gitt kurve i det norske datasettet. Antallet varierer mellom 0 og 19. Gjennomsnittet er 2,22 og standardavviket 2,39. Verdier mellom 0 og 5 er benyttet.

I de norske dataene er det oppgitt om vegen har stigning eller fall før en kurve. Dette er angitt i prosent. For fall benyttes negative tall, for stigning benyttes positive tall.

Stigning angis vanligvis i prosent. Hvis det skilles mellom oppoverbakke og nedoverbakke, angis vanligvis oppoverbakke med positive tall og nedoverbakke med negative tall. Her skilles det ikke mellom oppoverbakker og nedoverbakker. Stigning angis som absoluttverdi i prosent. De fleste stigninger er mellom 1 og 7 %.

Høybrekkskurver (baketopp) eller lavbrekkskurver (bunnen av en bakke) er angitt med dummyvariabler (ja eller nei). Det hadde vært ønskelig å kjenne radius i høybrekks- og lavbrekkskurver, men dette er ikke undersøkt i den litteraturen som er samlet inn under arbeidet med denne rapporten.

Når en veg går over fra stigning til fall, eller omvendt, kan endringen i stigning angis i prosent. Hvis en oppoverbakke på 7 % følges av en nedoverbakke på 7 %, er endringen i stigning lik summen av disse prosentene i absoluttverdi, det vil si 14 %.

Høybrekk reduserer sikten. Det er undersøkt (Harwood og Bauer 2015) om ulykkesrisikoen påvirkes av om kravet til stoppsiktlengde er oppfylt eller ikke. Hvis kravet er oppfylt, er det mulig å stoppe for en hindring. Hvis kravet ikke er oppfylt, er dette ikke mulig.

Siktlengdene er de verdier som er oppgitt i Vegnormalene for ulike vegklasser.

4 Sammenveing av resultater

4.1 Diagnostiske verktøy uten statistiske vekter

I meta-analyse som bygger på statistiske vekter, kan man benytte ulike diagnostiske verktøy for å undersøke om det foreligger publikasjonsskjevhet eller om resultatene er påvirket av avvikende datapunkter. Som nevnt i kapittel 2, kan ikke statistisk vektning benyttes ved oppsummering av studier av vegers linjeføring og trafikksikkerhet. Grunnen er at ulike studier definerer ulike variabler ulikt, og både regresjonskoeffisienter og standardfeilen til disse avhenger av hvordan variablene er definert. En koeffisient som, for eksempel, gjelder «degree of curve» kan ikke omregnes eller oversettes til en som gjelder kurveradius i meter. Derimot kan degree of curve omregnes til radius i meter, slik at en koeffisient som gjelder degree of curve kan benyttes til å beregne hvordan ulykkesrisikoen avhenger av kurveradius i meter.

Traktdiagrammer (funnel plots) er det mest brukte diagnostiske verktøy i meta-analyse basert på statistiske vekter. Slike diagrammer viser om resultatene har en symmetrisk eller skjev fordeling, er unimodale eller bimodale, og om det finnes datapunkter som kan være avvikende. Med et avvikende datapunkt menes et datapunkt som har avgjørende innflytelse på resultatet i en bestemt retning, slik at resultatet endres signifikant ved å utelate datapunktet. Det er ønskelig å utelate avvikende datapunkter i meta-analyse, fordi de betyr at resultatene av analysen ikke er representative hvis de inkluderes.

Det er ikke mulig å lage traktdiagrammer når statistiske vekter ikke er definert. Er det likevel mulig å studere fordelingen av resultater med sikte på å se om den er symmetrisk eller om det kan finnes avvikende datapunkter? Ja, det finnes muligheter for å undersøke egenskaper ved fordelingen av resultater. Det viktigste verktøyet er et såkalt stem-and-leaf plot.

Det er en grafisk framstilling der første, eventuelt andre, desimal i resultatene plottes loddrett og danner «stammen» (stem). De enkelte resultater plottes så vannrett utenfor den desimal de tilhører. Dette danner grenene (the leafs). Figur 4.1 viser et eksempel på en slik figur. Den gjelder resultater som viser relativ risiko i horisontalkurver på 300 meter, når risikoen settes lik 1,00 i kurver med radius 600 meter.

Første kolonne er første siffer i relativ risiko. 3 betyr at relativ risiko er 3 ganger så høy som i kurver med radius 600 meter. Andre siffer er første desimal i anslag på relativ risiko. 3 betyr relativ risiko på 3,3. Tredje siffer, og følgende sifre bortover, er resultater av de enkelte undersøkelser. Det står et totalt ved siden av 3 3. Det betyr at det foreligger en undersøkelse der relativ risiko er anslått til 3,32.

Tallene videre nedover (32, 31, 30, osv.) gjelder relativ risiko på 3,2, 3,1 og så videre. Det forekommer ingen undersøkelser som viste slik relativ risiko. Nye resultater forekommer først ved 21. Der står det 0 og 8. Det betyr at en undersøkelse viste en relativ risiko på 2,10 og en viste en relativ risiko på 2,18. Dersom to eller flere undersøkelser viste samme relative risiko, gjentas tallet for hver undersøkelse. Det for, for eksempel, to undersøkelser som viste en relativ risiko på 1,67.

Figur 4.1 inneholder til sammen 46 resultater. Følgende observasjoner kan gjøres på grunnlag av figuren.

1. Anslaget på 3,32 ligger langt unna nest høyeste anslag på relativ risiko, som er 2,10. Det bør testes om 3,32 er et avvikende datapunkt.
2. 45 av 46 anslag tyder på økt risiko. Dette gir en konsistensscore på $45/46 = 0,978$.
3. Fordelingen av resultater gir inntrykk av å være bimodal med en topp rundt en relativ risiko på 1,6 og en annen topp rundt en relativ risiko på 1,0-1,1.

Stem	Leaf
33	2
32	
31	
30	
29	
28	
27	
26	
25	
24	
23	
22	
21	08
20	019
19	79
18	228
17	338
16	13577
15	223
14	345
13	78
12	4
11	23445678
10	034555678
09	9

Figur 4.1: Stem-and-leaf plot for relativ risiko i kurver med radius 300 meter når risikoen i kurver med radius 600 meter er lik 1,00.

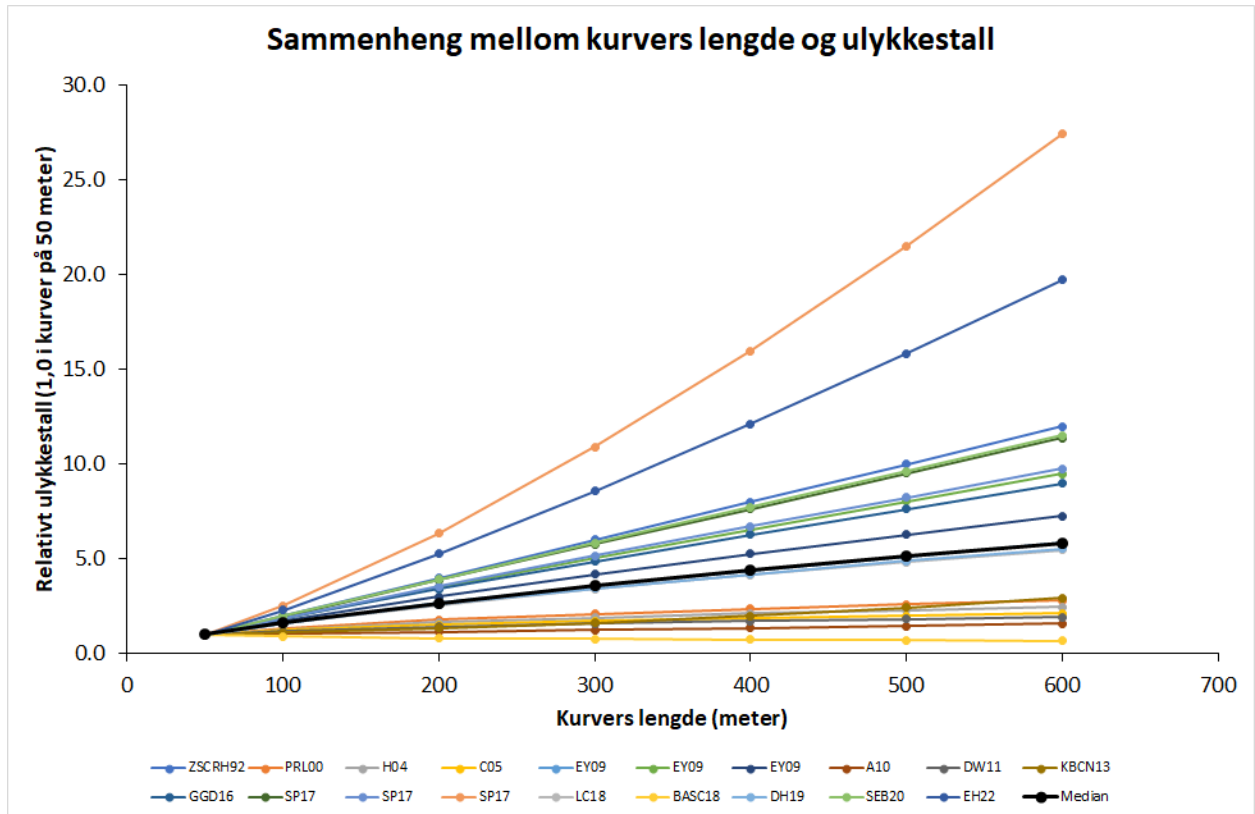
Det er ikke mulig å teste for publikasjonsskjevhet. Resultatene er imidlertid nokså symmetrisk fordelt omkring gjennomsnittet, med 22 anslag som er høyere enn gjennomsnittet og 24 som er lavere. Dette tyder ikke på publikasjonsskjevhet, fordi det er rimelig å anta at en slik skjevhet knyttet til risiko i kurver ville føre til at resultater som **ikke** viste høyere risiko ikke ville bli publisert. Gjennomsnittlig relativ risiko er 1,50. Medianverdi av relativ risiko er 1,44. Standardavviket i relativ risiko er 0,46 og standardfeilen (standard error of the mean) er 0,067. Dersom man utelater anslaget på 3,32 på relativ risiko, endres gjennomsnittet til 1,46. Denne endringen er ikke signifikant ($1,50 \pm 1,96 \cdot 0,067 = 1,37$ til $1,63$). Data-punktet regnes derfor ikke som avvikende.

Resultatene spriker mer og mer jo lavere kurveradius de gjelder. Ved kurveradius 50 meter varierer anslagene på relativ risiko mellom 1,05 og 53,21. Tre anslag (53,21; 32,57; 13,99) er betraktelig høyere enn de andre.

I lys av dette, og for å begrense arbeidet med diagnostiske tester, er medianverdien av foreliggende resultater valgt for å oppsummere dem. Medianverdien er representativ: halvparten viser lavere risiko, halvparten høyere.

4.2 Medianverdi som representativt resultat

Figur 4.2 viser et eksempel på bruk av medianverdien til å oppsummere resultater. Figuren gjelder resultater av studier av sammenhengen mellom kurvelengde og relativ ulykkesrisiko.



Figur 4.2: Oppsummering av studier av sammenhengen mellom kurvers lengde og relativ ulykkesrisiko.

Funksjoner tilpasset resultatene av de enkelte undersøkelser er vist med linjer med ulik farge.

5 Resultater

I dette kapitlet legges resultater fram for de enkelte linjeføringsselementer. Resultater av en norsk undersøkelse (Elvik og Haugvik 2022) drøftes i neste kapittel og sammenlignes med resultatene som presenteres i dette kapitlet.

5.1 Horisontalkurveradius

Det er funnet 46 anslag på hvordan ulykkesrisikoen i horisontalkurver varierer med kurvens radius. Fra noen undersøkelser er mer enn ett resultat trukket ut. Resultatene bygger på følgende undersøkelser:

Brüde, Larsson og Thulin 1980 (Sverige; 2 resultater; kun radier fra 300 meter og mer)

Zegeer mfl. 1992 (USA)

Shankar, Milton og Mannering 1997 (USA)

Council 1998 (USA; 3 resultater)

Milton og Mannering 1998 (USA; 2 resultater)

Vogt og Bared 1998 (USA; 2 resultater)

Hauer 1999 (New Zealand; re-analyse av Matthews og Barnes 1988; 8 resultater)

Persaud, Retting og Lyon 2000 (Canada)

Abdel-Aty og Radwan 2000 (USA)

Hanno 2004 (Canada)

Cardoso 2005 (Portugal)

Christensen og Ragnøy 2006 (Norge)

Montella, Colantuoni og Lamberti 2008 (Italia)

Easa og You 2009 (USA; 4 resultater)

Aram 2010 (Malaysia)

Dietze og Weller 2011 (Tyskland)

Bauer og Harwood 2013 (USA; 3 resultater)

Khan mfl. 2013 (USA)

Gooch, Gayah og Donnell 2016 (USA)

Saleem og Persaud 2017 (USA; 3 resultater)

Gooch, Gayah og Donnell 2018 (USA)

Bil mfl. 2018 (Tsjekkia)

Srinivasan mfl. 2018 (USA)

Dhahir og Hassan 2019 (USA)

Høye, Nævestad og Evarsson 2019 (Norge)

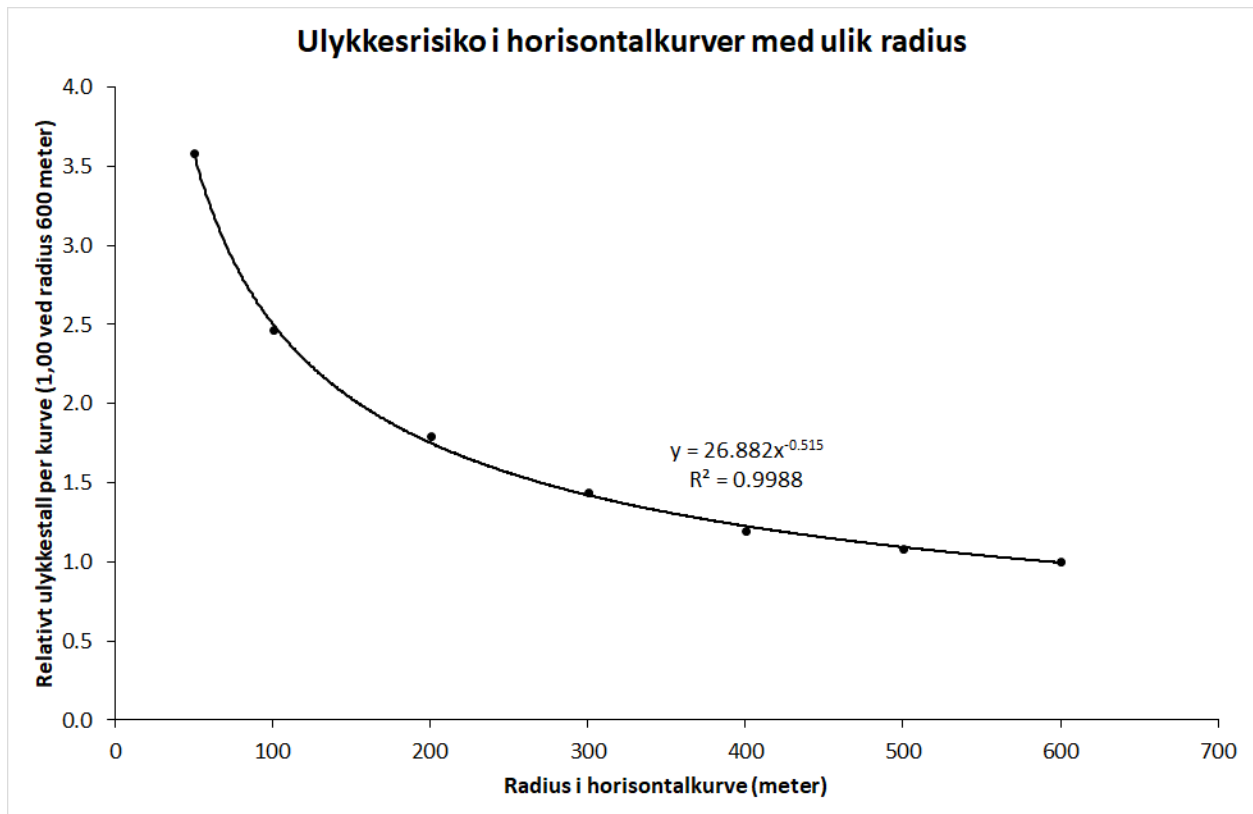
Shalkamy og El-Bayouny 2020 (Canada)

Elvik og Haugvik 2022 (Norge)

Basert på medianverdiene for risiko, fremkommer sammenhengen som er vist figur 5.1.

Ulykkesrisikoen øker når radius avtar. Når antall ulykker settes lik 1,0 ved en radius på 600 meter, er det nesten 3,6 ved en radius på 50 meter. En potensfunksjon passer svært godt til datapunktene.

For å teste om resultatene er stabile over tid, er mediananslag for risiko beregnet for de første 10 resultater, de første 20 resultater, de første 30 resultater, de første 40 resultater og alle 47 resultater. De relative risikotall som fremkommer på denne måten er vist i tabell 5.1. Resultatene må betegnes som svært like i de ulike utvalgene av studier. Man kan likevel ane en tendens til høyere relativ risiko i de krappeste kurvene og lavere relativ risiko slakere kurver. Undersøkelsene er sortert kronologisk, så dette viser utviklingen av resultater over tid.



Figur 5.1: Sammenheng mellom radius og ulykkesrisiko i kurver.

47 av 47 resultater viser økning i ulykkesrisiko med synkende kurveradius (konsistensscore 47/47 = 1,0).

Tabell 5.1: Medianverdier for relativ risiko i kurver med ulik radius basert på ulike utvalg av resultater.

