

## Sammendrag

# Utvikling av modell for predikering av branner, ulykker og havarier i vegtunneler

TØI rapport 1705/2019

Forfattere: Alena Høye, Tor-Olav Navestad og Grétar Ævarsson  
Oslo 2019, 113 sider

*Vi har utviklet statistiske modeller for vegtunneler i Norge for å beregne normale antall kjøretøybranner, personskadeulykker, antall ulykker med drepte eller hardt skadde og antall havarier, som en funksjon av en rekke tunnelegenskaper (bl.a. trafikkmengde, lengde, antall løp, fartsgrense og stigninger). Modellene er utviklet som negative binomialmodeller med variabel overspredningsparameter. Modellene kan brukes ved planlegging av nye tunneler og ved risikoanalyser av eksisterende tunneler. Brannmodellene kan erstatte brann delen av risikoanalysemodellen TUSI. Modellene viser at antall branner øker med økende maksimal stigningsgrad i tunnelene, især fra en stigningsgrad på omtrent 7%. Økningen er større i tunneler med lengre bratte stigninger. Også antall havarier er høyere i bratte tunneler med stigninger på 7% eller mer. Stigninger utenfor tunnelen kan tenkes å påvirke branner i tunnelen, men dette har det ikke vært mulig å undersøke i dette prosjektet. Øvrige variabler har liten eller ingen effekt på antall branner og havarier. Antall ulykker er høyere i toløpstunneler enn i ettløpstunneler, høyere ved fartsgrenser under 80 km/t enn ved fartsgrense på 80 km/t eller høyere, høyere i helt rette tunneler enn i tunneler med slake kurver (gjelder ikke alvorlige ulykker), og lavere i høye tunneler enn i tunneler som er lavere enn 4,5 meter. Over tid har det ikke vært noen endring av antall branner, mens antall personskadeulykker i tunneler er omtrent halvert fra 2008 til 2017. For antall ulykker med drepte eller hardt skadde er det kun svak og ikke-signifikant tendens til nedgang over tid.*

## Metode og data

Alle modellene er beregnet med negativ binomial regresjon med variabel overspredningsparameter. Modeller er beregnet for de følgende avhengige variablene:

- **Antall branner:** Brannmodellene er basert på 296 branner i 1101 tunneler i 2008-2015.
- **Antall personskadeulykker (PSU):** Ulykkesmodellene for PSU er basert på 1039 personskadeulykker i 1181 tunneler i 2008-2017.
- **Antall ulykker med drepte eller hardt skadde (DHSU):** Ulykkesmodeller for DHSU er basert på 169 DHSU i 1181 tunneler i 2008-2017.
- **Antall havarier:** Havarimodellene er basert på 1322 havarier i 105 tunneler i 2016 og 2017. Det er beregnet modeller for ulike typer havarier med ulike typer kjøretøy (dvs. alle / lette / tunge).

Prediktorvariabler i modellene er (ikke alle variablene inngår i alle modellene):

- Lengde
- Trafikkmengde (ÅDT; naturlig logaritme)
- Andel lange kjøretøy (over 6,5 meter; brukt som proxy for andel tunge kjøretøy)
- Type tunnel (ettløpstunnel, toløpstunnel, rampe)
- Stigning (ulike sett med variabler: Lengde med bratt stigning, numerisk; maksimal stigningsgrad, numerisk; to dummyvariabler for maksimal stigningsgrad; syv dummyvariabler for maksimal stigningsgrad)
- Fartsgrense (dummyvariabler)

- Minste kurveradius (dummyvariabler)
- Høyde (tunnel over vs. under 4,5 meter)
- Rampe i tunnel (ja/nei)
- År
- Kameraovervåking (ITV) og automatisk hendelsesvarsling (Automatic Incident Detection, AID) (kun i modellene for havarier).

For **branner og ulykker** er det, per avhengig variabel, beregnet åtte modeller, hvorav fire inneholder alle prediktorvariablene og fire inneholder alle prediktorvariablene unntatt kurver og høyde (for disse mangler informasjon for en del tunneler). Av de fire modellene inneholder alle ulike sett med prediktorvariabler for stigning. ITV/AID inngår ikke i ulykkes- og brannmodellene.

Modellene for **havarier** inneholder alle prediktorvariablene, inklusive ITV/AID, men ikke kurver, høyde, rampe og år. Det er kun beregnet én modell for hver type havarier.

