

Verkeersveiligheid van tunnels in autosnelwegen

Samenvatting

Deze factsheet behandelt de verkeersveiligheid van tunnels in Nederlandse autosnelwegen. In zijn algemeenheid is het niet te zeggen of ongevallen relatief gezien *vaker* in tunnels gebeuren dan op open wegvakken. Wel zijn in een tunnel extra risicofactoren aanwezig, zoals de nabijheid van de tunnelwand, de tunnelhelling, beperkte zichtafstanden, in- en uitvoegstroken in of dichtbij de tunnel en grote lichtverschillen bij de in- en uitgang.

De verkeersveiligheid in tunnels kan worden verbeterd door vluchtstroken toe te passen waardoor de ruimte tot de tunnelwand wordt vergroot, door de hellingspercentages te beperken en zo snelheidsverschillen te minimaliseren (alternatief is om aparte kruipstroken voor langzaam verkeer aan te leggen), en door eventueel noodzakelijke horizontale bochten ruim in te richten. Verder moeten de tunnelingang en -uitgang zorgvuldig worden ontworpen: de verlichting moet van goede kwaliteit zijn en in- en uitvoeringen en weefvakken moeten vermeden worden, zowel in de nabijheid van de tunnel als in de tunnel zelf, wanneer er geen vluchtstroken zijn. Daarnaast moet de tunnel worden voorzien van een hoogwaardig afvoersysteem voor vloeistoffen.

Achtergrond en inhoud

Door rampen in enkele Alpentunnels en de angst voor terroristische aanslagen is de internationale aandacht voor de veiligheid van tunnels het laatste decennium toegenomen. Ook in Nederland hebben sindsdien verschillende instanties zich gericht op het verhogen van de veiligheid van wegtunnels. De meeste aandacht gaat daarbij naar het voorkómen van grote rampen en, als er dan toch een ramp gebeurt, naar het beperken van de gevolgen ervan.

Bij infrastructuur wordt onderscheid gemaakt in interne en externe veiligheid. De interne veiligheid betreft de veiligheid van weggebruikers. Bij externe veiligheid gaat het om het risico voor omwonenden als gevolg van incidenten op de weg. Bij tunnelincidenten is door de gesloten ruimte vooral de interne veiligheid in het geding.

Deze factsheet beschouwt de verkeersveiligheid van tunnels in Nederlandse autosnelwegen. Aan de hand van de nationale en internationale onderzoeksliteratuur wordt ingegaan op de specifieke veiligheidsproblemen die tunnels met zich meebrengen en op de factoren die meespelen bij het ontstaan van verkeersongevallen. Ook wordt een aantal maatregelen aangedragen die de tunnelveiligheid kunnen verhogen.

Hoe groot is het probleem?

Er zijn veertien tunnels in Nederlandse autosnelwegen (zie het overzicht www.autosnelwegen.nl, aangevuld met de Roertunnel in de A73). Dertien hiervan zijn langer dan 250 m. Alle tunnels zijn in beheer van het Rijk en de totale lengte aan tunnelbuis bedraagt bijna 10 kilometer. Behalve in de tunnelbuis zelf is er ook enige lengte voor en na de tunnel (het zogenaamde invloedsgebied) waar de tunnel invloed heeft op de verkeersveiligheid.

In de periode 2001-2004 zijn er op Nederlandse autosnelwegen 26 ernstige ongevallen gebeurd in een tunnel of binnen 50 meter ervandaan; 3 daarvan hadden een dodelijke afloop. In de periode 2005-2008 is dit aantal ernstige ongevallen gedaald naar 19, waarvan 2 met dodelijke afloop. Deze aantallen ernstige ongevallen vormen ongeveer 1% van alle geregistreerde ongevallen met ernstig letsel op autosnelwegen in beheer van het Rijk. Bovengenoemde aantallen tunnelongevallen zijn bepaald door de ongevalgegevens uit het Bestand geregistreerde Ongevallen in Nederland (BRON) te koppelen aan het bestand met wegkenmerken van rijkswegen (Weggeg). Zoals gezegd zijn alle ongevallen binnen 50 m van een tunnel daarbij aangewezen als tunnelongeval.