Kurveradius (m)	Utvalg av studier				
	Første 10 studier	Første 20 studier	Første 30 studier	Første 40 studier	Alle 47 studier
50	1,617	3,000	3,000	3,536	3,583
100	1,773	2,562	2,125	2,236	2,467
200	1,787	2,061	1,590	1,705	1,796
300	1,451	1,644	1,408	1,406	1,441
400	1,152	1,386	1,153	1,180	1,198
500	1,062	1,200	1,063	1,067	1,087
600	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

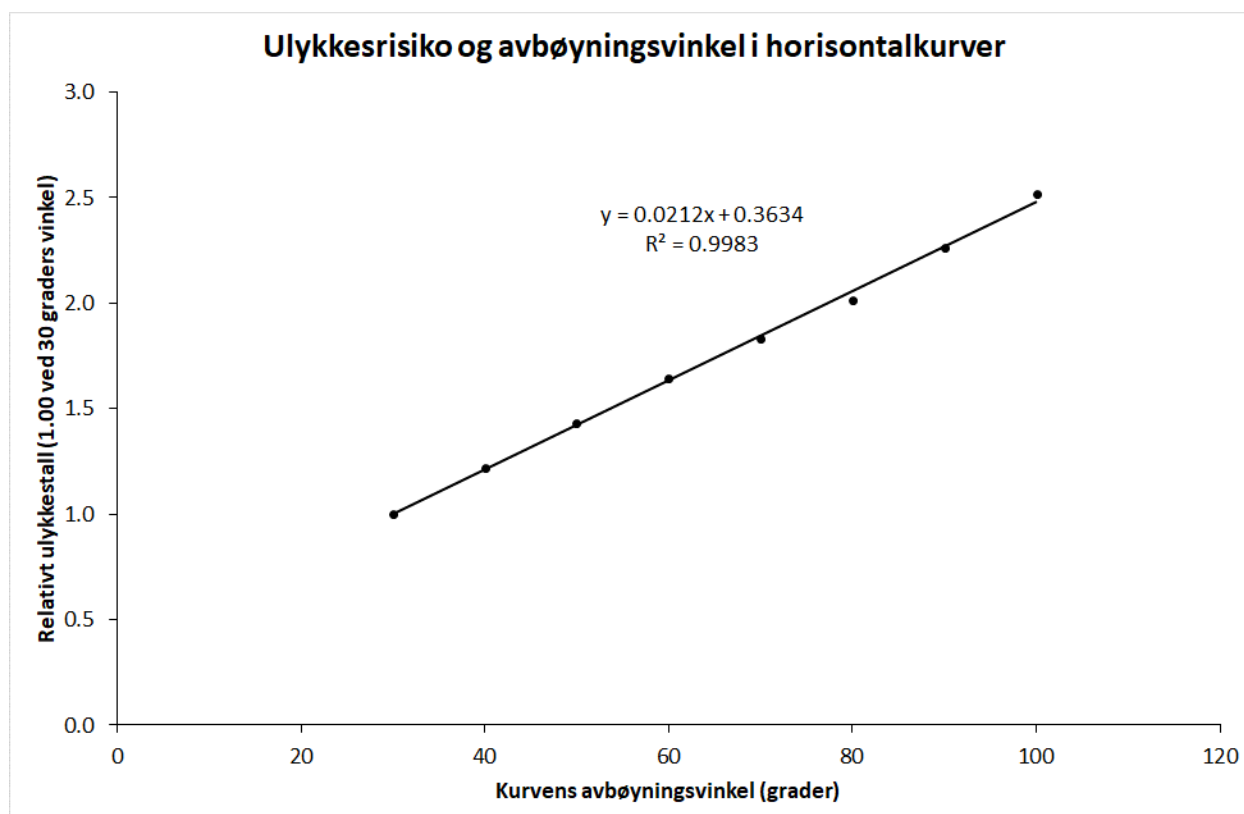
5.2 Horisontalkurvers avbøyningsvinkel

Det er utarbeidet 18 anslag på sammenhengen mellom kurvers avbøyningsvinkel og ulykkesrisiko. Disse bygger på følgende undersøkelser:

- Zegeer mfl. 1992 (USA)
- Milton og Mannering 1998 (USA)
- Persaud, Retting og Lyon 2000 (Canada)
- Hanno 2004 (Canada)
- Cardoso 2005 (Portugal)
- Montella, Colantuoni og Lamberti 2008 (Italia)
- Easa og You 2009 (USA; 3 resultater)
- Aram 2010 (Malaysia)

Dietze og Weller 2011 (Tyskland)
Bauer og Harwood 2013 (USA)
Khan mfl. 2013 (USA)
Saleem og Persaud 2017 (USA; 3 resultater)
Bil mfl. 2018 (Tsjekkia)
Dhahir og Hassan 2019 (USA)
Shalkamy og El-Bayouny 2020 (Canada)
Elvik og Haugvik 2022 (Norge)

Basert på medianverdier for relativ ulykkesrisiko ved ulike avbøyningsvinkler viser figur 5.2 hvordan ulykkestallet varierer med ulike avbøyningsvinkler i kurver.



Figur 5.2: Sammenheng mellom kurvers avbøyningsvinkel og ulykkestall.

Antall ulykker øker som en lineær funksjon av kurvens avbøyningsvinkel. Resultatene er ikke helt konsistente. 16 av 19 resultater tyder på økt risiko, 3 tyder på det motsatte (konsistensscore 16/19 = 0,842).

5.3 Horisontalkurvers lengde

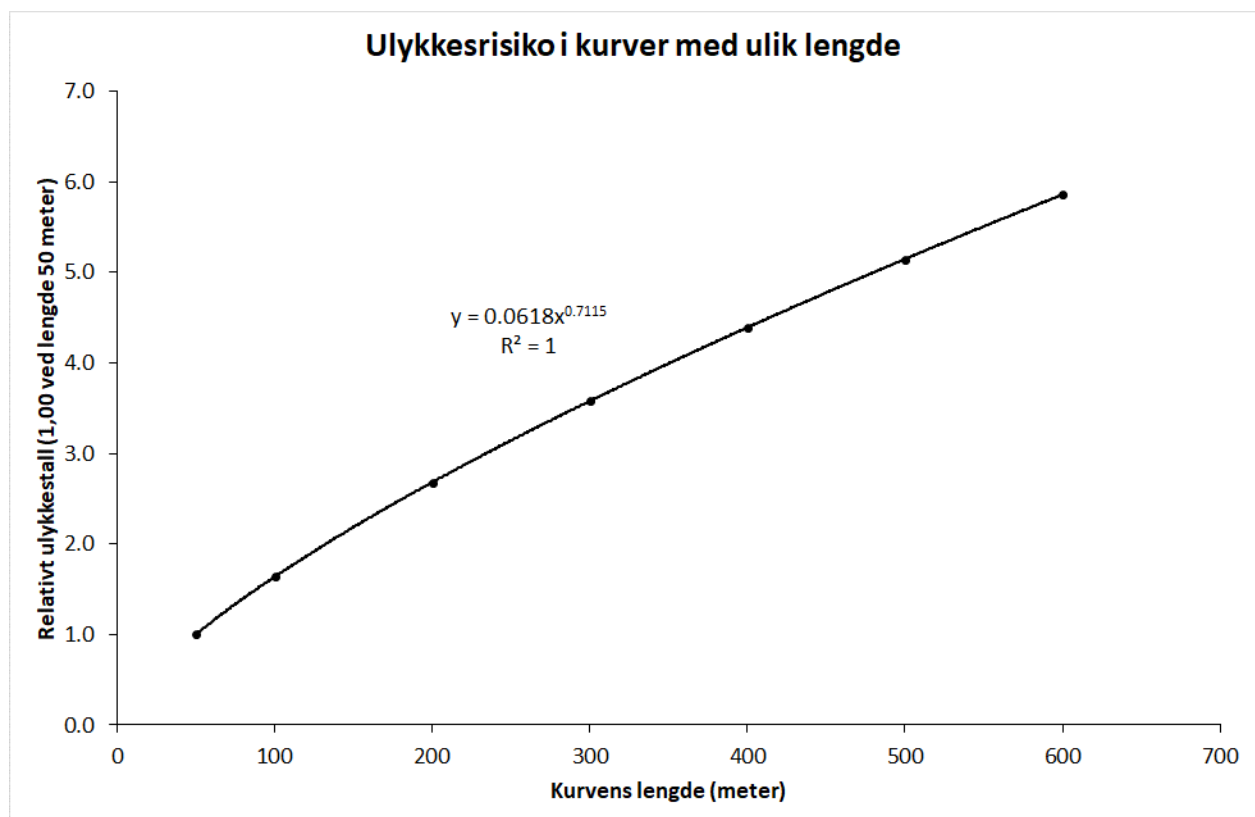
Det er funnet 19 anslag på hvordan ulykkesrisikoen i horisontalkurver varierer med kurvens lengde. Disse bygger på følgende undersøkelser:

Zegeer mfl. 1992 (USA)
Persaud, Retting og Lyon 2000 (Canada)
Hanno 2004 (Canada)
Cardoso 2005 (Portugal)
Easa og You 2009 (USA; 3 resultater)
Aram 2010 (Malaysia)

Dietze og Weller 2011 (Tyskland)
 Khan mfl. 2013 (USA)
 Gooch, Gayah og Donnell 2016 (USA)
 Saleem og Persaud 2017 (USA; 3 resultater)
 Bil mfl. 2018 (Tsjekia; 3 resultater)
 Llopis-Castello, Camacho-Torregrosa og Garcia 2018 (Spania)
 Dhahir og Hassan 2019 (USA)
 Shalkamy og El-Bayouny 2020 (Canada)
 Elvik og Haugvik 2022 (Norge)

Figur 5.3 oppsummerer resultater av disse undersøkelsene, basert på medianverdiene av resultatene.

Ulykkestallet øker med økende kurvelengde, men ikke proporsjonalt med lengden. Kurver på 600 meter er 12 ganger så lange som kurver på 50 meter, men har bare om lag 6 ganger så mange ulykker. En potensfunksjon passer perfekt til datapunktene. 18 av 19 resultater studier viser at ulykkestallet øker med økende lengde på kurver (konsistensscore 0,947).



Figur 5.3: Sammenhengen mellom horisontalkurvers lengde og ulykkestall.

5.4 Overhøyde i horisontalkurver

Det er et krav i vegnormaler i alle land at kurver skal ha overhøyde. Overhøyden i kurver tjener flere funksjoner. For det første bidrar den til at vann renner vekk fra vegen. For det andre motvirker den sentrifugalkraften i kurver, som, alt annet likt, bidrar til å trekke kjøretøy ut av kurven. For det tredje tillater overhøyde større fart i kurver enn om man ikke har overhøyde.

Det er likevel forbausende få studier av sammenhengen mellom overhøyde og ulykkesrisiko. Sakshaug (1998) beskrev et opplegg for en multivariat undersøkelse, men resultater av denne undersøkelsen er ikke funnet.

Christensen og Ragnøy (2006) studerte sammenhengen mellom endring i overhøyde og ulykkestall. Endring i overhøyde er her differansen mellom største og minste tverrfall på en strekning på 100 meter, uttrykt som et positivt tall. Hvis største tverrfall er 8 % og minste er 2 %, blir differansen 6 %. Endringen i tverrfall gjelder en hvilken som helst strekning, uansett om strekningen ligger i kurve eller ikke, men det ble kontrollert for kurveradius når koeffisienten for variasjon i overhøyde ble beregnet. Det ble funnet at antall ulykker økte med 0,95 % når differansen i tverrfall økte med 1 prosentpoeng. Variasjon i tverrfall er med andre ord ugunstig for trafikksikkerheten.

Aram (2010) fant en positiv koeffisient for overhøyde. Den innebar at økning av overhøyde fra 1 % til 10 % mer enn fordoblet ulykkestallet i en kurve. Dette resultatet må betegnes som lite troverdig.

Shalkamy og El-Basyouny (2020) inkluderte overhøyde i sin ulykkesmodell for kurver. Koeffisienten var negativ, men ikke statistisk signifikant. Den innebar at overhøyde hadde stor betydning for antall ulykker i kryss. Ved å øke overhøyden fra 1 % til 8 % ble beregnet ulykkestall redusert med 51,4 %, når de andre variablene som inngikk i modellen ble holdt konstant.

I den norske modellen (Elvik og Haugvik 2022) som drøftes i detalj i neste kapittel inngikk overhøyde angitt i prosent. Koeffisienten var negativ og innebar at en økning av overhøyde fra 1 % til 10 % reduserer antall ulykker med 19 % når de andre variablene holdes konstant. Variasjon i overhøyde ble også registrert. Den ble, i likhet med overhøyde, angitt i prosent. Denne variabelen hadde en positiv koeffisient, som innebar at dersom variasjonen i overhøyde gjennom en kurve økte fra 1 % til 10 % ville antall ulykker øke med 19 % (alt annet holdt konstant).

Disse få resultatene tyder alt i alt på at overhøyde i kurver reduserer antall ulykker, mens variasjon i overhøyde øker antall ulykker. Det understrekes at variasjon i overhøyde her ikke betyr oppbygging av overhøyde i en overgangskurve, men ujevnheter i overhøyde ved en gitt kurveradius.

5.5 Forekomst og lengde av overgangskurve

Ifølge vegnormalene skal horisontalkurver ha overgangskurver. Overgangskurven skal utformes som en klotoide. Det er en kurve der radius synker lineært med buelengden, slik at kurven gradvis blir krappere. På strekningen som dekkes av en klotoide skal overhøyden bygges opp, slik at den når riktig nivå i kurven.

I likhet med overhøyde, er det få studier av overgangskurver. Zegeer mfl. (1992) inkluderte «spiral transition curve» i sin ulykkesmodell. En spiral transition curve er en klotoide. Koeffisienten var negativ, noe som betyr et lavere ulykkestall med en klotoide enn uten. Forskjellen i ulykkestall var likevel liten. En kurve med radius 300 meter og lengde 300 meter kan beregnes å ha 3,2 % færre ulykker dersom den har to overgangskurver i stedet for ingen. I en kurve med radius 50 meter og lengde 50 meter, er beregnet ulykkestall 2,2 % lavere med overgangskurver enn uten. Hvis radius og lengde er 600 meter, er ulykkestallet 2 % lavere med overgangskurver enn uten.

Council (1998) fant større forskjeller i ulykkestall knyttet til overgangskurver. På veger i flatt terreng var det samspill mellom kurveradius og overgangskurver. I kurver med radius 200 meter hadde kurver med overgangskurver 55 % færre ulykker enn kurver uten overgangskurver. Ved en radius på 600 meter var forskjellen mindre: med overgangskurver var ulykkestallet 3 % lavere enn uten. På veger i kupert terreng hadde kurver med overgangskurver 28 % færre ulykker enn kurver uten dette. Anvendelse av koeffisientene for veger i fjellterreng ga ikke meningsfulle resultater og kan tyde på at det er trykkfeil eller andre feil i de oppgitte koeffisientene.

Aram (2010) fant at forlengelse av en overgangskurve med 10 meter innebar 99,3 % reduksjon av ulykkestall. Resultatet virker svært urimelig og tyder på at koeffisienten er estimert feil eller at det er trykkfeil i artikkelen.

Det norske materialet (Elvik og Haugvik 2022) viser at kurver med overgangskurver har 12,2 % færre ulykker enn kurver uten dette. Gjennomsnittlig lengde på en overgangskurve var 23 meter. Forkortes dette til 13 meter, øker beregnet ulykkestall merd 2,4 % (alt annet holdt konstant). Forlenges overgangskurven til 33 meter, reduseres beregnet ulykkestall med 1,5 % (alt annet holdt konstant).

Resultatene tyder på at kurver med overgangskurver er sikrere enn kurver uten overgangskurver og at lange overgangskurver gir færre ulykker enn korte overgangskurver.

5.6 Lengde av rett strekning før kurve

Betydning av hvor lang rett strekning det er foran en kurve har vært undersøkt av:

Milton og Mannering 1998 (USA; 2 resultater)

Hauer 1999 (New Zealand; re-analyse av Matthews og Barnes 1988; 4 resultater)

Dietze og Weller 2011 (Tyskland)

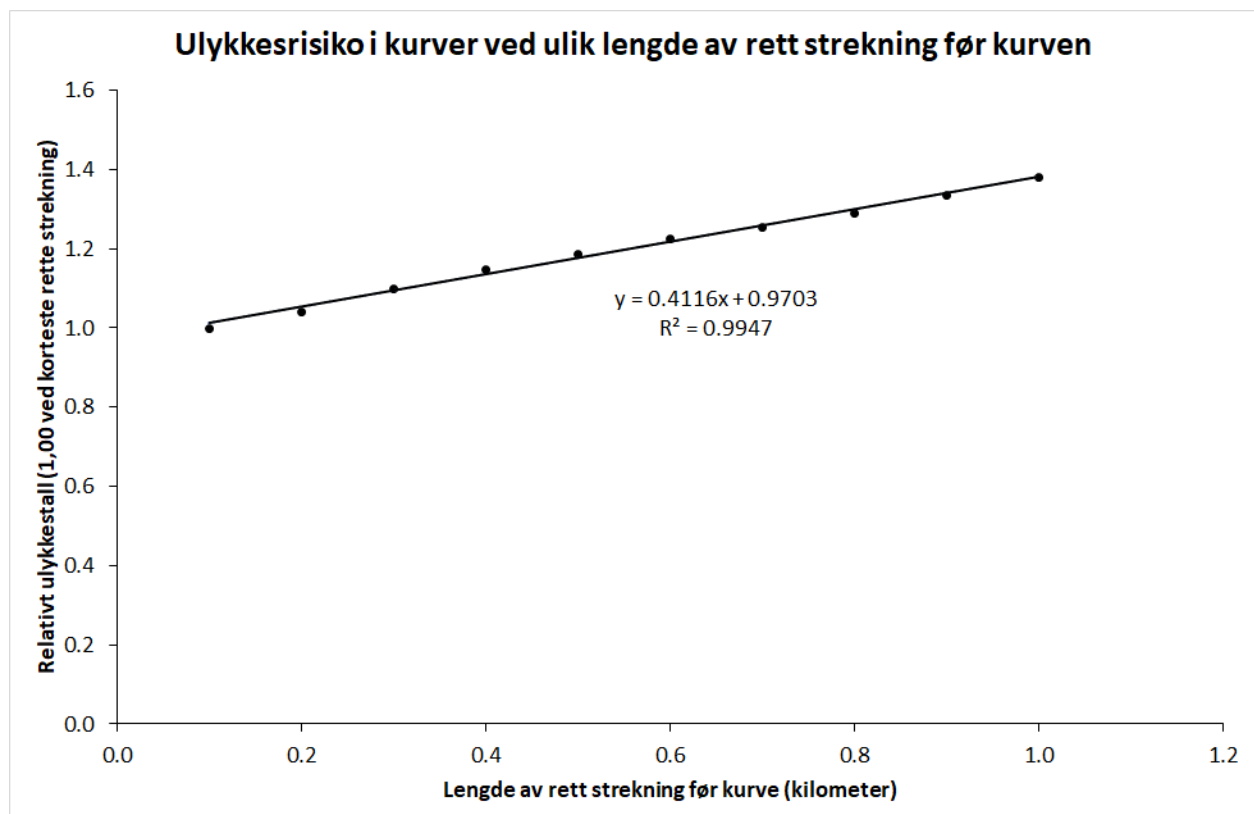
Findley mfl. 2012 (USA)

Khan mfl. 2013 (USA)

Bil mfl. 2018 (Tsjekkia; 2 resultater)

Elvik og Haugvik 2022 (Norge)

På grunnlag av disse undersøkelsene oppgir figur 5.4 sammenhengen mellom lengde på en rett strekning foran en kurve og antall ulykker i kurven.