## Beregningsverktøy og oversikt over modellene for branner og ulykker

Som vedlegg til denne rapporten er det utviklet et verktøy i MS Excel for å kunne beregne normale antall branner, PSU og DHSU som funksjon av tunnelegenskapene som er listet opp ovenfor. Beregningsverktøyet benytter (valgfritt) én av to modeller:

- Den ene modellen (modell 1) har stigningslengde som prediktorvariabel for stigning, og kurver og høyde er blant prediktorvariablene.
- Den andre modellen (modell 7) har to dummyvariabler for bratt stigning som prediktorvariabler for stigning, og kurver og høyde er ikke blant prediktorvariablene.

Øvrige prediktorvariabler er som beskrevet ovenfor (trafikkmengde, andel lange kjøretøy, fartsgrense, ...). Effektene er testet for statistisk signifikans ( $p < .05$ ). Prediktorvariablene i modellene er valgt uavhengig av signifikans. De to variablene antall løp og rampe i tunnel er likevel utelatt fra modellene fordi de delvis ga store og kontraintuitive utslag på predikerte antall ulykker og branner. Av samme grunn er også variabelen for stigninger over 7% utelatt fra enkelte modeller for PSU og DHSU (her predikeres samme antall PSU / DHSU for stigninger over 5 og over 7 prosent).

Tabell S.1 og S. 2 viser en oversikt over de relative antallene branner, PSU, DHSU og havarier som predikeres med de to modellene. Resultatene for branner gjelder alle branner, uansett type kjøretøy (det er også utviklet modeller for branner med lette og tunge kjøretøy). Resultatene for havarier gjelder alle typer havarier.

Tabell S.1: Relative antall branner, PSU og DHSU i beregningsverktøyet, beregnet med modell 1 (med stigningslengde, kurver og høyde blant prediktorvariablene) og modell 7 (med maks. stigningsgrad og uten kurver/høyde blant prediktorvariablene); **statistisk signifikante** effekter ( $p < .05$ ) i **fet** skrift.

Effekt oppgitt som relativt antall...	Modell 1			Modell 7			
	Branner	PSU	DHSU	Branner	PSU	DHSU	
<b>ÅDT</b>	Når ÅDT øker med 10%	<b>1,060</b>	<b>1,068</b>	<b>1,054</b>	<b>1,058</b>	<b>1,067</b>	<b>1,054</b>
<b>Andel lange kjt.</b>	Når andel lange kjt. øker med 5 prosentpoeng	0,932	<b>0,771</b>	0,866	0,916	<b>0,786</b>	0,855
<b>Fartsgrense</b>	Ved fartsgrense 30-50 km/t	1,004	<b>2,755</b>	1,768	0,693	<b>2,483</b>	1,617
	Ved fartsgrense 60 km/t	1,322	<b>1,824</b>	1,153	1,087	<b>1,909</b>	1,254
	Ved fartsgrense 70 km/t	1,207	<b>2,018</b>	<b>1,572</b>	1,085	<b>2,290</b>	<b>1,538</b>
	Ved fartsgrense 90-110 km/t (Rel. antall = 1 ved 80 km/t)	1,409 1 (ref.)	<b>1,832</b> 1 (ref.)	1,397 1 (ref.)	1,431 1 (ref.)	<b>1,499</b> 1 (ref.)	1,007 1 (ref.)
<b>Stigningslengde (modell 1)</b>	Når lengden med stig. 5+% øker med 500 m	<b>1,122</b>	1,001	0,998	-	-	-
	Når lengden med stig. 7+% øker med 500 m	1,060	1,001	0,998	-	-	-
<b>Stigning (modell 7)</b>	Når maks. stigningsgrad er 5+ %	-	-	-	<b>1,644</b>	<b>1,312</b>	1,063
	Når maks. stigningsgrad er 7+ % (Rel. antall = 1 ved maks. stig. under 5%)	-	-	-	<b>2,683</b>	<b>1,312</b>	1,063
<b>Kurve (modell 1)</b>	Ved min. kurveradius 0-149 m	0,882	1,311	1,234	-	-	-
	Ved min. kurveradius 150-299 m	1,155	1,230	1,160	-	-	-
	Ved min. kurveradius 300-599 m	0,981	1,182	1,231	-	-	-
	I helt rett tunnel (Rel. antall ved min. kurveradius 600+ m)	1,070 1 (ref.)	<b>1,694</b> 1 (ref.)	0,356 1 (ref.)	-	-	-
<b>Høyde</b>	I tunnel over 4,5 m høyde (vs. lavere)	<b>0,652</b>	<b>0,701</b>	0,784	-	-	-
<b>År</b>	I 2008	0,969	<b>1,698</b>	1,020	0,964	<b>1,849</b>	1,037
	I 2009	0,839	<b>1,942</b>	0,709	0,879	<b>2,100</b>	0,693
	I 2010	0,895	<b>1,709</b>	1,139	0,859	<b>1,817</b>	1,109
	I 2011	1,461	<b>1,617</b>	0,993	1,376	<b>1,732</b>	0,974
	I 2012	1,279	<b>1,464</b>	0,579	1,165	<b>1,511</b>	0,606
	I 2013	1,465	1,299	0,814	1,282	1,292	0,712
	I 2014	1,233	1,399	0,615	1,161	1,388	0,589
	I 2015	1 (ref.)	1,171	0,737	1 (ref.)	1,195	0,703
	I 2016	-	1,150	<b>0,378</b>	-	1,152	<b>0,396</b>
	(Rel. antall = 1 i 2017)	-	1 (ref.)	1 (ref.)	-	1 (ref.)	1 (ref.)