Calamiteiten en verkeersongevallen

In tunnels is sprake van een calamiteit wanneer zich een ernstig incident voordoet waarbij de hulp van de brandweer nodig is. Dit kan een brand zijn, maar ook het vrijkomen van gevaarlijke stoffen of beknelling en/of ernstige verwonding van personen (Rijkswaterstaat, 2004b). Bij bijvoorbeeld een

brand of lekkende voertuigen in een tunnel, verspreiden rook of giftige gassen zich door de tunnelruimte en verdwijnen deze niet meteen in de open lucht. Daardoor kunnen vooral mensen in de tunnel grote risico's lopen. Luchtventilatiesystemen, brandblussystemen, vluchtwegen, monitoringsystemen, veiligheidsbeleid en rampenplannen moeten die risico's beperken.

De kans op een calamiteit is klein, maar een calamiteit heeft wel veel grotere gevolgen dan een verkeersongeval. Calamiteiten kunnen wel door verkeersongevallen ontstaan, maar ook zijn er andere oorzaken, zoals technisch falen van voertuigen met gevaarlijke stoffen of het falen van mechanische of elektronische systemen in de tunnel zelf. Preventie van verkeersongevallen in tunnels verkleint dus het risico van calamiteiten, zij het in beperkte mate. Ook kunnen daarmee veel kosten worden bespaard.

Tunnels en open wegvakken

Bij vergelijking van tunnels met open wegvakken zijn het vooral de *gevolgen* van een ongeval die in een tunnel groter zijn. Of ongevallen relatief gezien ook *vaker* in tunnels gebeuren is in zijn algemeenheid niet te zeggen. Volgens onderzoek van Rijkswaterstaat hebben de tunnels in Nederlandse autosnelwegen een hoger aantal letselongevallen per motorvoertuigkilometer dan de open wegvakken (Rijkswaterstaat, 2004a). Uit internationaal onderzoek blijkt echter dat in tunnels relatief minder letselongevallen voorkomen dan op open wegvakken (Brilon & Lemke, 2000; Nussbaumer, 2007). Op wegvakken bij tunnels met in- en uitvoeringen (bijvoorbeeld van drie naar twee rijstroken of omgekeerd) is het aantal ongevallen vrijwel altijd hoger dan op de aangrenzende wegvakken, zo blijkt uit onderzoek van Rijkswaterstaat (2008). Ook het aantal ongevallen bij de tunnelingang en bij het diepste punt van de tunnel ligt bovengemiddeld hoog.

Tunnels beslaan nog geen halve procent van de totale lengte aan autosnelweg in Nederland (ruim 2.500 km aan gescheiden rijbaan, exclusief verbindingsbanen en op- en afritten CBS). Het aandeel ernstige tunnelongevallen van circa 1% lijkt daarmee naar verhouding iets aan de hoge kant. Hieraan kunnen echter geen harde conclusies worden verbonden. De aantallen ongevallen zijn immers klein en fluctueren sterk van jaar tot jaar, er is niet gecorrigeerd voor verschillen in hoeveelheid verkeer, en de registratiegraad van ongevallen ligt in tunnels vermoedelijk hoger dan op de open wegvakken.

Waardoor worden ongevallen in en nabij tunnels veroorzaakt?

Het is niet mogelijk om directe oorzaken aan te wijzen van tunnelongevallen in het algemeen; daarvoor spelen er te veel factoren mee. Specifieke risicofactoren voor het ontstaan van ongevallen in tunnels worden hieronder besproken.