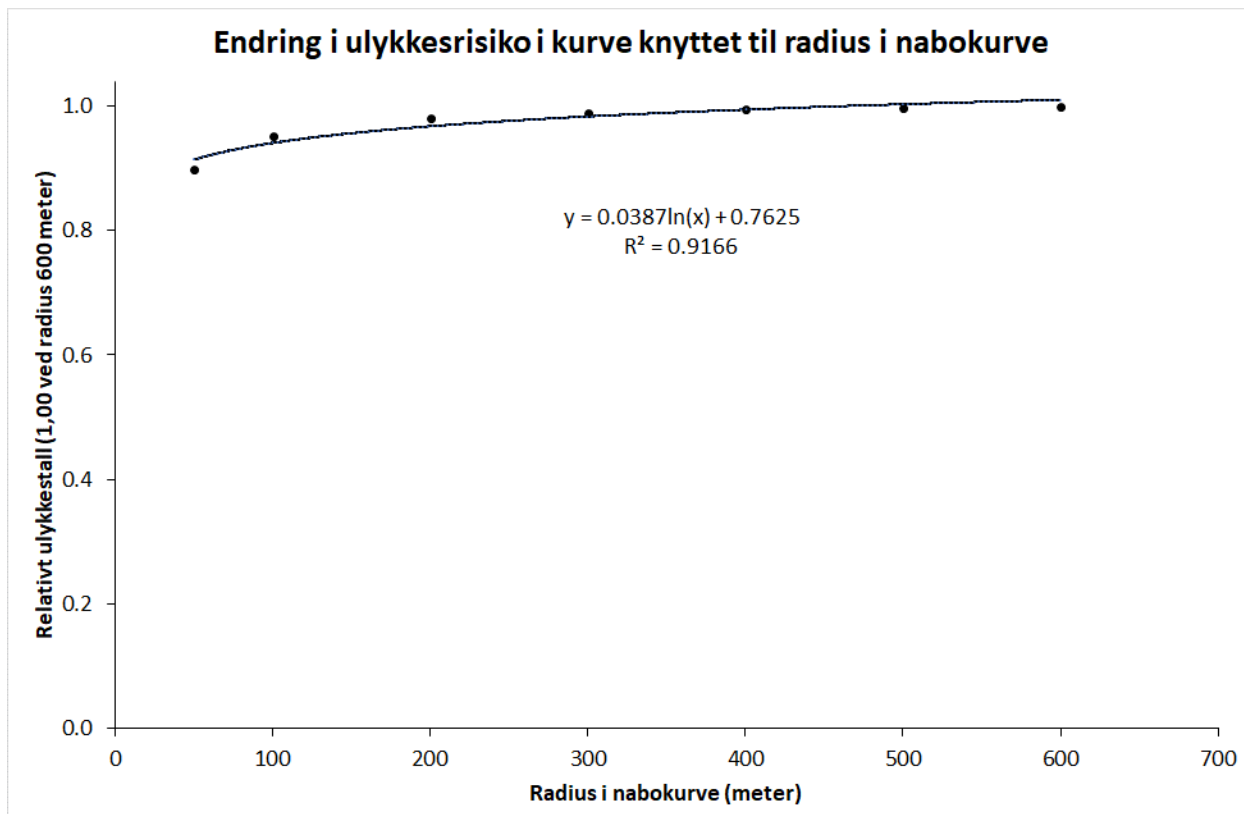


Figur 5.4: Sammenheng mellom lengde av rett strekning foran en kurve og antall ulykker i kurven.

Ulykkestallet i en kurve øker med ca. 40 % når lengden av den rette strekningen før kurven øker fra 100 meter til 1 kilometer. 10 av 12 resultater viser økende ulykkestall med økende lengde av rett strekning (konsistensscore 0,833).

5.7 Radius i nabokurver

Gooch, Gayah og Donnell (2016, 2018) har undersøkt betydning for antall ulykker i en gitt kurve av radius i nabokurven. Basert på tre resultater fremkommer sammenhengen som er vist i figur 5.5.



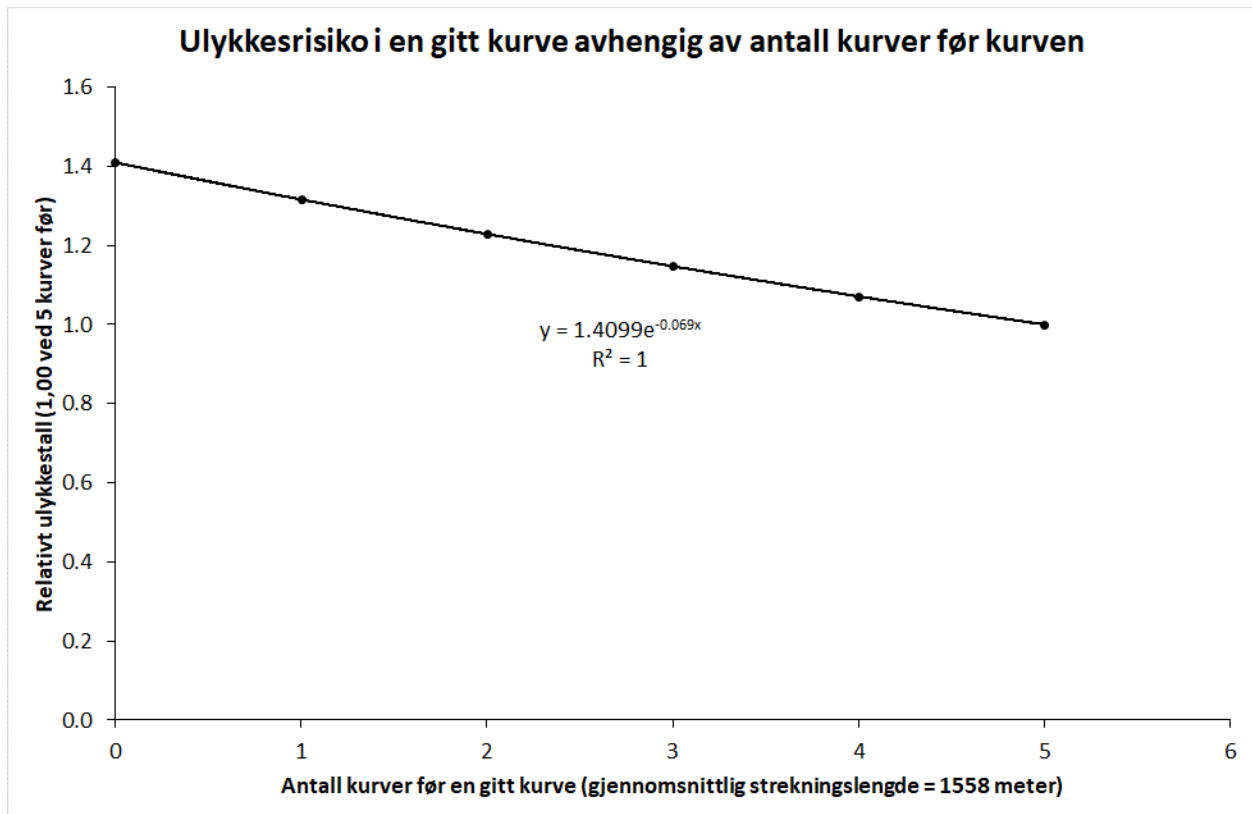
Figur 5.5: Betydningen av radius på nabokurven for antall ulykker i en gitt kurve.

Jo mindre radius nabokurven har, desto lavere er ulykkestallet i den kurven vi betrakter. Flere krappe kurver som ligger tett etter hverandre bidrar til å redusere ulykkesrisikoen i hver kurve. Reduksjonen er opp til 10 %.

5.8 Antall kurver før en gitt kurve

I datagrunnlaget til den norske undersøkelsen (Elvik og Haugvik 2022), ble antall kurver før en gitt kurve talt opp for en strekning på opptil 2 kilometer. Antallet varierte mellom 0 og 19, med et gjennomsnitt på 2,22 og et standardavvik på 2,39. Figur 5.6 viser hvordan antall ulykker i en gitt kurve varierer med antall kurver før kurven, for antall mellom 0 og 5.

Ikke overraskende synker ulykkesrisiko jo flere kurver det er foran en gitt kurve. Forskjellen i risiko mellom 0 kurver og 5 kurver er på 40 %.



Figur 5.6: Ulykkesrisiko i en kurve avhengig av antall kurver før kurven (gjennomsnittlig strekningslengde 1558 meter).

5.9 Stigning eller fall før kurve

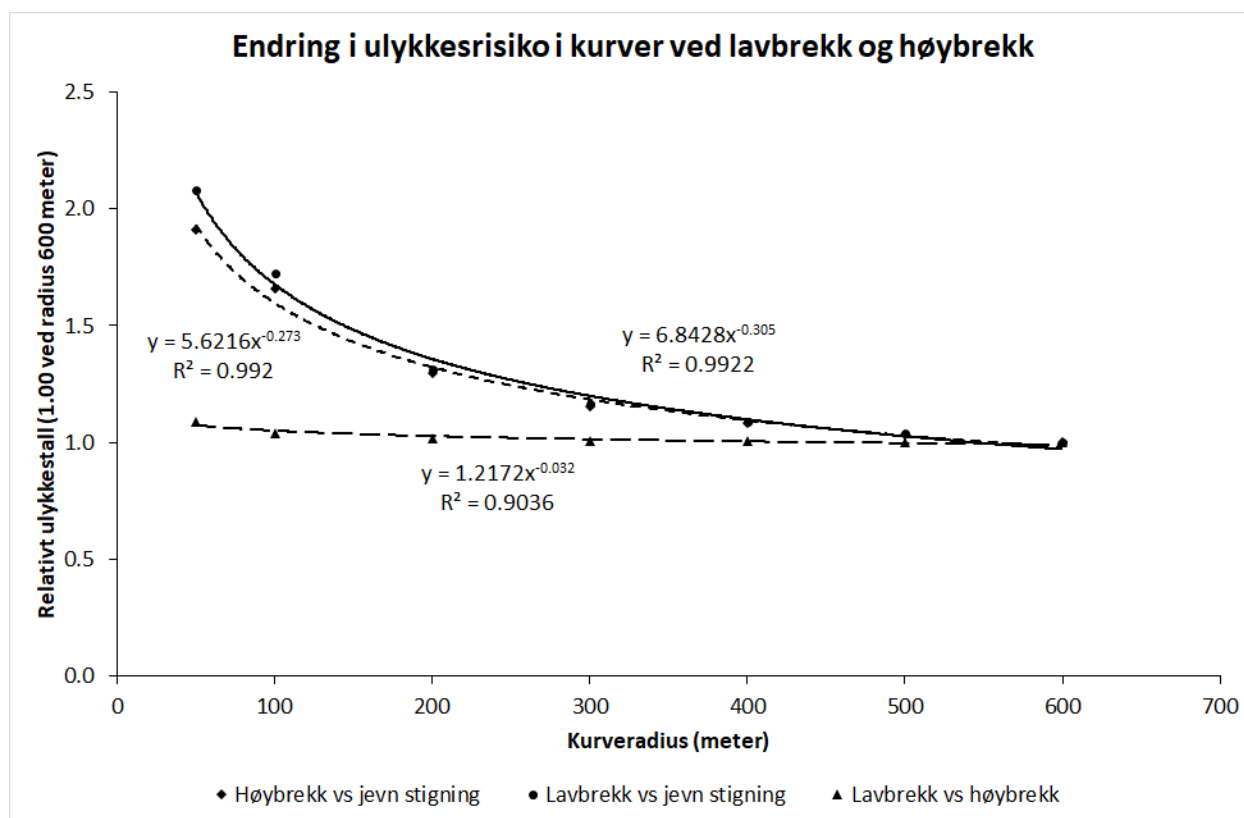
I de norske dataene om horisontalkurver, er det samlet data om stigning eller fall før en kurve (Elvik og Haugvik 2022). Stigning er angitt med positive tall (%), fall med negative (%). Det er i tillegg definert to dummyvariabler som indikerer om det er stigning eller fall før en kurve. De to dummyvariablene viser at både stigning og fall før en kurve øker ulykkesrisikoen. Det er ikke overraskende. Det som derimot er mer uventet, er at jo brattere en stigning eller et fall før kurven er, desto mindre er økningen i ulykkesrisiko i kurven.

For fall før en kurve er økningen i ulykkesrisiko i kurven på 56 % ved et fall på 1 %, men på 51 % ved et fall på 7 %. Et fall på 7 % vil oppleves som såpass bratt at mange førere vil bremse for å unngå at farten øker for mye. Dette oppleves som mindre nødvendig i slakere nedoverbakker.

For stigninger før kurver er tendensen til mindre økning i risiko enda mer markant. En stigning på 1 % øker ulykkesrisikoen med 46 % i kurven. En stigning på 7 % øker ulykkesrisikoen i kurven med bare 5 %. Stigninger på mer 8 % ser ut til å være forbundet med lavere ulykkesrisiko i kurver enn flat veg. Det siste er neppe riktig, men kan være et artefakt som kan tilskrives ekstrapolering utenfor det området der hovedtyngden av data ligger. De færreste stigninger er på mer enn 8 %. Bare 2,3 % av kurvene har en oppgitt stigningsverdi før kurven på mer enn 8 %.

5.10 Horisontalkurve i høybrekk og lavbrekk

Med et høybrekk menes en bakketopp. Et lavbrekk er bunnen av en nedoverbakke. Horisontalkurver som ligger i høybrekk eller lavbrekk har høyere ulykkesrisiko enn horisontalkurver som ligger i en jevn stigning eller på flat veg. Figur 5.7 bygger på resultater av undersøkelser utført av Bauer og Harwood (2013).



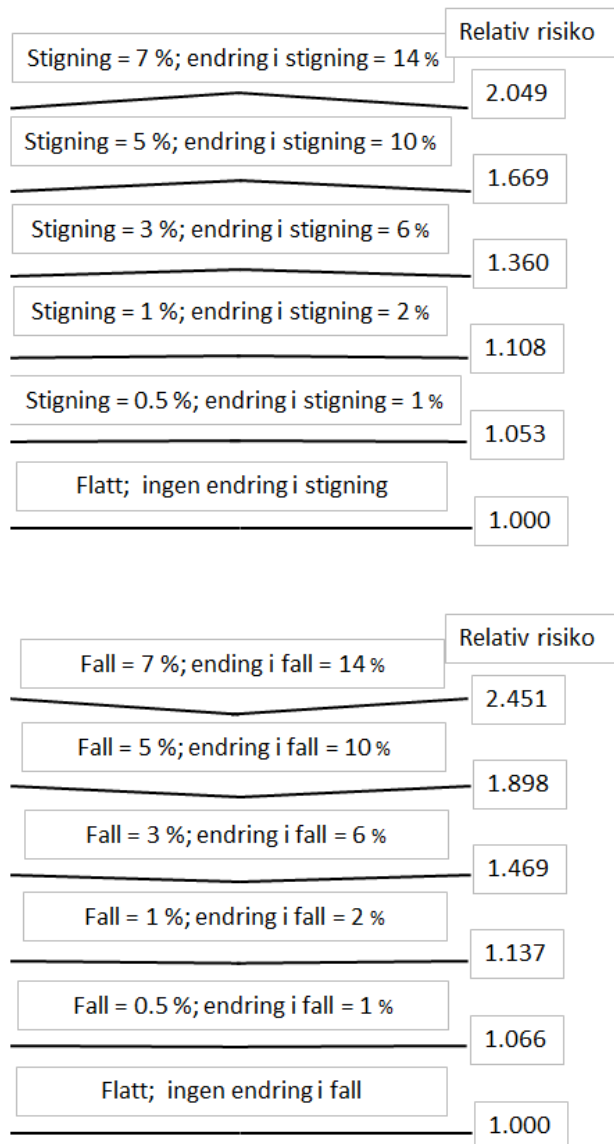
Figur 5.7: Ulykkesrisiko i kurver som ligger i jevn stigning eller i høybrekk eller lavbrekk.

Ulykkesrisikoen har sterkere sammenheng med kurveradius i høybrekk og lavbrekk enn i jevn stigning eller på flat veg. Ulykkesrisikoen øker litt mer i lavbrekk enn i høybrekk. Khan mfl. (2013) fant derimot flere ulykker i kurver i høybrekk enn i lavbrekk. De sammenlignet imidlertid ikke kurver i høybrekk eller lavbrekk med kurver som lå i jevn stigning eller på flat veg.

5.11 Endring av stigning i høybrekk eller lavbrekk

Økningen i ulykkesrisiko knyttet til høybrekk eller lavbrekk avhenger av hvor mye vegens stigning endrer seg. På grunnlag av Bauer og Harwood (2013) er de relative risikotallene i figur 5.8 beregnet.

Når en stigning på 7 % går over i et fall på 7 %, er absoluttverdien av endring i stigning på 14 %. Figur 5.8 viser at ulykkesrisikoen i horisontalkurver ved en slik endring i stigning er dobbelt så høy som i kurver som ligger på flat veg eller i jevn stigning. Økningen i ulykkesrisiko er større jo større endringen i stigning eller fall er. Overgang fra fall til stigning øker ulykkesrisikoen mer enn overgang fra stigning til fall.