 Tabell S.2: Relative antall havarier med lette og tunge kjøretøy i beregningsverktøyet, beregnet med modell 7 (med maks. stigningsgrad og uten kurver/høyde blant prediktorvariablene); **statistisk signifikante** effekter ( $p < .05$ ) i **fet** skrift.

Effekt oppgitt som relativt antall...	Havarier – lette kjt.	Havarier – tunge kjt.	
<b>ÅDT</b>	Når ÅDT øker med 10%	<b>1,113</b>	1,031
<b>Andel lange kjt.</b>	Når andel lange kjt. øker med 5 prosentpoeng	1,006	1,120
<b>Fartsgrense</b>	Ved fartsgrense 30-50 km/t	1,630	4,792
	Ved fartsgrense 60 km/t	1,549	1,406
	Ved fartsgrense 70 km/t	0,830	0,824
	Ved fartsgrense 90-110 km/t (Rel. antall = 1 ved 80 km/t)	1,134 1 (ref.)	0,386 1 (ref.)
<b>Stigning</b>	Når maks. stigningsgrad er 5+ %	<b>1,155</b>	1,333
	Når maks. stigningsgrad er 7+ % (Rel. antall = 1 ved maks. stig. under 5%)	2,966	1,422

## Trafikkmengde og andel lange/tunge kjøretøy

Økende **trafikkmengde** medfører flere branner, ulykker og havarier, men antall branner, ulykker og havarier øker langt mindre enn proporsjonalt med trafikkmengden. En økning av trafikkmengden på 10% medfører i gjennomsnitt en økning av antall branner og ulykker på omtrent 5% og en økning av antall havarier på omtrent 7%.

Økende **andel tunge kjøretøy** medfører færre branner og ulykker, men effekten er i de fleste modellene ikke statistisk signifikant. Antall havarier har ikke sammenheng med andelen tunge kjøretøy.

## Tunnelenes lengde

I alle modellberegningene inngår tunnelenes lengde med en koeffisient som er satt lik én, dvs. at man forutsetter at antall branner, ulykker og havarier øker proporsjonalt med tunnellengden. Det er likevel gjort en analyse hvor antall ulykker og branner per million kjøretøykilometer er sammenlignet mellom tunneler som har ulik lengde.

For antall **branner** viser resultatene ingen generell sammenheng mellom lengde og risiko, men tunneler som er mellom fire og ti km lange, har i gjennomsnitt omtrent tre ganger så mange branner per million kjøretøykilometer som tunneler som er under 300 meter lange. Forklaringen er trolig at de fleste undersjøiske tunnelene er i denne kategorien og at disse er brattere og av denne grunnen har flere branner enn andre tunneler.

Risikoen for **ulykker** (antall PSU per mill. kjøretøykilometer) er høyest i korte tunneler (100-500 meter) og går ned med økende tunnellengde. For DHSU ser man samme tendens, men sammenhengene er svakere enn for PSU. Tunneler som er 100-200 meter lange, har i gjennomsnitt 4,8 ganger så høy risiko for PSU og omtrent 30% høyere risiko for DHSU enn tunneler som er lengre enn 10 km.

## Type tunnel og ramper

Toløpstunneler har flere **branner** enn ettløpstunneler, men forskjellen varierer mye mellom modellene og er ikke statistisk signifikant i alle modellene. Det relative antall branner i toløpstunneler (sammenlignet med ettløpstunneler) er fra 1,4 til 2,6 i de ulike modellene. Ramper inngår ikke i brannmodellene (det har ikke vært branner på ramper).