Ontbreken van vluchtstroken

In de meeste tunnels in Nederland ontbreken vluchtstroken. Bij pech kan dit (ernstige) hinder veroorzaken voor het verkeer en bovendien kunnen hulpdiensten pechgevallen lastig bereiken. Ook leidt het ontbreken van vluchtstroken tot aangepast rijgedrag. Sommige automobilisten blijken bij de ingang van de tunnel hun dwarspositie op de rijbaan aan te passen en verder van de tunnelwand te gaan rijden. Verderop in de tunnel blijken ze de normale dwarspositie weer in te nemen (Martens & Kaptein, 1998). Wanneer er een vluchtstrook aanwezig is zijn bovengenoemde effecten beperkt. Volgens Duits onderzoek geeft een vluchtstrook 20% minder ongevallen per motorvoertuigkilometer (Brilon & Lemke, 2000). En in de Nederlandse *Richtlijnen voor het Ontwerpen van Autosnelwegen ROA* wordt zelfs een reductie van 20 tot 30% genoemd (Rijkswaterstaat, 1993).

Gesloten constructie

De aanwezigheid van tunnelwanden en een tunneldak kan bij een klein deel van weggebruikers angstgevoelens oproepen. Vooral de tunnelwand bij de ingang kan als bedreigend worden gezien. Daarbij komt dat sommige bestuurders ook hun snelheid minderen en minder inhalen zodra ze de tunnel ingaan (Rijkswaterstaat, 2008). Dit kan de homogeniteit van de verkeersstroom verminderen en daardoor de verkeersveiligheid verslechteren (Verwey et al., 1996).

Hoewel het aandeel automobilisten dat zich ongemakkelijk voelt bij het rijden in een tunnel klein is (Admundsen, 1992)¹, moet het effect dat deze groep kan hebben op de verkeersstroom niet onderschat worden (Martens & Kaptein, 1997). Tunnelangst veroorzaakt inhomogeniteit van de verkeersstroom, en omdat de automobilist dan minder aandacht heeft voor de rijtaak kan dat leiden tot ongevallen (Martens et al., 1998).

¹ Het genoemde onderzoek stamt uit begin jaren negentig. Wellicht hebben de verschillende tunnelrampen eind jaren negentig de tunnelangst onder automobilisten doen toenemen.

Hellingspercentage

Het blijkt dat er op het diepste punt van de tunnel meer ongevallen gebeuren dan elders in de tunnel (Rijkswaterstaat, 2008). Mogelijk is daar de snelheid van de voertuigen hoger en de remweg langer (Rijkswaterstaat, 2004a). Bij de opgaande hellingen worden zware voertuigen soms sterk afgeremd. Hierdoor worden de snelheidsverschillen tussen de afzonderlijke voertuigen groter, wat de veiligheid niet ten goede komt: hoe meer voertuigen afwijken van de gemiddelde wegsnelheid, hoe groter de kans op een ongeval is (Verweij, 2000). De Amerikaanse ontwerprichtlijnen (AASHTO, 2001) melden dat het ongevalsrisico toeneemt naarmate het snelheidsverval van vrachtauto's op een helling groter is. En Duits onderzoek (Bressler, 2001; 2003) toont aan dat het ongevalsrisico van een autosnelweg toeneemt naarmate het hellingspercentage groter is, en tevens dat de ongevalskosten steeds sterker toenemen. Dit laatste duidt erop dat de ernst van de ongevallen toeneemt bij grotere hellingspercentages. Voor zowel de ongevalsrisico's als de ongevalskosten gaat deze relatie op voor zowel opgaande als neergaande hellingen. Bij hellingen met kruipstroken (een extra rijstrook voor langzame voertuigen) neemt bij opgaande hellingen wel het ongevalsrisico toe naarmate het hellingspercentage toeneemt, maar de ongevalskosten nemen af (Bressler, 2001).