Figur 5.8: Relativ risiko ved ulike endringer av vegens stigning i høybrekk eller lavbrekk.

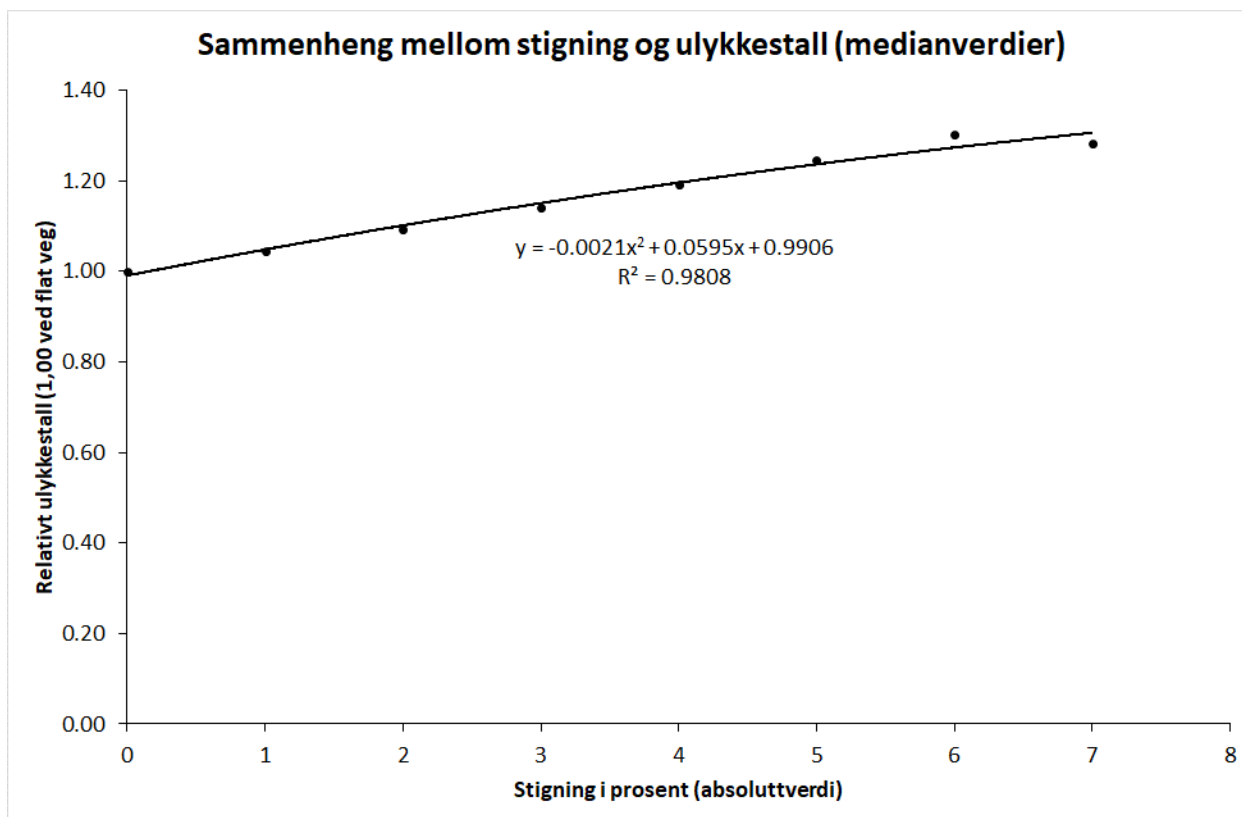
Hanno (2004) fant en enda større økning i risiko, men skilte ikke mellom overgang fra stigning til fall eller fra fall til stigning. Ved en absolutt endring av stigning på 14 %, fant Hanno en økning av ulykkesrisikoen til mer enn det tredoble.

5.12 Stigning generelt (absoluttverdi)

Sammenhengen mellom stigning, regnet i absoluttverdi, og antall ulykker er studert av:

- Brüde, Larsson og Thulin 1980
- Milton og Mannering 1998
- Vog og Bared 1998
- Christensen og Ragnøy 2006
- Montella, Colantuoni og Lamberti 2008
- Aram 2010
- Bauer og Harwood 2013
- Elvik og Haugvik 2022

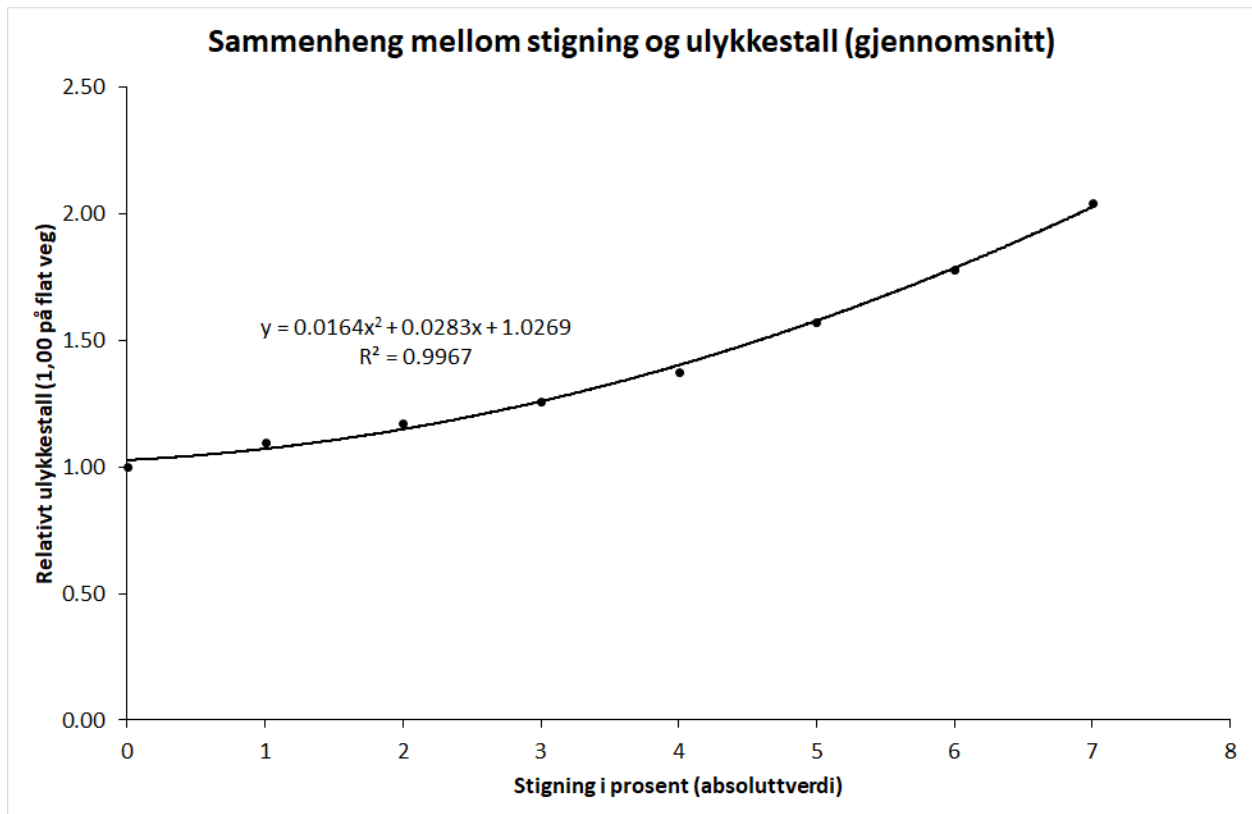
Figur 5.9 viser sammenhengen mellom stigning og ulykkestall på grunnlag av disse undersøkelsene, beregnet på grunnlag av medianverdier for økning i ulykkesrisiko.



Figur 5.9: Sammenheng mellom stigning og ulykkestall (medianverdier).

Det er omkring 30 % flere ulykker i de bratteste stigningene sammenlignet med flat veg. Funksjonen som er føyd til datapunktene tyder på at ulykkesrisikoen øker gradvis mindre jo brattere en stigning er. En funksjon som bygger på gjennomsnittresultater viser en annen tendens, se figur 5.10.

Her stiger kurven brattere og brattere jo brattere stigningen er. Begge funksjoner passer godt til datapunktene. Likevel må funksjon tilpasset medianverdier i figur 5.9 regnes som mest representativ, siden medianresultatene per definisjon er slik at halvparten viser høyere økning i risiko, halvparten viser lavere økning i risiko. I motsetning til dette, er kurven i figur 5.10 påvirket av noen få datapunkter. Det er, for eksempel, bare to av elleve datapunkter for en stigning på 7 % som ligger høyere enn kurven i figur 5.10; ni av datapunktene ligger lavere.



Figur 5.10: Sammenheng mellom stigning og ulykkestall (gjennomsnitt).

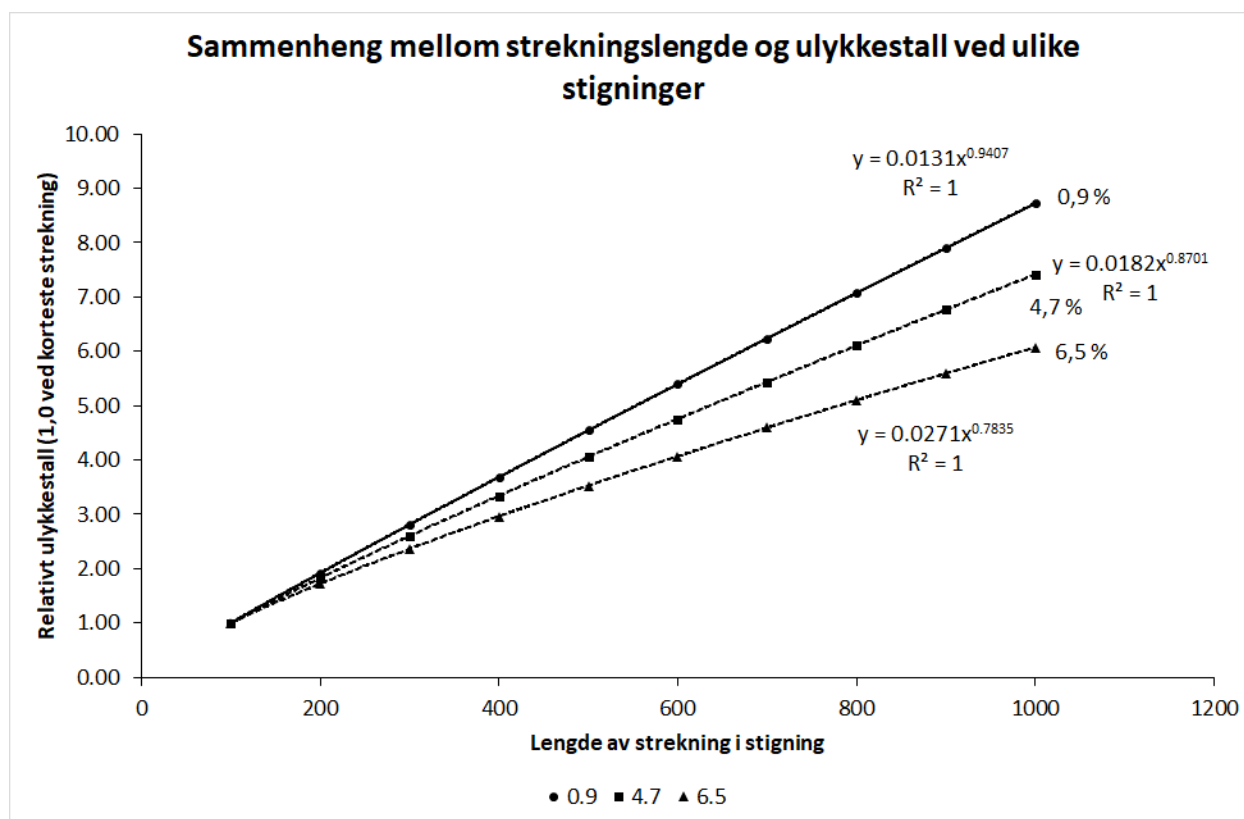
5.13 Stigningslengde

Det er kun funnet to undersøkelser om sammenhengen mellom stigningslengde og ulykkestall. Saleem og Persaud undersøkte hvilken sammenheng ulykkestallet hadde med lengden av stigninger på 0,9 %, 4,7 % og 6,5 %. Resultatene fremgår av figur 5.11.

Ulykkestallet øker ved alle stigninger, men mindre enn proporsjonalt med strekningens lengde. Økningen i ulykkestall er minst ved den bratteste stigningen, 6,5 %. Forklaringer på denne tendensen er ikke kjent, men i bratte stigninger kan farten bli redusert mer enn i slake stigninger, og mer jo lengre stigningen er. Lavere fart fører, alt annet likt, til et lavere ulykkestall.

I den norske ulykkesmodellen for tunneler (Høye, Nævestad og Ævarsson 2019), ble det i en modellvariant tatt med to variabler for stigningslengde, regnet i meter. Koeffisientene for de to variablene var langt fra statistisk signifikante og hadde ulike fortegn. Koeffisienten for lengde på stigning over 7 % var positiv og tydet på at økning av lengden på en stigning som er brattere enn 7 % fra 100 meter til 1000 meter vil øke ulykkestallet med ca. 5,5 %.

Disse resultatene gir ikke grunnlag for noen klare og entydige konklusjoner. Det synes imidlertid ikke å være slik at lengden på en bratt stigning bidrar mer til økt ulykkestall enn lengden på en slak stigning.



Figur 5.11: Sammenheng mellom lengde av strekning i stigning og ulykkestall.

5.14 Sikt lengde generelt

I Trafiksikkerhetshåndboken sies det følgende om sammenhengen mellom sikt lengde og ulykker:

Økning av sikt lengden på strekninger kan føre til økt, uendret eller redusert ulykkesrisiko. Økning av sikt lengden fra under 200 til over 200 meter førte til 23% (+4%; +46%) høyere ulykkesrisiko i to eldre undersøkelser (McBean, 1982; Nordtyp-projektgruppen, 1980). Denne sammenhengen gjelder for sikt lengder under 1 km. For sikt lengder over 1 km er ulykkesrisiko konstant. Andre undersøkelser har ikke funnet noen sammenheng mellom sikt lengden og ulykker på vegstrekninger uten kryss (Glennon, 1987; Urbanik et al., 1989; Fitzpatrick et al., 2000). Fambro et al. (1997) fant ingen virkning av sikt lengden på ulykker når sikt lengden er omtrent like lang eller litt mindre enn den beregnede minimum, men økt ulykkesrisiko når sikt lengden er betydelig mindre enn anbefalt. En italiensk undersøkelse (Caliendo, 2001) fant redusert antall ulykker med økende sikt lengde på motorveger. Sikt lengden i disse undersøkelsene var stort sett avhengig av vegens linjeføring.

Ved gjennomgang av de undersøkelser det henvises til, viste det seg at McBean (1982) er tolket på en feilaktig måte. Denne undersøkelsen kan best tolkes ved å plote resultatene i et diagram og føye en kurve til datapunktene. I stedet ble det beregnet endringer i risiko trinn-for-trinn ved å gå fra ett datapunkt til det neste. Denne framgangsmåten viste en nedgang på 14 % i ulykkesrisiko når sikt lengden økte fra 50 til 450 meter. En kurve føyd til datapunktene (eksponentialfunksjon) viste derimot en nedgang i ulykkesrisiko på 55 % når sikt lengden økte fra 50 til 450 meter. Kurven hadde relativt god føyning til datapunktene ($R^2 = 0,6783$).

Undersøkelsene til Fambro et al. (1997) og Fitzpatrick et al. (2000) (det er samme undersøkelse, rapportert to ganger) gjelder ikke sikt lengde direkte, men antall kurver som begrenser sikten. Jo flere slike kurver det var per kilometer veg, desto høyere var ulykkesrisikoen. Det oppgis imidlertid ingen tall sikt lengde og variasjon i denne.

Undersøkelsen til Caliendo (2001) inneholder en figur som viser sammenhengen mellom sikt lengde og ulykkestall. Figuren viser ingen sammenheng når sikt lengden er mer enn 1000 meter. Når sikt lengden er kortere enn 100 meter, øker ulykkestallet per strekning jo kortere sikt lengden er. Datapunktene ble punchet og en kurve tilpasset til dem. En eksponentialfunksjon passet godt til datapunktene ($R^2 = 0,8359$).

I vegnormalene er det krav til stoppsikt, møtesikt og forbikjøringsikt. Krav til møtesikt og forbikjøringsikt finnes bare for noen vegklasser. Krav til stoppsikt finnes for alle vegklasser. Kravene varierer mellom 45 og 227 meter.

På grunnlag av undersøkelsene til McBean (1982) og Caliendo (2001) kan det beregnes at en stoppsikt på 45 meter medfører om lag 58 % høyere ulykkesrisiko enn en stoppsikt på 227 meter. En koeffisient på -0,0025 i en eksponentialfunksjon er da brukt. Koeffisienten var -0,002 i undersøkelsen til McBean (1982) og -0,003 i undersøkelsen til Caliendo (2001).

5.15 Stoppsikt lengde i høybrekk

Et høybrekk reduserer sikt lengden. Harwood og Bauer (2015) har undersøkt om ulykkesrisikoen er høyere i høybrekk der stoppsikt krav ikke er oppfylt enn i høybrekk der stoppsikt krav er oppfylt. De undersøkte også hvilken betydning det hadde om det fantes avkjørsler, kryss eller kurver ved et høybrekk og om disse kunne ses av føreren eller ikke. Resultatene er sammenfattet i tabell 5.2.

Tabell 5.2: Betydningen for ulykkestall av om stoppsikt krav ved høybrekk er oppfylt eller ikke og om det finnes avkjørsler, kryss eller kurver innenfor minste stopplengde. Relative ulykkestall (Harwood og Bauer, 2015).

Stoppsikt krav	Relative ulykkestall (1,00 for stoppsikt krav oppfylt og ingen hindre i stoppstrekningen)			
	Synlige hindre i minste stopplengde		Skjulte hindre i minste stopplengde	
	Ingen hindre	Hindre kan ses	Ingen hindre	Skjulte hindre
Oppfylt	1,000	1,477	1,000	1,616
Ikke oppfylt	1,317	1,954	1,234	1,993

Harwood og Bauer (2015) utviklet to ulykkesmodeller: en for synlige hindre i stoppstrekningen og en for skjulte hindre i stoppstrekningen. Ulykkesrisikoen er høyere når kravet til stoppsikt ikke er oppfylt enn når det er oppfylt. Hindre i stoppstrekningen øker ulykkesrisikoen. Hvis stoppsikt kravet ikke er oppfylt og det er hindre i stoppstrekningen øker ulykkesrisikoen til omtrent det dobbelte.