Tunneler med ramper har vist seg å ha flere branner enn tunneler uten ramper, men uten at forskjellen er statistisk signifikant..

Antall **ulykker** er også høyere i toløpstunneler enn i ettløpstunneler. Forskjellen er statistisk signifikant i alle modellene for PSU men ikke i noen av modellene for DHSU.

Antall PSU i er alle modellene omtrent tre ganger så høy i toløpstunneler som i ettløpstunneler, hvis alt annet er likt. Forskjellen mellom to- og ettløpstunneler kan i hovedsak forklares med mange PSU i toløpstunneler i byer.

Ramper har ikke sammenheng med antall ulykker. Det er ingen statistisk signifikante forskjeller i antall ulykker verken mellom ramper og ettløpstunneler eller mellom tunneler med og uten ramper.

Antall **havarier** er høyere i toløpstunneler enn i ettløpstunneler, men uten at forskjellen er statistisk signifikant. Det er store forskjeller mellom enkelte typer havarier, men den eneste effekten på en spesifikk type havari som er statistisk signifikant, er effekten på punkteringer (flere i toløpstunneler). Forklaringen er ukjent, trolig skyldes effekten tilfeldig variasjon (noen resultater må forventes å bli statistisk signifikante selv om det ikke finnes noen sammenheng). Ramper inngår ikke i analysene for havarier.

## Fartsgrense

Antall **branner** har ikke sammenheng med fartsgrense.

Antall **ulykker** er høyere i tunneler med lavere fartsgrenser enn i tunneler med fartsgrense 80 km/t eller høyere. Sammenlignet med fartsgrense 80 km/t er antall PSU omtrent to ganger så høy i tunneler med fartsgrense 60 eller 70 km/t og omtrent tre ganger så høy i tunneler med fartsgrense 30-50 km/t (alle effektene er statistisk signifikante). For DHSU viser modellene samme tendens, men forskjellene er langt mindre og ikke statistisk signifikante.

Antall **havarier** har ikke sammenheng med fartsgrense.

Fartsgrensevariabelen kan *ikke* benyttes for å beregne forventede effekter av å endre fartsgrensen. Den beskriver kun sammenhengen mellom fartsgrense og antall ulykker, branner og havarier i eksisterende tunneler med dagens fartsgrense. Forventede effekter på antall ulykker av å endre fartsgrensen kan man estimere ut fra generelle sammenhenger mellom fartsgrense, fart og ulykker.

## Stigninger

Stigningsgraden er den viktigste prediktoren for antall **branner**, ved siden av trafikkmengden og tunnellengden. Det er beregnet brannmodeller med ulike stigningsvariabler hvorav de aller fleste er statistisk signifikante. Det er især lengden på bratte stigninger, dvs. antall meter i tunnelen med en stigningsgrad over 7% (eller over 5%) som bidrar til branner i tunneler. Brannmodellene viser at tunneler som har en stigning på 7% eller mer på 5 km, har 6,7 ganger så mange branner som tunneler hvor den maksimale stigningsgraden er under 5%.

Brannmodellene viser også at antall branner øker med økende stigningsgrad, især fra en stigningsgrad på 7%. I gjennomsnitt har tunneler med en maksimal stigningsgrad på 7% eller mer 4,3 ganger så mange branner som tunneler med en maksimal stigningsgrad under 5%. Tunneler med en maksimal stigningsgrad mellom 5% og 6,9% har 1,5 ganger så mange branner som tunneler med en maksimal stigningsgrad under 5%.

Antall **ulykker** har, i motsetning til antall branner og havarier, ikke vist seg å ha sammenheng med stigningsgraden i tunnelen. Dette til tross for at andre studier har vist at branner i tunneler ofte oppstår som følge av ulykker.

Antall **havarier** er høyere i tunneler med en maksimal stigningsgrad på 7% eller mer enn i flattere tunneler. Dette gjelder især motorhavarier og andre tekniske havarier, men ikke punkteringer og havarier av typen «annet/ukjent».

## Kurver

Antall **branner** øker i alle modellene med minste kurveradius, dvs. at slakere kurver medfører flere branner. Tre av modellene viser at det er signifikant færre branner i tunneler med en minste kurveradius under 300 meter enn i tunneler med slake kurver (minste radius over 600 meter). Tunneler med en minste kurveradius på under 150 meter har 60-70% færre branner enn tunneler med slake kurver. I modell 1 (som er brukt i Excel-beregningsverktøyet) er effektene av minste kurveradius mindre og ikke statistisk signifikante.