6 En norsk ulykkesmodell

Statens vegvesen, region øst, utga i 2018 rapporten «Risikokurver: Analyse av utforkjøringsrisikofaktorer på 2-felts veger» (Haugvik 2018). I rapporten beskrives hvordan ulykkesrisikoen i horisontalkurver, angitt ved antall ulykker per million passerende kjøretøy, varierer med ulike egenskaper ved kurvene, blant dem radius, avstand til nabokurve, stigning eller fall før kurve og så videre. Disse egenskapene ble studert en-for-en. Det ble ikke gjort noen multivariat analyse eller utviklet noen ulykkesmodell.

Siden datamaterialet var rikholdig og interessant, spurte TØI om det var mulig å få det utlevert. Datagrunnlaget ble utlevert i form av et Excel-regneark som inneholdt data om 63.969 kurver og vegnettet omkring disse kurvene. Til sammen omfatter data et vegnett på ca. 10.000 kilometer. Etter redigering av dataene og omdefinering av en del variabler, ble det utviklet ulykkesmodeller. Målet var å utvikle modeller som dekket flere egenskaper ved horisontalkurver og deres tilgrensende vegnett enn noen tidligere publiserte ulykkesmodeller for horisontalkurver.

Det er utviklet ulykkesmodeller som beskrives i et artikkelmanuskript (Elvik og Haugvik 2022). Her omtales kun hovedpunkter i artikkelmanuskriptet.

6.1 Fordeling av ulykker mellom kurver

Tabell 6.1 viser hvordan antall ulykker varierte mellom kurvene som inngikk i datagrunnlaget.

Tabell 6.1: Ulykkesfordeling mellom kurver.

Antall ulykker	Empirisk fordeling	Poisson fordeling	Negativ binomial fordeling	Poisson lognormal fordeling
0	62632	62528	62632	62623
1	1238	1425	1227	1250
2	81	16	98	77
3	15	0	10	11
4	2	0	1	3
5	1	0	0	1
Sum	63969	63969	63968	63969
Gjennomsnitt	0,02279	$\chi^2 = 442,19$	$\chi^2 = 7,50$	$\chi^2 = 0,92$
Varians	0,02690	Df = 2	Df = 3	Df = 3
Oversprednings parameter	7,90730	P < 0,000	P = 0,058	P = 0,821

Note: Celler der beregnet antall er mindre enn 5 er slått sammen med naboceller ved beregning av Kji-kvadrat

Ulykkesdata dekket hele 12 år: 2006-2017. Likevel hadde det store flertallet av kurver ingen ulykker i denne periode. Ingen kurver hadde mer enn 5 ulykker. Det var likevel ikke «unormalt» mange kurver med 0 ulykker. Den føyde verdien for antall kurver med 0 ulykker i den negative binomialfordelingen er nøyaktig likt det faktiske antall kurver med 0 ulykker. 84,7 % av variasjonen i ulykestall mellom kurver er tilfeldig, 15,3 % er systematisk.

6.2 Beskrivelse av variabler inkludert i ulykkesmodeller

Tabell 6.2 beskriver variabler som inngikk i ulykkesmodellene som ble utviklet.

Tabell 6.2: Beskrivelse av variabler som inngikk i ulykkesmodeller.

Variabler	Minimum	Maksimum	Gjennomsnitt	Standardavvik
Antall ulykker	0	5	0,02279	0,16401
Årsdøgntrafikk (ÅDT)	6	29550	1506	2435
Kurveradius (meter)	7	696	261	166
Kurvelengde (meter)	11	820	98	66
Klotoidelengde (meter)	0	012	23	51
Rettstrekning før kurve (meter)	1	6960	90	177
Dummy for eggkurve (#)	0	1	0,17	0,37
Dummy for fall før kurve	0	1	0,46	0,50
Dummy for stigning før kurve	0	1	0,49	0,50
Fall før kurve (%)	0,0	-13,8	-1,2	2,1
Stigning før kurve (%) (§)	0,0	14,8	1,3	2,4
Antall kurver før kurve	0	19	2,22	2,39
Strekninglengde for opptelling av kurver (*)	0	1999	1558	643
Overhøyde i kurve (%)	0,0	17,9	3,6	2,2
Variasjon i overhøyde i kurve (%) (£)	0,0	70,9	5,6	4,0
Dummy for tilstrekkelig tverrfall før kurve	0	1	0,70	0,46
Dummy for tilstrekkelig tverrfall i kurve	0	1	0,63	0,48
Sporddybde (millimeter)	0,3	1628,6	6,9	8,3
Ujevnhet (IRI)	0,46	7,59	2,93	1,31

(#) I en eggkurve varierer radius gjennom kurven

(§) To verdier på 208 antas å være feil, siden en stigning ikke kan overstige 90 grader (den er da loddrett)

(*) Denne variabelen inngår ikke i ulykkesmodellene

(£) Verdien på 70,9 virker urimelig.

Vi ser blant annet at kurvene ligger tett. Gjennomsnittlig lengde på rettstrekning før kurve er bare 90 meter. Nesten alle kurver har enten fall eller stigning før kurven (summen av 0,46 og 0,49 = 0,95, det vil si 95 % av kurvene). Flertallet av kurver oppfyller krav til tverrfall både før kurven og i kurven.

6.3 Resultater i beregnede ulykkesmodeller

Ulykkesmodeller ble utviklet ved negativ binomial regresjon, kjørt med versjon 17 av Stata. Beregnede koeffisienter er vist i tabell 6.3 på neste side.

De fleste resultater er i samsvar med det som er funnet i tidligere undersøkelser. Noen forskjeller er likevel verdt å kommentere. Ulykkesrisikoen har sterkere sammenheng med kurveradius enn i utenlandske undersøkelser. Medianverdien for ulykkesrisiko i en kurve med radius 50 meter, når risikoen settes lik 1,00 i en kurve med radius 600 meter, er 3,76 når alle undersøkelser medregnes, men 7,11 i denne undersøkelsen. Avbøyningsvinkel ser også til å påvirke ulykkesrisikoen sterkere i Norge enn i andre land. Settes risikoen til 1,00 ved en avbøyningsvinkel på 30 grader, er den 2,56 ved en avbøyningsvinkel på 100 grader når alle undersøkelser ses under ett, men 4,24 i denne undersøkelsen. Når lengden av en kurve øker fra 50 til 600 meter, øker ulykkesrisikoen fra 1,00 til 8,08 når alle undersøkelser ses under ett, men fra 1,00 til 19,72 i denne undersøkelsen.

Lengde av rett strekning før en kurve betyr derimot mindre for risikoen i Norge enn i andre land. Når alle undersøkelser ses under ett, øker risikoen i en kurve fra 1,00 til 1,38 når lengden av den rette strekningen før kurven øker fra 100 meter til 1 kilometer. I Norge er økningen i ulykkesrisiko fra 1,00 til 1,21.

Blant de mer overraskende resultater, er at eggkurver har lavere ulykkesrisiko enn kurver der radius er konstant gjennom kurven. Her viste den enkle bivariate sammenhengen motsatt tendens, men fortegnet for eggkurver ble negativt når andre variabler ble tatt inn i modellen.

Resultatene for stigninger må også kalles uventede. Eksistensen av en stigning eller et fall øker ulykkesrisikoen med ca. 55 %. Men jo brattere stigningen eller fallet er, desto mindre er økningen i risiko. Denne tendensen strider mot det de fleste andre undersøkelser har funnet.

Overhøyde i kurver reduserer ulykkesrisikoen. Variasjon i overhøyde gjennom en kurve øker ulykkesrisikoen. Den kombinerte virkningen av de to faktorene er trolig økt ulykkesrisiko, fordi gjennomsnittlig variasjon i overhøyde gjennom en kurve (5,6 %) har en høyere verdi enn gjennomsnittlig overhøyde (3,6 %). De fleste kurver har en tilstrekkelig overhøyde, men denne varierer gjennom kurven. Dersom variasjonene er store og brå, kan dette gjøre det vanskeligere å styre gjennom kurven.

Overgangskurver (klotoider) reduserer ulykkesrisikoen i kurver; mer jo lengre de er. Spor i vegdekket ser ut til å ha liten betydning for ulykkesrisiko i kurver. Ujevnhet, angitt ved International Roughness Index (IRI) ser ut til å redusere ulykkesrisikoen. Dette resultatet er i samsvar med en tidligere norsk undersøkelse (Christensen og Ragnøy 2006).

Tabell 6.3: Ulykkesmodeller for horisontalkurver på tofeltsveger i region øst av Statens vegvesen (før regionreform i 2020).

Terms	Koeffisienter (standardfeil) [P-verdi]			
	Modell 1	Modell 2	Modell 3	Modell 4
Konstantledd	-8,3634 (0,1780) [0,000]	-11,2031 (0,3916) [0,000]	-11,0180 (0,4540) [0,000]	-9,1536 (0,5830) [0,000]
Ln (ÅDT)	0,6526 (0,0238) [0,000]	0,6677 (0,0244) [0,000]	0,6458 (0,0246) [0,000]	0,5825 (0,0271) [0,000]
Ln (kurveradius)		-0,6901 (0,0463) [0,000]	-0,7359 (0,0467) [0,000]	-0,7894 (0,0530) [0,000]
Ln (kurvelengde)		1,2968 (0,0662) [0,000]	1,3050 (0,0659) [0,000]	1,1999 (0,0701) [0,000]
Ln (klotoidelengde)		-0,0379 (0,0383) [0,322]	-0,0490 (0,0386) [0,204]	-0,0413 (0,0391) [0,290]
Ln (rettstrekning før kurve)		0,1267 (0,0215) [0,000]	0,0967 (0,0221) [0,000]	0,0823 (0,0222) [0,000]
Dummy for eggkurve		-0,3594 (0,0785) [0,000]	-0,3667 (0,0784) [0,000]	-0,3267 (0,0784) [0,000]
Fall før kurve (%)			0,0176 (0,0183) [0,337]	0,0052 (0,0194) [0,790]
Stigning før kurve (%)			-0,0625 (0,0200) [0,002]	-0,0537 (0,0211) [0,011]
Dummy for fall før kurve			0,5592 (0,2456) [0,023]	0,4513 (0,2651) [0,089]
Dummy for stigning før kurve			0,5385 (0,2460) [0,029]	0,4285 (0,2654) [0,106]
Overhøyde i kurve (%)				-0,0234 (0,0155) [0,132]
Variasjon i overhøyde (%)				0,0194 (0,0075) [0,010]
Antall kurver før kurve				-0,0687 (0,0147) [0,000]
Dummy for tilstrekkelig tverrfall før kurve				0,0751 (0,0692) [0,278]
Dummy for tilstrekkelig tverrfall i kurve				-0,1676 (0,0717) [0,019]
Spordybde (millimeter)				0,0018 (0,0020) [0,351]
Ujevnhet (IRI)				-0,2113 (0,0348) [0,000]
Overspredningsparameter	4,4454 (0,5125) [0,000]	1,9824 (0,2791) [0,000]	1,9179 (0,2721) [0,000]	1,7331 (0,2600) [0,000]
Elvik indeks	0,4378	0,7493	0,7575	0,7808

7 Sammensatte mål på linjeføring – linjeføringsklasser

I noen studier er det utviklet sammensatte mål på linjeføring, der horisontal og vertikal linjeføring er kombinert. Ulike kombinasjoner av verdier er gruppert og danner linjeføringsklasser. Studier der linjeføringsklasser ble definert, ble først gjort i Sverige. I dette kapitlet oppsummeres kunnskap om forskjeller i trafikksikkerhet mellom vegger som tilhører ulike linjeføringsklasser. Kunnskapsoppsummeringen bygger på følgende undersøkelser:

Brüde og Nilsson 1976 (Sverige)
 Brüde og Larsson 1977 (Sverige)
 Nordtyp projektgruppen 1980 (Danmark)
 Björketun 1991 (Sverige)
 Björketun 2003 (Sverige)
 Ng og Sayed 2004 (Canada)
 Montella 2009 (Italia)
 Rengarasu mfl. 2009 (Japan)
 Cafiso mfl. 2010 (Italia)
 Montella 2010 (Italia)
 Venkataraman mfl. 2011 (USA)
 Abdel-Rahim og Khan 2012 (USA)
 Camacho-Torregrosa mfl. 2013 (Spania)
 Ye mfl. 2013 (USA)
 Gates mfl. 2015 (USA)
 Garach mfl. 2016 (Spania)
 Mothafer mfl. 2017 (USA)
 Rusli mfl. 2017 (Malaysia)
 Zou mfl. 2018 (USA)
 Hamilton mfl. 2019 (USA)
 Cafiso mfl. 2021 (Italia)

Resultater fra hver undersøkelse presenteres kort. Deretter sammenlignes og oppsummeres resultatene av undersøkelsene.

Brüde og Nilsson (1976) definerte tre linjeføringsklasser som vist i tabell 7.1.

Tabell 7.1: *Linjeføringsklasser (Brüde og Nilsson 1976).*

Kurveradius (m)	Stigning (promille)				Høybrekk
	0-10	10-20	20-30	>30	
Rett strekning	1	1	1	2	1
>1000	1	1	1	2	1
700-1000	2	2	2	2	2
400-700	2	2	2	3	2
200-400	3	3	3	3	3
<200	3	3	3	3	3

Verdiene for kurveradius og stigning er minimumsverdier for en gitt strekning. Hvis, for eksempel, minste kurveradius er 450 meter og største stigning mellom 20 og 30 promille, tilhører vegen linjeføringsklasse 2. Sammenligning av ulykkesrisiko på vegger i ulike linjeføringsklasser viste at vegger i

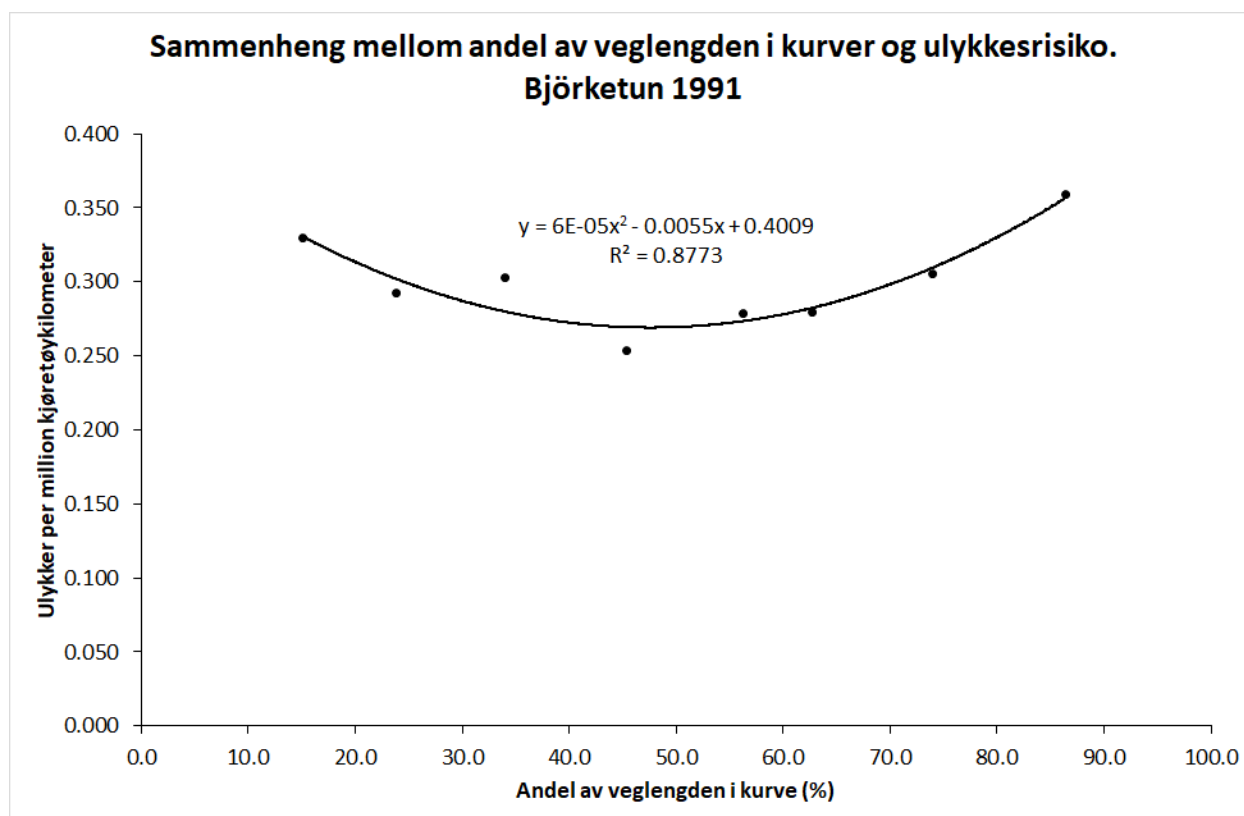
linjeføringsklasse 2 hadde 23 % lavere ulykkesrisiko enn veger i linjeføringsklasse 3. Veger i linjeføringsklasse 1 hadde 14 % lavere ulykkesrisiko enn veger i linjeføringsklasse 2. Dersom forskjellene i risiko kombineres multipliktivt, betyr dette at veger i linjeføringsklasse 1 har 34 % lavere ulykkesrisiko enn veger i linjeføringsklasse 3.

Brüde og Larsson (1977) benyttet en litt grovere inndeling i linjeføringsklasser, men høyeste linjeføringsklasse var definert på samme måte som i Brüde og Nilsson (1976). De sammenlignet ulykkesrisiko for tre grupper av veger: (1) Veger der inntil 60 % av lengden var i linjeføringsklasse 1, veger der 60-90 % av lengden var i linjeføringsklasse 1, og (3) veger der mer enn 90 % av lengden var i linjeføringsklasse 1. Siden ingen av gruppene består utelukkende veger som tilhører en bestemt linjeføringsklasse, må man vente mindre forskjeller i ulykkesrisiko mellom de tre gruppene enn det Brüde og Nilsson fant mellom de tre linjeføringsklassene. Dette viste seg å være tilfellet. Veger i gruppe 2 (60-90 % i linjeføringsklasse 1) hadde 12 % lavere ulykkesrisiko enn veger i gruppe 1 (under 60 % i linjeføringsklasse 1). Veger i gruppe 3 (mer enn 90 % i linjeføringsklasse 1) hadde 7 % lavere ulykkesrisiko enn veger i gruppe 2. Veger i gruppe 3 hadde 19 % lavere ulykkesrisiko enn veger i gruppe 1.

En sammenligning av ulykkesrisiko på veger i ulike linjeføringsklasser i Danmark (**Nordtyp projektgruppen 1980**) viste at veger i klasse 2 (midterste) hadde 17 % lavere ulykkesrisiko enn veger i klasse 3 (dårligste). Veger i klasse 1 (beste) hadde 18 % lavere ulykkesrisiko enn veger i klasse 2 (midterste). Veger i klasse 1 hadde 32 % lavere ulykkesrisiko enn veger i klasse 3. Disse resultatene ligger svært nær det Brüde og Nilsson (1976) fant for Sverige.

Björketun (1991) oppga detaljerte data for 121 vegstrekninger. Disse ble delt i tre grupper ut fra andelen av veglengden som lå i horisontalkurver: (1) mer enn 60 % av vegen i horisontalkurve, (2) mellom 40 og 60 % av vegen i horisontalkurve, og (3) mindre enn 40 % av vegen i horisontalkurve. Ulykkesrisikoen i gruppe 2 var 4 % lavere enn i gruppe 1. Ulykkesrisikoen i gruppe 3 var 13 % lavere enn i gruppe 2. Ulykkesrisikoen i gruppe 3 var 16 % lavere enn i gruppe 1. Björketun fant en interessant sammenheng mellom andel av veglengden som ligger i horisontalkurver og ulykkesrisiko. Denne sammenhengen er vist i figur 7.1.

Ulykkesrisikoen har en U-formet sammenheng med andelen av veglengden i kurver. Risikoen når et minimum når omtrent halvparten av veglengden ligger i kurver. Den øker når andelen i kurver er høyere eller lavere. Når en lav andel av veglengden er i kurver, kan hver kurve være mer overraskende enn når en høyere andel av veglengden er i kurver. Det ser ut til at ulykkesrisikoen øker også når en svært høy andel av vegen er kurver. På en slik veg vil ofte kurvene følge tilnærmet kontinuerlig etter hverandre, trolig ofte i motsatte retninger. Kravene til oppmerksomhet, fartstilpasning og styring øker da.



Figur 7.1: Sammenheng mellom andel av veglengden i kurver og ulykkesrisiko (Björketun 1991).

Björketun (2003) definerte nye linjeføringsklasser. For horisontalkurvatur var høyeste klasse en brytning på mindre enn 0,5 radianer per kilometer. En radian er en kurve som er like lang som kurvens radius. Den har en avbøyningsvinkel på 57,3 grader. Et krav om høyst 0,5 radianer innebærer følgelig at summen av retningsendringer per kilometer veg skal være mindre enn 28,6 grader. Midterste klasse var brytning på mellom 0,5 og 1,25 radianer per kilometer. Laveste klasse var brytning på mer enn 1,25 radianer per kilometer. For vertikalkurvatur var høyeste klasse høydeforskjell på mindre enn 10 meter per kilometer veg. Midterste klasse var høydeforskjell på mellom 10 og 30 meter per kilometer veg. Laveste klasse var høydeforskjell på mer enn 30 meter per kilometer veg.

Björketun brukte programmet GENMOD i SAS til å utvikle en ulykkesmodell. Dette er en negativ binomial regresjonsmodell, selv om SAS misvisende nok ikke bruker en slik betegnelse. Ifølge ulykkesmodellen har veger i høyeste klasse for horisontal linjeføring 16 % lavere ulykkesrisiko enn veger i laveste klasse. Veger i midterste klasse har 12 % lavere ulykkesrisiko enn veger i lavesteklasse. For vertikal linjeføring, har veger i laveste klasse 17 % lavere ulykkesrisiko enn veger i høyeste klasse. Veger i midterste klasse har 12 % lavere ulykkesrisiko enn veger i høyeste klasse. Kombinerer man horisontal og vertikal linjeføring, har veger i midterste klasse for begge variabler 23 % lavere ulykkesrisiko enn veger i høyeste klasse for begge variabler. Veger i høyeste klasse for horisontal og vertikal linjeføring har 30 % lavere ulykkesrisiko enn veger i laveste klasse på begge variabler.

Ng og Sayed (2004) benyttet to ulykkesmodeller til å beregne forventet ulykkestall på en veg med dimensjonerende fart 70 km/t sammenlignet med en veg med dimensjonerende fart 100 km/t. Vegen med den høyeste dimensjonerende farten hadde minste horisontalkurve radius på 440 meter, mot 190 meter på vegen med den laveste dimensjonerende farten. De to vegene tilsvarer tilnærmet høyeste og laveste klasse for linjeføring slik dette er definert i studiene som er sitert over. Ifølge den ene av ulykkesmodellene var forventet ulykkestall 6 % lavere ved dimensjonerende fart 100 km/t enn ved dimensjonerende fart 70 km/t. Den andre ulykkesmodellen viste større forskjell. Vegen med dimensjonerende

fart 100 km/t hadde ifølge denne modellen 11 % lavere ulykkesrisiko enn vegen med dimensjonerende fart 70 km/t. Sistnevnte resultat er mest i samsvar det andre undersøkelser har funnet.

Montella (2009) utviklet en ulykkesmodell som ledd i en undersøkelse av virkninger av vegoppmerking i kurver. Som mål på «design consistency» (hvor enhetlig linjeføringen er) brukte han endring i 85 % fraktil fart (Δv_{85}). Det oppgis ikke hvilke verdier som ble funnet for denne variabelen, men ved tolkning av undersøkelsen er det forutsatt at en fartsendring på 5 km/t representerer god linjeføring, 10 km/t middels linjeføring og 15 km/t dårlig linjeføring. Variabelen ble benyttet med positivt fortegn, selv om fartsendringen er en reduksjon. Overgang fra laveste til midterste klasse for linjeføring ble beregnet å redusere antall ulykker med 20 %. Ved å gå fra midterste til høyeste linjeføringsklasse ble det beregnet en ulykkesreduksjon på 20 %. Overgang fra laveste til høyeste linjeføringsklasse ble beregnet å redusere ulykkestallet med 37 %.

Rengarasu mfl. (2009) utviklet en ulykkesmodell for veger i Japan. Som mål på linjeføring benyttet de «bendiness» (krumningsgrad; vegens brytning) som var angitt i grader per kilometer og hadde en gjennomsnittsverdi på 8,73 og en maksimumsverdi på 295,22. Her er verdier på 4,36, 8,73 og 30,73 (gjennomsnitt pluss et standardavvik) brukt til å indikere god, middels og dårlig linjeføring. Overgang fra dårlig til god linjeføring ble beregnet å redusere antall ulykker med 8 %.

Cafiso mfl. (2010) utviklet ulykkesmodeller for tofeltsveger i Italia. Som mål på linjeføringsstandard ble standardavviket til farten benyttet. Dette ble beregnet på følgende måte:

$$\text{Standardavvik til fart (km/t)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_{85} - V_{avg})^2}{n}}$$

Differansen mellom 85 % fraktil fart og gjennomsnittsfart (V_{avg}) ble beregnet og kvadrert. Verdiene ble summert for alle deler av en strekning som hadde samme linjeføring (n) og dividert med antall delstrekninger. Deretter ble kvadratroten av uttrykket regnet ut. Standardavviket hadde en gjennomsnittsverdi på 6,98 og et standardavvik på 5,13. Verdier på 1,85, 6,98 og 12,11 er brukt for å indikere god, middels og dårlig linjeføring. Veger med god linjeføring har da 51 % lavere ulykkesrisiko enn veger med dårlig linjeføring.

Montella (2010) utviklet en ulykkesmodell som hjelp til å kunne utpeke ulykkesbelastede steder. Endring av 85 % fraktil fart ble brukt som mål på «design consistency». Som i undersøkelsen fra 2009, er verdier på 5, 10 eller 15 km/t benyttet som indikatorer på god, middels eller dårlig linjeføring. Høyeste linjeføringsklasse ble beregnet å ha 40 % lavere ulykkesrisiko enn laveste linjeføringsklasse.

Venkataraman mfl. (2011) utviklet en ulykkesmodell der linjeføring ble angitt ved antall horisontalkurver per strekning. Dette varierte mellom 0 og 37 med et gjennomsnitt på 1,805 og et standardavvik på 2,458. Ved anvendelse av modellen er verdier på 0,91, 1,81 og 4,26 benyttet til å indikere god, middels og dårlig linjeføring. Veger med god linjeføring har da 13 % lavere ulykkesrisiko enn veger med dårlig linjeføring.

Abdel-Rahim og Khan (2012) skilte mellom veger med mange kurver, veger med noen kurver og veger med få kurver. Veger med få kurver hadde 38 % lavere ulykkesrisiko enn veger med mange kurver.

Camacho-Torregrosa mfl. (2013) utviklet en modell for «design consistency» for veger i Spania. Design consistency kan oversettes med «enhetlig linjeføring». En veg har enhetlig linjeføring dersom, for eksempel, alle horisontalkurver har tilnærmet samme radius. Linjeføringen er uensartet dersom noen kurver er krappe og andre er slake. Som mål på hvor ensartet linjeføringen er, fant de at følgende var best:

$$\text{Mål på enhetlig linjeføring} = C = \frac{\bar{v}_{85}^2}{\Delta v_{85}}$$

Her er \bar{v}_{85} den gjennomsnittlige 85 % fraktil farten. Denne kvadreres og divideres med gjennomsnittlig fartsendring (reduksjon) (Δ) i kurver. Ulykkesrisikoen på en veg er gitt ved:

$$\text{Ulykkesrisiko} = \frac{1}{2,40939 + 0,00403287 \cdot C}$$

På norske veger med fartsgrense 80 km/t var 85 % fraktilfarten i 2021 83,8 km/t. Kvadrert er dette 7022,4. Dividert med fartsendringer fra 5 til 30 km/t, får C verdier fra 1404,5 til 234,1. Jo høyere verdi av C, desto mer enhetlig linjeføring. I undersøkelsen til Camacho-Torregrosa mfl. Ligger de fleste verdiene av C mellom 200 og 1000. Dersom 100 representerer god linjeføring, 600 middels og 900 dårlig, vil veger med god linjeføring ha 48 % lavere ulykkesrisiko enn veger med god linjeføring. Veger med middels linjeføring vil ha 34 % lavere ulykkesrisiko enn veger med god linjeføring.

Ye mfl. (2013) utviklet ulykkesmodeller for ulykker med ulik skadegrad på motorveger. Som mål på linjeføring benyttet de maksimal sentralvinkel på en strekning. Denne variabelen hadde en gjennomsnittsverdi på 30,29 og et standardavvik på 23,88. Maksimum var 111,49. I ulykkesmodellen ble disse verdiene dividert med 100. Koeffisienten for sentralvinkelvariabelen var 0,2083 for ulykker med materiell skade, 0,3267 for ulykker med «mulig personskaade» («possible injury») og 0,9549 for personskaadeulykker (inkludert dødsulykker). Sistnevnte koeffisient er benyttet her. Som verdier på sentralvinkel er benyttet 0,06 (gjennomsnitt minus et standardavvik, 0,30 (gjennomsnitt) og 0,54 (gjennomsnitt pluss et standardavvik). Veger i høyeste linjeføringsklasse (0,06) hadde 37 % lavere ulykkesrisiko enn veger i laveste linjeføringsklasse (0,54).

Gates mfl. (2015) utviklet ulykkesmodeller for veger som hadde høy fartsgrense, men ikke var motorveger. Som mål på linjeføring benyttes her andelen av en vegstrekning der minste horisontalkurveradius er mindre en 1922 fot. Det tilsvarer 586 meter. To resultater er trukket ut av undersøkelsen. Det ene gjelder veger med midtdeler, det andre veger uten midtdeler. For veger med midtdeler er 3 %, 6 % og 27 % av lengden med radius under kritisk verdi betraktet som god, middels og dårlig linjeføring. Veger med god linjeføring har da 15 % lavere ulykkesrisiko enn veger med dårlig linjeføring. På veger uten midtdeler er 2 %, 4 % og 17 % av lengden med radius under kritisk verdi betraktet som god, middels og dårlig linjeføring. Veger med god linjeføring ble beregnet å ha 3 % lavere ulykkesrisiko enn veger med dårlig linjeføring. Disse forskjellene i ulykkesrisiko er mindre enn andre undersøkelser har funnet.

Garach mfl. (2016) utviklet ulykkesmodeller for tofeltsveger i Spania. De benyttet et «design consistency» mål utviklet av Polus og Mattar-Habib som er definert slik:

$$\text{Design consistency} = 2,808 \cdot e^{-0.278 \left[R_a \left(\frac{\sigma}{3.6} \right) \right]}$$

Her er R_a et område der farten påvirkes av kurvaturen, σ er standardavviket til farten. Målet er definert slik at verdier over 2 angir god linjeføring, verdier mellom 1 og 2 angir middels linjeføring og verdier under 1 angir dårlig linjeføring. Veger med god linjeføring hadde 21 % lavere ulykkesrisiko enn veger med dårlig linjeføring.

Mothafer mfl. (2017) utviklet en ulykkesmodell der antall horisontalkurver per strekning ble brukt som linjeføringsmål. Gjennomsnittet var 1,57 og standardavviket 1,51. Verdier på 0,06, 1,57 og 3,08 er brukt som indikatorer på god, middels og dårlig linjeføring. Veger med god linjeføring kan beregnes å ha 32 % lavere ulykkesrisiko enn veger med dårlig linjeføring.

Rusli mfl. (2018) utviklet en ulykkesmodell for veger i fjellterreng i Malaysia. Maksimal kurveradius per kilometer veg ble brukt som mål på linjeføring. Verdier på 0,42, 0,84 og 1,80 angir god, middels og dårlig linjeføring. Veger med god linjeføring ble beregnet å ha 22 % lavere ulykkesrisiko enn veger med dårlig linjeføring.

Zou mfl. (2018) utviklet ulykkesmodeller for to stater i USA. Antall horisontalkurver per strekning ble brukt som mål på linjeføring. Verdier på 0,71, 1,43 og 3,78 er benyttet for å indikere god, middels og dårlig linjeføring. Veger med god linjeføring hadde 19 % lavere ulykkesrisiko enn veger med dårlig linjeføring.

Hamilton mfl. (2019) benyttet en variabel de kalte «modified curvature change rate» som mål på linjeføringskvalitet. Curvature change rate er det som kalles veges brytning på norsk. Tradisjonelt angis det som summen av alle retningsendringer regnet i nygrader per kilometer veg. I nygrader er en rett vinkel 100 grader, ikke 90 grader. Det modifiserte målet på vegens brytning som benyttes av Hamilton mfl. (2019) er retningsendring i fot per fot. Jo høyere verdi dette målet har, desto mer uensartet er linjeføringen, det vil si at slake kurver følges av krappe kurver, eller omvendt. Variabelen har i deres data-materiale et gjennomsnitt på 1,45, en minsteverdi på ca. 0,1 og en maksimumsverdi på nesten 30. Standardavviket er ca. 1,8.

Hvis vi antar at 0,1 representerer god linjeføring, 1,5 middels linjeføring og 5 dårlig linjeføring (gjennomsnitt pluss 1,96 ganger standardavviket), er predikert antall personskadeulykker (negativ binomial regresjon) 48 % lavere med god linjeføring enn med dårlig og 37 % lavere med middels linjeføring enn med god.

Cafiso mfl. (2021) bruker vegens brytning som mål på linjeføring. En veg som har en kurve som tilsvarer en radian per kilometer veg (57,3 grader = 63,7 nygrader) har en verdi på 63,7 for vegens brytning. Hvis det forutsettes at en verdi på 100 er god linjeføring, 300 middels og 600 dårlig linjeføring, kan det på grunnlag av en ulykkesmodell utviklet av Cafiso mfl. (2021) beregnes at en veg med god linjeføring har 39 % lavere ulykkesrisiko enn en veg med dårlig linjeføring. En veg med middels linjeføring har 26 % lavere ulykkestall enn en veg med dårlig linjeføring.

Tabell 7.2 oppsummerer resultatene av de undersøkelsene som er gjennomgått over. Undersøkelsen til Brüde og Larsson (1977) er ikke inkludert, siden de tre gruppene av veger som der ble sammenliknet ikke tilhørte en bestemt linjeføringsklasse, men bestod av en blanding av veger i ulike linjeføringsklasser.

Tabell 7.2: Beregnet endring i ulykkesrisiko (prosent) i ulike undersøkelser ved å gå fra lavere til høyere linjeføringsklasser.

Undersøkelse	Fra laveste til mellomste linjeføringsklasse	Fra mellomste til høyeste linjeføringsklasse	Fra laveste til høyeste linjeføringsklasse
Brüde, Nilsson 1976	-23	-14	-34
Nordtypgruppen 1980	-17	-18	-32
Björketun 1991	-4	-13	-16
Björketun 2003	-9	-23	-30
Ng og Sayed 2004			-11
Montella 2009	-20	-20	-37
Rengarasu mfl. 2009	-6	-2	-8
Cafiso mfl. 2010	-30	-30	-51
Montella 2010	-23	-23	-40
Venkataraman mfl. 2011	-10	-4	-13
Abdel-Rahim og Khan 2012	-13	-29	-38
Camacho-Torregrosa mfl. 2013	-21	-34	-48
Ye mfl. 2013	-21	-20	-37
Gates mfl. 2015	-13	-2	-15
Gates mfl. 2015	-3	-0	-3
Garach mfl. 2016	-11	-11	-21
Mothafer mfl. 2017	-18	-18	-32
Rusli mfl. 2018	-7	-16	-22
Zou mfl. 2018	-15	-5	-19
Hamilton mfl. 2019	-17	-37	-48
Cafiso mfl. 2021	-18	-26	-39
Gjennomsnitt (uvektet)	-15	-17	-28

Resultatene av de ulike undersøkelsene er meget konsistente. Det er en viss variasjon i beregnet prosentvis endring i ulykkesrisiko ved gå fra en lavere til en høyere linjeføringsklasse, men alle resultater viser samme fortegn. I gjennomsnitt er virkningen av å gå fra mellomste til høyeste linjeføringsklasse litt større enn virkningen av å gå fra laveste til mellomste linjeføringsklasse. Ved å gå fra laveste til høyeste linjeføringsklasse, kan ulykkesrisikoen reduseres med omkring 25-30 %. Tallene for gjennomsnittlig virkning er uvektede gjennomsnitt, fordi ikke alle undersøkelser oppga opplysninger som gjorde det mulig å beregne en statistisk vekt.