For antall **ulykker** er sammenhengen med minste kurveradius omvendt; tunneler med lavere minste kurveradius (krappere kurver) har en tendens til å ha flere ulykker (per million kjøretøykilometer) enn tunneler med slake kurver. Helt rette tunneler har flere PSU, men ikke flere DHSU.

I ulykkesmodellene er det kun forskjellen mellom antall PSU i helt rette tunneler vs. tunneler med slake kurver som er statistisk signifikant; helt rette tunneler har omtrent 2,3 ganger så mange PSU som tunneler med slake kurver, når alt annet er likt. Antall DHSU derimot er mindre i helt rette tunneler, men uten at effekten er statistisk signifikant.

Kurver inngår ikke i modellene for *havarier*.

## Høyde og bredde

*Tunneler med fri høyde* (over 4,5 meter skiltet høyde) har omtrent 30% færre branner enn lave tunneler (statistisk signifikant).

Antall *ulykker* er også lavere i tunneler med fri høyde enn i lavere tunneler. Både antall PSU og antall DHSU er omtrent 20% lavere i tunneler med fri høyde (statistisk signifikant kun for PSU).

Høyde inngår ikke i modellene for *havarier*.

Variabelen høyde (fri høyde, dvs. over 4,5 meter, vs. lavere) har sammenheng med en rekke andre variabler fordi lavere tunneler som regel er eldre og av generelt lavere standard enn tunneler med fri høyde. Resultatene for høyde kan derfor ikke tolkes som effekter av høyde alene, men må tolkes som effekter av generell tunnelstandard.

*Vegbredden og kjørebanebredden* inngår ikke i modellene som følge av manglende datagrunnlag. Begge variablene har sammenheng med tunnelens høyde og effekten av veg- og kjørebanebredde er trolig i stor grad fanget opp av høydevariabelen.

## ITV og AID

Det er en tendens til at tunneler med kameraovervåkning (ITV) eller automatisk hendelsesvarsling (AID) har flere *havarier* enn andre tunneler. De fleste effektene er imidlertid ikke statistisk signifikante. Det er også uklart hvordan ITV og AID kan påvirke antall havarier, unntatt ved at en større andel av havariene kan bli varslet. Det er også mulig at ITV og AID oftere er installert i tunneler som har mange havarier enn i andre tunneler, nettopp fordi tunnelene har mange havarier.

ITV og AID inngår ikke i modellene for *branner* og *ulykker*.

## Endringer over tid

År har ingen statistisk signifikant sammenheng med antall *branner* i noen av modellene, dvs. at modellene ikke tyder på at antall branner i tunneler har endret seg over tid (med hensyn tatt til endringer av trafikkmengden).

Antall *PSU* er omtrent halvert siden 2008 (med statistisk kontroll for trafikkmengde). For antall DHSU er det kun en svak nedgang over tid som ikke er statistisk signifikant.

For *havarier* er endringer over tid ikke undersøkt; det er kun havarier fra to år (2016 og 2017) som inngår i analysene.

## Ulykker i soner

For å undersøke hvorvidt ulykkesrisikoen varierer i enkelte tunneler, er alle tunnelene delt inn i inngangssoner (de første og siste 100 meter av tunnelen) og midtsoner (mellom inngangssonene). I korte tunneler hvor midtsonen hadde vært kortere enn 100 meter, er hele tunnelen klassifisert som inngangssone. Ramper inngår ikke i analysene for inngangs- og midtsoner.

Resultatene viser for **PSU** at ulykkesrisikoen er omtrent dobbelt så høy i inngangssoner som i midtsoner. Også i korte tunneler hvor hele tunnelen regnes som «inngangssone» i våre analyser, er risikoen for PSU omtrent dobbelt så høy som midtsoner i lengre tunneler. I toløpstunneler er forskjellen mellom inngangs- og midtsoner noe mindre, her er ulykkesrisikoen 60% høyere i inngangssonen.

For **DHSU** er risikoforskjellene mindre. Sammenlignet med midtsonen er risikoen i inngangssonen 80% høyere i ettløpstunneler og 33% høyere i toløpstunneler.

## Vegnettet utenfor tunnelen

Vegnettet utenfor tunnelen, blant annet bratte stigninger, kan tenkes å påvirke hendelser i tunnelen, især branner. Det har dessverre ikke vært mulig innenfor prosjektets rammer å hente inn data om vegene rett før og etter tunnelene.