8 Diskusjon og konklusjoner

8.1 Metoder for kunnskapsoppsummering

Det finnes mange undersøkelser om vegers linjeføring og trafikksikkerhet. De aller fleste av disse undersøkelsene er utført med samme metode: multivariat regresjon, i de aller fleste tilfeller negativ binomial regresjon. En skulle derfor tro at ulike undersøkelser var tilstrekkelig lik hverandre til at resultatene av dem kan oppsummeres med vanlige teknikker for meta-analyse.

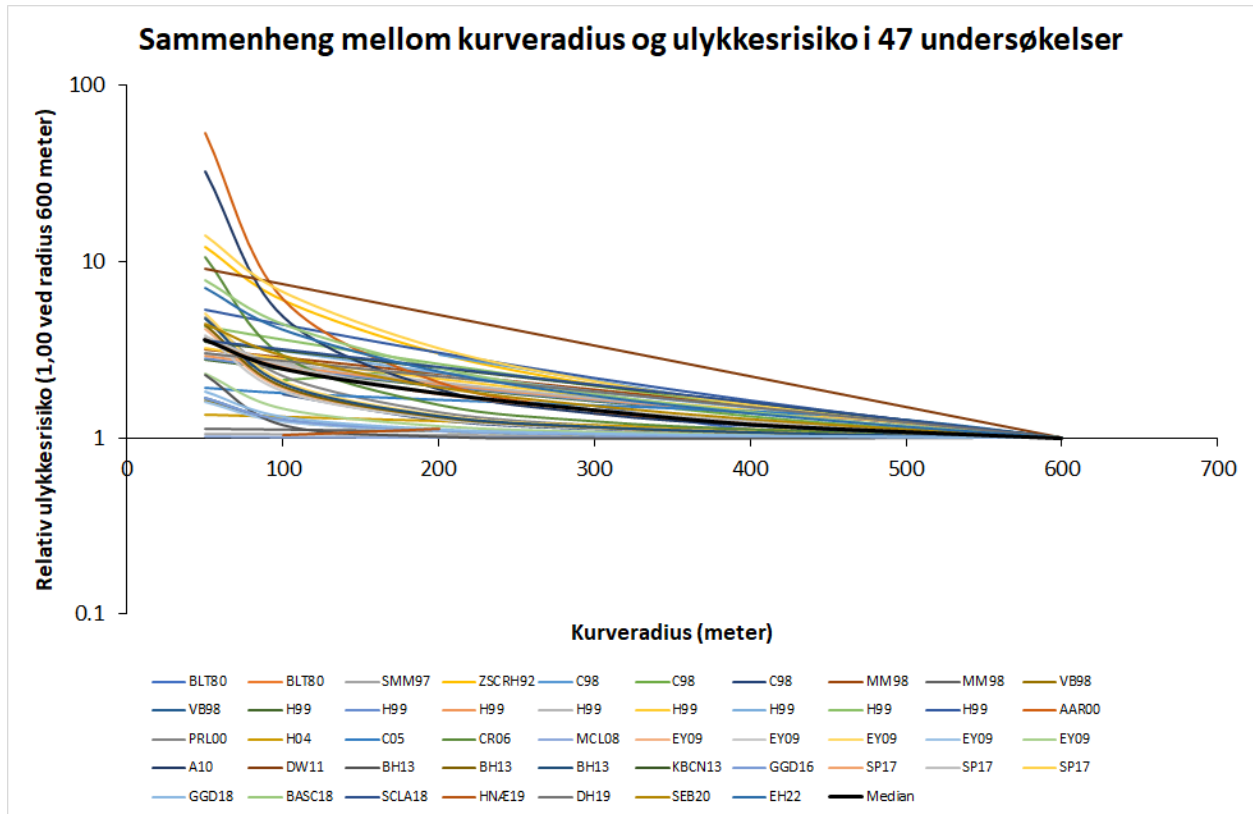
Dessverre er dette ikke mulig. Det er to hovedgrunner til det. For det første definerer ikke alle undersøkelser aktuelle variabler likt. Den mest undersøkte variabelen, radius i horisontalkurver, er definert på mange måter: radius i meter, $1/\text{radius}$ i meter, radius i fot og «degree of curve» (krumningsgrad per lengdeenhet). Regresjonskoeffisienter som gjelder en definisjon av variabelen kan ikke uten videre omregnes til en annen definisjon. I studier som gjelder vegstrekninger, kan koeffisienter som gjelder strekningens lengde i miles omregnes til kilometer og vice versa. Men de ulike definisjonene av kurveradius kan ikke oversettes til hverandre. Radius i meter og degree of curve går i motsatte retninger. Jo mindre radius, desto krappere kurve. Dersom liten radius øker ulykkesrisikoen, bør koeffisienten for kurveradius være negativ. Degree of curve (som matematisk er definert som vinkelen i grader til en bue avsatt over en lengde på 100 fot) øker jo mindre radius en kurve har (fordi gradtallet til en bue av en gitt lengde da øker). Dersom kurver med liten radius har høy ulykkesrisiko, bør koeffisienten for degree of curve være positiv.

Det er mulig å omregne degree of curve til radius i meter. Dette er mulig fordi degree of curve refererer til en bue av gitt lengde. Koeffisienter i studier som gjelder degree of curve er derfor benyttet på variabelen degree of curve til å beregne en funksjonssammenheng mellom degree of curve og ulykkestall. Resultatene er deretter oversatt til radius i meter. En radius på 600 meter tilsvarer degree of curve på 2,91 grader. En radius på 50 meter tilsvarer degree of curve på 34,96. Ved hjelp av slike omregninger er det for hver undersøkelse beregnet en funksjonssammenheng mellom kurveradius og ulykkestall. Ulykkestallene ble så omregnet til relative ulykkestall, der ulykkestallet ved en radius på 600 meter ble satt lik 1,00.

Ideelt sett skulle hver slik funksjon ha blitt tilordnet en statistisk vekt som reflekterer usikkerheten i funksjonen. Denne usikkerheten vises ved standardfeilen til regresjonskoeffisienten. Men siden standardfeilen, i likhet med koeffisienten, avhenger av variabeldefinisjonen, er heller ikke den sammenlignbar mellom ulike undersøkelser. Den andre grunnen til at vanlige teknikker for meta-analyse ikke er benyttet, er at resultatene ikke kan tilordnes statistiske vekter som viser deres usikkerhet. I noen undersøkelser (for eksempel Cardoso 2005 og Montella et al. 2008) er ikke standardfeilen til regresjonskoeffisientene oppgitt og usikkerheten i disse er derfor ukjent.

Tilnæringsmåten som ble valgt, var at koeffisientene for hver variabel i hver undersøkelse ble brukt til å beregne en funksjonssammenheng mellom vedkommende variabel og antall ulykker. Disse funksjonssammenhengene ble så oppsummert ved å beregne deres medianverdi. Begrunnelsen for å velge medianverdien, var at dette kan betraktes som en representativ verdi siden halvparten ligger lavere og halvparten høyere.

Figur 8.1 viser 47 kurver som beskriver sammenhengen mellom horisontalkurveradius og ulykkestall, samt medianverdien av disse kurvene.



Figur 8.1: Sammenheng mellom horisontalkurveradius og ulykkestall.

Mediankurven går midt inne i svermen av kurver, slik den per definisjon skal. Den synes å gi en god oppsummering av hovedtendensen i resultatene ned til en kurveradius på ca. 150 meter. Med «god oppsummering» menes at mediankurven (tykk svart) ligger i midten, med like stor avstand til ytterste kurve over som til ytterste kurve under.

Fra ca. 150 begynner resultatene å sprike mer. Ved kurveradius 50 meter finnes det noen resultater som ligger betydelig lengre over mediankurven enn de laveste resultatene ligger under den. Merk at den loddrette aksene i figur 8.1 er tegnet med logaritmisk skala. De fire høyeste anslagene på risiko ved en radius på 50 meter påvirker gjennomsnittet betydelig, men har ingen betydning for medianverdien.

Det er stor grad av konsistens mellom ulike undersøkelser når det gjelder retningen på sammenhengen mellom horisontalkurveradius og ulykkestall. Alle kurver unntatt to viser en negativ sammenheng: jo lavere radius, desto høyere ulykkestall.

Resultatene er noe mindre konsistente når det gjelder formen på funksjonssammenhengen. Det kan skilles mellom tre funksjonsformer:

1. En negativ sammenheng, der kurven blir brattere jo mindre kurveradius er. 32 av de 47 funksjonene er av denne typen.
2. En negativ sammenheng, der kurven er tilnærmet like bratt uansett kurveradius. 15 av de 47 funksjonene er av denne typen.

Mediankurven er av type 1. Selv om denne funksjonsformen ikke er riktig for alle kurver, er den riktig for flertallet (riktig for 32 av 47 = 68,1 %).

Alle kurver viser økende ulykkesrisiko når radius synker. Slik sett er resultatene helt konsistente, men som figur 8.1 viser, spriker økningen i ulykkesrisiko med synkende radius en god del i undersøkelsene. Økningen i ulykkesrisiko med synkende kurveradius har sammenheng med hvor godt undersøkelsene har kontrollert for andre forhold som påvirker ulykkesrisikoen i kurver. Når alle undersøkelser inkluderes, er medianverdien for relativ ulykkesrisiko i kurver med radius 50 meter på 3,58. Gjennomsnittet

er 5,99. Dersom bare undersøkelser som har kontrollert for minst 10 variabler i tillegg til radius inkluderes, er medianverdien for relativ risiko i kurver med radius 50 meter på 1,68. Gjennomsnittlig relativ risiko er 3,68. Dette viser at anslaget på risiko knyttet til kurveradius reduseres betydelig jo bedre en undersøkelse kontrollerer for andre variabler. Mediananslaget på relativ risiko i kurver med radius på 50 meter er 53 % lavere i godt kontrollerte undersøkelser enn i alle undersøkelser sett under ett.

8.2 Usikkerhet i resultatene

Siden det ikke var mulig å benytte vanlige teknikker for meta-analyse, kan ikke usikkerhet i resultatene beregnes på samme måte som i meta-analyse. Finnes det andre muligheter for å tallfeste usikkerhet i resultatene?

Det største antall resultater, 46, foreligger for horisontalkurveradius. Basert på disse resultatene er følgende størrelser beregnet for hver av kurveradiene fra 500 til 50 meter:

1. Gjennomsnittlig relativt ulykkestall (satt lik 1,00 for radius 600 meter)
2. Standardavviket til relativt ulykkestall
3. Standardfeilen (standard error of the mean) til relativt ulykkestall

Disse tre størrelsene er veldefinerte. Men resultatene er oppsummert i form av medianverdier. Hva er usikkerheten i disse?

Usikkerheten i medianverdier er beregnet ved å ta utgangspunkt i de usikkerheter (standardavvik, standardfeil) som er beregnet for gjennomsnittet. Det er brukt en normaltilnærming (Wikipedia 2023). Den relative standardfeilen til medianverdien er tilnærmet lik:

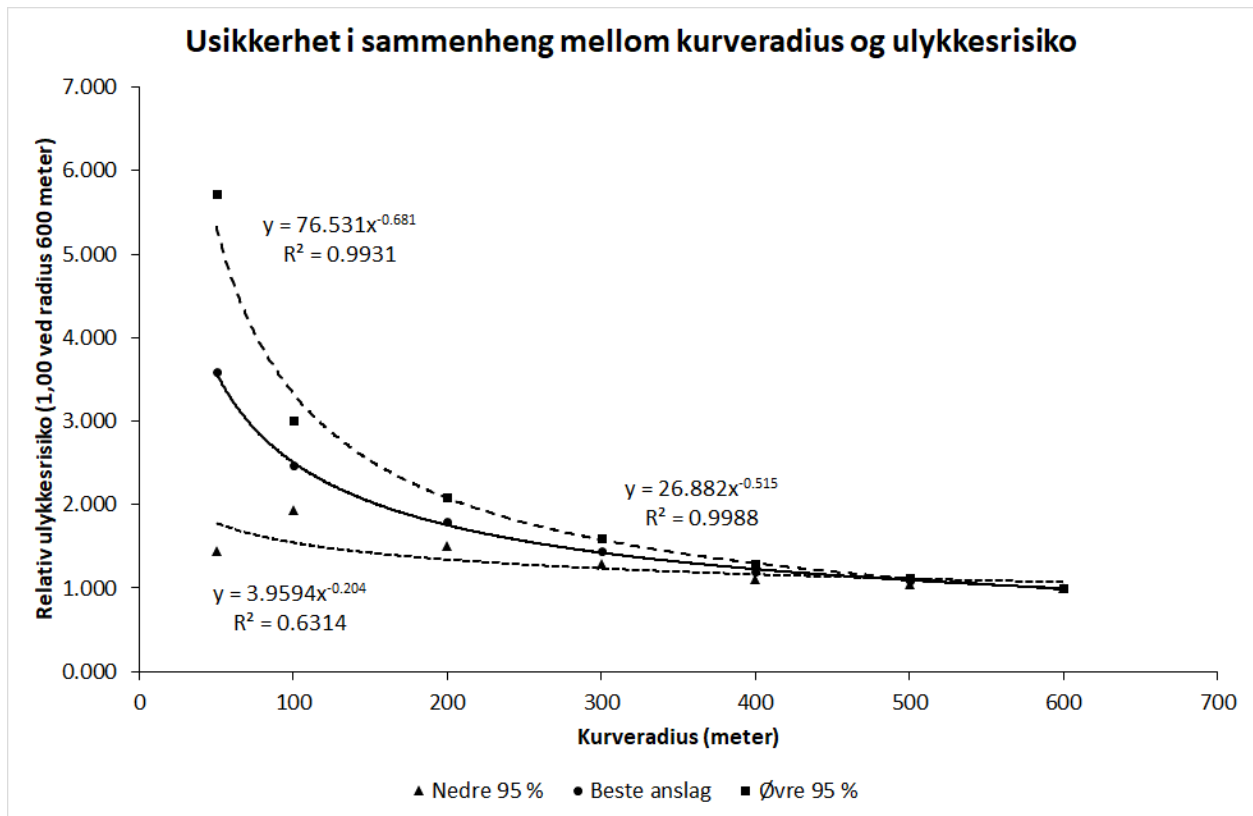
$$\text{Relative standardfeil til median} = \text{relativ standardfeil til gjennomsnitt} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}}$$

Dette innebærer at relativ standardfeil til medianen er ca. 1,25 ganger større enn relativ standardfeil til gjennomsnittet. La oss se hva dette betyr for radius i horisontalkurver. Følgende gjennomsnitt og standardfeil er beregnet for relativt ulykkestall (tabell 8.1):

Tabell 8.1: Beregning av usikkerhet (standardfeil) i medianverdier med normaltilnærming til standardfeil til gjennomsnittet.

Relativ risiko når risiko ved kurveradius 600 meter settes lik 1,00						
Radius (m)	Gjennomsnitt	Standardfeil til gjennomsnittet	Relativ standardfeil	Median	Standardfeil til median	
50	5,994	1,461	0,244	3,583	1,094	
100	2,698	0,241	0,089	2,467	0,276	
200	1,868	0,120	0,064	1,796	0,145	
300	1,503	0,066	0,044	1,441	0,080	
400	1,267	0,037	0,029	1,198	0,043	
500	1,122	0,016	0,015	1,087	0,020	
600	1,000			1,000		

Usikkerheten i relativ risiko øker betydelig når kurveradius synker. Risikokurver ved pluss eller minus 1,96 standardfeil (95 % konfidensintervall) er vist i figur 8.2.



Figur 8.2: Usikkerhet i sammenheng mellom kurveradius og ulykkesrisiko.

Kurvene som er føyd til nedre og øvre konfidensintervall kan benyttes ved beregning av nedre og øvre konfidensintervall for enhver kurveradius, ikke bare de oppgitte verdiene på 50, 100, osv. meter.

8.3 Betragtninger om anvendelse av resultatene

Praktisk talt alle studier som er oppsummert i denne rapporten er negative binomiale regresjonsmodeller av ulykker. Beregnede koeffisienter i disse modellene er benyttet til å beregne funksjoner som viser sammenhengen mellom hver egenskap ved linjeføring og antall ulykker, alt annet holdt konstant (inklusive trafikkmengde). Viser disse funksjonene de forventede virkninger av å endre de ulike egenskapene ved linjeføring? Vil man, for eksempel, ved å rette ut en kurve fra en radius på 100 meter til 200 redusere ulykkestallet slik kurven for sammenheng mellom kurveradius og ulykkestall viser? Kurven antyder at en slik utretting av en kurve vil redusere antall ulykker med 31 %.

Det hersker stor enighet om at koeffisienter i regresjonsmodeller ikke kan tolkes som årsakssammenhenger (Hauer 2010). Det er riktignok foreslått en del kriterier som må være oppfylt for å kunne tolke slike koeffisienter som anslag på årsakssammenhenger (Elvik 2011), men disse kriteriene er av minst tre grunner ikke tilstrekkelige.

For det første kan ikke en multivariat statistisk modell etablere kontrafaktiske forhold i ordets vanlige forstand. Hvis man definerer en årsak som enhver handling, hendelse eller prosess som frambringer en endring som ellers ikke ville ha skjedd, så ligger nøkkelen til å påvise en årsakssammenheng i å gi en god beskrivelse av hva som ellers (altså uten den antatte årsaken) ville ha skjedd. En statistisk modell gir støtte til kontrafaktiske utsagn av typen: dersom denne kurven hadde hatt en radius på 200 meter (i stedet for 100 meter) ville den ha hatt 31 % færre ulykker (i henhold til kurven som viser sammenheng mellom kurveradius og ulykkestall).

Problemet er at dette utsagnet bare er gyldig dersom alt annet er likt. Alt som er inkludert i regresjonsmodellen er per definisjon likt, fordi koeffisienten til enhver variabel kontrollerer for alle andre variabler

modellen inkluderer. Men dette er ikke tilstrekkelig til å støtte en årsaksslutning. Her kommer vi til den andre grunnen til at multivariate modeller ikke kan påvise årsakssammenhenger, nemlig at det alltid er utelatte variabler som kan tenkes å påvirke de sammenhenger som inngår i modellen. Eksempelvis er fartsgrense utelatt fra den norske modellen av ulykker i kurver. Det er ikke utenkelig at radius på kurver betyr mer for sikkerheten når fartsgrensen er 80 km/t enn når den er 70 km/t eller lavere. Egenskaper ved sideterreng er også utelatt. En ulykke som i et ufarlig terreng ikke fører til personskade, kan føre til personskade i et farligere terreng og dermed bli registrert der, men ikke i det ufarlige terrenget. Kort sagt: langt fra alt som påvirker ulykkestallet inngår i modellen og dermed har vi ikke noe grunnlag for å si at alt annet er likt. Det er tvert om grunn til å tro at ikke alt annet er likt. Å øke radius på en kurve fra 100 til 200 meter vil kanskje ikke påvirke ulykkestallet i det hele tatt når fartsgrensen er 40 km/t.

For det tredje kan man ikke endre ett linjeføringselement, eksempel radius i en horisontalkurve, uten å endre andre. Når radius i en kurve øker, blir kurven lengre. Dermed blir de rette strekningene i begge ender av kurven kortere. Lengden på rette strekninger påvirker også antall ulykker. Dette må vi ta med når vi skal beregne hva økt kurveradius betyr. Det slutter ikke der. Kravet til overhøyde i kurver avhenger av radius. Selv om det ikke nødvendigvis er noen forskjell i krav til overhøyde mellom radier på 100 og 200 meter, kan det være det dersom radius økes til, eksempelvis, 600 meter.

Av disse grunner kan ikke hver enkelt koeffisient tolkes som et anslag på en årsakssammenheng.

Det er direkte feil å bruke hver koeffisient til å beregne «mulige» virkninger av å endre det linjeførings-elementet koeffisienten gjelder, siden endring av ett linjeføringselement alltid fører til at andre elementer også endres. Slakere kurver på en gitt veg betyr kortere rettstrekninger. Hvis en kurve blir slakere, kan risikoen i nabokurver bli påvirket dersom disse nå framstår som relativt mye krappere enn de gjorde før den aktuelle kurven ble slaket ut.

Det finnes dessverre ytterst få før-og-etterstudier av å endre linjeføring. Et søk i Google scholar identifiserte kun en studie (Srinivasan et al. 2018). Denne studien viser, betryggende nok, at utflating av kurver reduserer antall ulykker betydelig (omkring 70 %), slik man skulle vente ut fra kurvene i figur 8.1. Studien viser også at jo mer man slaker ut en kurve (jo større økning er i radius), desto mer går antall ulykker ned. Dette samsvarer svært godt med det ulykkesmodellene har funnet.

Gitt at tverrsnittstudier basert på ulykkesmodeller for øyeblikket er alt vi har å bygge på for å si noe om mulige virkninger av å endre linjeførings-elementer, er det ved anvendelse av resultatene ingen annen mulighet enn å tillegge dem en form for årsaksstatus de ikke har.

Når man skal beregne mulige virkninger på ulykkestall av å endre flere linjeføringsparametre kan resultatene som gjelder linjeføringsklasser tjene som en form for kontroll. Hvis man ved å summere endringer i flere elementer kommer til en større endring i ulykkestall enn det som kan oppnås ved å gå fra laveste til høyeste linjeføringsklasse, kan det tyde på at de mulige virkninger er overvurdert.

Referanser

- Abdel-Aty, M., Radwan, A. E. 2000. Modeling traffic accident occurrence and involvement. *Accident Analysis and Prevention*, 32, 633-642.
- Abdel-Rahim, A., Khan, M. 2012. Potential crash reduction benefits of safety improvement projects - Part A: Shoulder rumble strips. National Institute for Advanced Transportation Technology, University of Idaho.
- Aram, A. 2010. Effective safety factors on horizontal curves of two-lane highways. *Journal of Applied Sciences*, 10, 2814-2822.
- Bauer, K. M., Harwood, D. M. 2013. Safety effects of horizontal curve and grade combinations on rural two-lane roads. *Transportation Research Record*, 2398, 37-49.
- Bil, M., Andrasik, R., Sedonik, J., Cicha, V. 2018. ROCA – An ArcGIS toolbox for road alignment and horizontal curve radii computation. *PLOS One*, 13, (12): e0208407.
- Björketun, U. 1991. Linjeføring samt prediktion av olyckor utifrån linjeføringsdata för vägar projekterade/byggda under 1950-, 1960- resp 1970-talet. VTI-meddelande 641. Linköping, Väg- och trafikinstitutet.
- Björketun, U. 2003. Olycksdata och linjeføringsmått. VTI notat 11-2003. Linköping, Väg- och transportforskningsinstitutet.
- Brüde, U., Larsson, J. 1977. En olycksanalys av tvåfältiga huvudvägar med hastighetsbegränsning 90 km/h. VTI-meddelande 55. Linköping, Statens väg- och trafikinstitut.
- Brüde, U., Larsson, J., Thulin, H. 1980. Trafikolyckors samband med linjeføring - för olika belagd bredd, hastighetsgräns, årstid, ljusförhållanden och region. VTI-meddelande 235. Statens väg- och trafikinstitut (VTI), Linköping.
- Brüde, U., Nilsson, G. 1976. Prediktionsmodell för trafikolyckor for kvalitetsbestämning av vägars trafiksäkerhet. VTI-rapport 77. Linköping, Statens väg- och trafikinstitut.
- Cafiso, S., Di Graziano A., Di Silvestro, G., La Cava, G., Persaud, B. 2010. Development of comprehensive accident models for two-lane rural highways using exposure, geometry, consistency and context variables. *Accident Analysis and Prevention*, 42, 1072-1079.
- Cafiso, S., Montella, A., D'Agostino, C., Mauriello, F., Galante, F. 2021. Crash modification functions for pavement condition and geometric design indicators. *Accident Analysis and Prevention*, 149, 105887.
- Caliendo, C., Lamberti, R. 2001. Relationship between accidents and geometric characteristics for four lane median separated roads. Proceedings of the conference Traffic Safety on three Continents, Moscow, Russia, 19-21 September 2001. VTI electronic archive, Linköping.
- Camacho-Torregrosa, F. J., Perez-Zuriaga, A. M., Campoy-Ungria, J. M., Garcia-Garcia, A. 2013. New geometric design consistency model based on operating speed profiles for road safety evaluation. *Accident Analysis and Prevention*, 61, 33-42.
- Card, N. A. 2012. Applied meta-analysis for the social science research. New York, The Guilford Press.
- Cardoso, J. L. 2005. Safety assessment for design and redesign of horizontal curves. Paper presented at 3rd International Symposium on Highway Geometric Design, Chicago, June 29-July 1, 2005.
- Christensen, P., Ragnøy, A. 2006. Vegdekkets tilstand og trafikksikkerhet. Betydningen av spordybde, ujevnheter og endringer i tverrfall for ulykkesrisikoen. Rapport 840. Oslo, Transportøkonomisk institutt.

- Council, F. M. 1998. Safety benefits of spiral transitions on horizontal curves on two-lane rural roads. *Transportation Research Record*, 1635, 10-17.
- Dhahir, B., Hassan, Y. 2019. Using horizontal curve speed reduction extracted from the naturalistic driving study to predict curve collision frequency. *Accident Analysis and Prevention*, 123, 190-199.
- Dietze, M., Weller, G. 2011. Applying speed prediction models to define road sections and to develop accident prediction models: A German case study and a Portuguese exploratory study. Deliverable 6.2 of ERANET project RISMET. Dresden, Technical University of Dresden.
- Easa, S. M., You, Q. C. 2009. Collision prediction models for three-dimensional two-lane highways. *Transportation Research Record*, 2092, 48-56.
- Elvik, R. 2011. Assessing causality in multivariate accident models. *Accident Analysis and Prevention*, 43, 253-264.
- Elvik, R. 2013. International transferability of accident modification functions for horizontal curves. *Accident Analysis and Prevention*, 59, 487-496.
- Elvik, R. 2017. Can evolutionary theory explain the slow development of knowledge about the safety level built into roads? *Accident Analysis and Prevention*, 106, 166-172.
- Elvik, R. 2019. The more (sharp) curves, the lower the risk. *Accident Analysis and Prevention*, 133, 105322.
- Elvik, R. 2022. Which is the most important for road safety – road design or driver behavioural adaptation? *Traffic Safety Research*, 2, 000009.
- Elvik, R., Haugvik, E. S. 2022. Safety of horizontal curves on rural two-lane roads in Norway. Manuscript submitted to *Traffic Safety Research*.
- Fambro, D. B., Fitzpatrick, K., Koppa, R. J. 1997. Determination of stopping sight distances. National Cooperative Highway Research Program Report 400. Washington DC, AASHTO.
- Findley, D., Hummer, J. E., Rasdorf, W., Zegeer, C. V., Fowler, T. J. 2012. Modeling the impact of spatial relationships on horizontal curve safety. *Accident Analysis and Prevention*, 45, 296-304.
- Fridstrøm, L., Ifver, J., Ingebrigtsen, S., Kulmala, R., Thomsen, L. K. 1995. Measuring the contribution of randomness, exposure, weather, and daylight to the variation in road accident counts. *Accident Analysis and Prevention*, 27, 1-20.
- Garach, L., Ona, J. de, Lopez, G., Baena, L. 2016. Development of safety performance functions for Spanish two-lane rural highways on flat terrain. *Accident Analysis and Prevention*, 95, 250-265.
- Gates, T., Savolainen, P., Kay, J., Finkelman, J., Davis, A. 2015. Evaluating outcomes of raising speed limits on high speed non-freeways. Wayne State University.
- Geedipally, S. R., Pratt, M. P., Lord, D. 2019. Effects of geometry and pavement friction on horizontal curve crash frequency. *Journal of Transportation Safety and Security*, 11, 167-188.
- Gooch, J. P., Gayah, V. V., Donnell, E. T. 2016. Quantifying the safety effects of horizontal curves on two-way two-lane rural roads. *Accident Analysis and Prevention*, 92, 71-81.
- Gooch, J. P., Gayah, V. V., Donnell, E. T. 2018. Safety performance functions for horizontal curves and tangents on two lane, two way rural roads. *Accident Analysis and Prevention*, 120, 28-37.
- Hamilton, I., Himes, S., Porter, R. J., Donnell, E. 2019. Safety evaluation of horizontal alignment design consistency on rural two-lane highways. *Transportation Research Record*, 2673, 628-636.
- Hanno, D. 2004. Effect of the combination of horizontal and vertical alignments on road safety. Master of science thesis. Department of Civil Engineering, The University of British Columbia.

- Harwood, D. W., Bauer, K. M. 2015. Effect of stopping sight distance on crashes at crest vertical curves on rural two-lane highways. *Transportation Research Record*, 2486, 45-53.
- Hauer, E. 1999. Safety and the choice of degree of curve. *Transportation Research Record*, 1665, 22-27.
- Hauer, E. 2010. Cause, effect and regression in road safety: a case study. *Accident Analysis and Prevention*, 42, 1128-1135.
- Haugvik, E. S. 2018. Risikokurver. Analyse av utforkjøringsrisikofaktorer på 2-feltsveger. Statens vegvesens rapport 171. Statens vegvesen, region øst.
- Høye, A. K., Nævestad, T-O., Ævarsson, G. 2019. Utvikling av modell for predikering av branner, ulykker og havarier i vegtunneler. Rapport 1705. Oslo, Transportøkonomisk institutt.
- Khan, G., Bill, A. R., Chitturi, M., Noyce, D. A. 2013. Safety evaluation of horizontal curves on rural undivided roads. *Transportation Research Record*, 2386, 147-157.
- Llopis-Castello, D., Camacho-Torregrosa, F. J., Garcia, A. 2018. Calibration of the internal consistency index to assess road safety on horizontal curves of two-lane rural roads. *Accident Analysis and Prevention*, 118, 1-10.
- Lord, D. 2006. Modeling motor vehicle crashes using Poisson-gamma models: Examining the effects of low sample mean values and small sample size on the estimation of the fixed dispersion parameter. *Accident Analysis and Prevention*, 38, 751-766.
- McBean, P. A. 1982. The influence of road geometry at a sample of accident sites. TRRL Laboratory Report 1053. Crowthorne, Berkshire, Transport and Road Research Laboratory.
- Milton, J., Mannering, F. 1998. The relationship among highway geometries, traffic-related elements and motor-vehicle accident frequencies. *Transportation*, 25, 395-413.
- Montella, A. 2009. Safety evaluation of curve delineation improvements. Empirical Bayes observational before-and-after study. *Transportation Research Record*, 2103, 69-79.
- Montella, A. 2010. A comparative analysis of hotspot identification methods. *Accident Analysis and Prevention*, 42, 571-581.
- Montella, A., Colantuoni, L., Lamberti, R. 2008. Crash prediction models for rural motorways. *Transportation Research Record*, 2083, 180-189.
- Mothafer, G. I. M. A., Yamamoto, T., Shankar, V. N. 2017. A negative binomial crash sum model for time invariant heterogeneity in panel crash data: Some insights. *Analytic Methods in Accident Research*, 14, 1-9.
- Ng, J. C. W., Sayed, T. 2004. Effect of geometric design consistency on road safety. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 31, 218-227.
- Persaud, B., Retting, R., Lyon, C. 2000. Guidelines for identification of hazardous highway curves. *Transportation Research Record*, 1717, 14-18.
- Rengarasu, T. M., Hagiwara, T., Hirasawa, M. 2009. Effects of road geometry and cross-section variables on traffic accidents. Study using homogeneous road segments. *Transportation Research Record*, 2102, 34-42.
- Rusli, R., Haque, M. M., King, M., Voon, W. S. 2017. Single-vehicle crashes along rural mountainous highways in Malaysia: An application of random parameters negative binomial model. *Accident Analysis and Prevention*, 102, 153-164.
- Sakshaug, K. 1998. Effekt av overhøyde i kurver: Beskrivelse av datamaterialet. Notat av 2.11.1998. Trondheim, SINTEF, Bygg og miljøteknikk.

- Saleem, T., Persaud, B. 2017. Another look at the safety effects of horizontal curvature on rural two-lane highways. *Accident Analysis and Prevention*, 106, 149-159.
- Shalkamy, A., El-Basyouny, K. 2020. Multivariate models to investigate the relationship between collision risk and reliability outcomes on horizontal curves. *Accident Analysis and Prevention*, 147, 105745.
- Shankar, V., Milton, J., Mannering, F. 1997. Modeling accident frequencies as zero-altered probability processes: an empirical inquiry. *Accident Analysis and Prevention*, 29, 829-837.
- Srinivasan, R., Carter, D., Lyon, C., Albee, M. 2018. Before-after evaluation of the realignment of horizontal curves on rural two-lane roads. *Transportation Research Record*, 2672, 43-52.
- Venkataraman, N. S., Ulfarsson, G. F., Shankar, V., Oh, J., Park, M. 2011. Model of relationship between interstate crash occurrence and geometrics. Exploratory insights from random parameter negative binomial approach. *Transportation Research Record*, 2236, 41-48.
- Vogt, A., Bared, J. 1998. Accident models for two-lane rural segments and intersections. *Transportation Research Record*, 1635, 18-29.
- Wikipedia. 2023. Median. <https://en.wikipedia.org/wiki/Median>
- Ye, X., Pendyala, R. M., Shankar, V., Konduri, K. C. 2013. A simultaneous equations model of crash frequency by severity level for freeway sections. *Accident Analysis and Prevention*, 57, 140-149.
- Zegeer, C. V., Stewart, J. R., Council, F. M., Reinfurt, D. W., Hamilton, E. 1992. Safety effects of geometric improvements on horizontal curves. *Transportation Research Record* 1356, 11-19.
- Zou, Y., Ash, J. E., Park, B-J., Lord, D., Wu, L. 2018. Empirical Bayes estimates of finite mixture of negative binomial regression models and its application to highway safety. *Journal of Applied Statistics*, 45, 1652-1669.

TØI er et anvendt forskningsinstitutt som mottar basisbevilgning fra Norges forskningsråd og gjennomfører forsknings- og utredningsoppdrag for næringsliv og offentlige etater. TØI ble opprettet i 1964 og er organisert som uavhengig stiftelse.

TØI utvikler og formidler kunnskap om samferdsel med vitenskapelig kvalitet og praktisk anvendelse. Instituttet har et tverrfaglig miljø med rundt 90 høyt spesialiserte forskere.

Instituttet driver forskningsformidling gjennom TØI-rapporter, artikler i vitenskapelige tidsskrifter, bøker, seminarer, samt innlegg og intervjuer i media. TØI-rapportene er gratis tilgjengelige på instituttets hjemmeside www.toi.no.

TØI er partner i CIENS Forskningscenter for miljø og samfunn, lokalisert i Forskningsparken nær Universitetet i Oslo (se www.ciens.no). Instituttet deltar aktivt i internasjonalt forskningssamarbeid, med særlig vekt på EUs rammeprogrammer.

TØI dekker alle transportmidler og temaområder innen samferdsel, inkludert trafiksikkerhet, kollektivtransport, klima og miljø, reiseliv, reisevaner og reiseetterspørsel, arealplanlegging, ITS, offentlige beslutningsprosesser, næringslivets transportbehov og generell transportøkonomi.

Transportøkonomisk institutt krever opphavsrett til egne arbeider og legger vekt på å opptre uavhengig av oppdragsgiverne i alle faglige analyser og vurderinger.

Postadresse:

Transportøkonomisk institutt
Gautstadalléen 21
0349 Oslo
Norge

E-post: toi@toi.no

Kontoradresse:

Forskningsparken
Gautstadalléen 21

Hjemmeside: www.toi.no