Afmetingen en verloop

Er gebeuren meer ongevallen naarmate de geometrie van de tunnel ingewikkelder wordt (Van Ees et al., 1997). Bochten zijn soms moeilijk in te schatten en tunnelwanden en -plafond beperken het zicht op de weg en op eventuele files (Rijkswaterstaat, 2008). Stedelijke autosnelwegtunnels blijken hogere ongevalsrisico's te hebben dan landelijke autosnelwegtunnels (PIARC, 1995); dit geldt zowel voor alle ongevallen als voor letselongevallen. Het krappere ontwerp van de tunnels vanwege de beperkte ruimte in steden wordt als voornaamste oorzaak genoemd.

Lichtcondities

De overgang van de open weg naar een tunnel vormt ook een overgang in lichtomstandigheden, zeker overdag. Het is belangrijk om deze (licht)overgang bij de tunnelingang en -uitgang geleidelijk te laten plaatsvinden; het oog heeft namelijk enkele seconden nodig om zich aan te passen aan de gewijzigde situatie. Is de lichtovergang te abrupt, dan kan de weggebruiker even geen details waarnemen en kan hij zijn afgeleid. In Nederland blijkt de lichtovergang bij de tunnelingen van goede kwaliteit te zijn (Schreuder, 1993).

Overige risicofactoren

Uit Zwitsers en Oostenrijks onderzoek blijkt dat een tunnel veiliger is naarmate deze langer is (Robatsch & Nussbaumer, 2004). Andere auteurs wijzen er echter op dat de monotone visuele omgeving in lange tunnels kan leiden tot oriëntatiefouten en fouten door concentratieverlies (Van Kleef et al., 2001). Bovendien neemt de kans op pech en/of een calamiteit toe naarmate de tunnel langer wordt.

Bij hogere intensiteit is het risico in tunnels hoger (Robatsch & Nussbaumer, 2004). Dit correspondeert met het hogere risico bij hogere intensiteit op Nederlandse autosnelwegen (Commandeur et al., 2002).

In- en uitvoeringen in en nabij tunnels hebben een negatieve invloed op de verkeersveiligheid wanneer er niet voldoende ruimte is om te manoeuvreren (Rijkswaterstaat, 2004a; 2008).

Een tunnelbuis met twee rijrichtingen is minder veilig dan twee tunnelbuizen met verkeer in één rijrichting (PIARC, 1995; Nussbaumer, 2007). Bij tunnels met tegenverkeer kunnen frontale aanrijdingen plaatsvinden die doorgaans ernstige gevolgen hebben. Nederland heeft geen tunnels met tegenverkeer, maar tijdens onderhoudswerkzaamheden komt deze situatie wel voor. Naar aanleiding van enkele ongevallen heeft de toenmalige Raad voor de Transportveiligheid aanbevolen om de risico's van andere oplossingen tijdens tunnelwerkzaamheden eens te analyseren (RvTV, 2004).

Wat vermelden wetgeving en richtlijnen?

Wetgeving

Het wetgevingskader dat van toepassing is op infrastructuur in Nederland bestaat uit onder andere de Tracéwet, Wegenwet, Wet ruimtelijke ordening. Voor tunnels langer dan 250 m geldt daarnaast ook de Wet aanvullende regels veiligheid wegtunnels (Warvw of 'Tunnelwet'). Bovendien zijn tunnels die deel uitmaken van het trans-Europese wegennetwerk (de E-wegen) en langer zijn dan 500 m verplicht te voldoen aan de minimum veiligheidsnormen van de Europese Commissie (Richtlijn 2004/54/EG). Deze Europese richtlijn is geïmplementeerd in de Tunnelwet en de Woningwet (volgens de woningwet

is een tunnel een "bouwwerk niet zijnde een gebouw" waarvoor een bouwbesluit moet worden afgegeven).

Ontwerprichtlijnen

Voor een tunnel gelden in beginsel dezelfde ontwerprichtlijnen als voor een open weg. De *Nieuwe Ontwerprichtlijn Autosnelwegen* (NOA; Rijkswaterstaat, 2007a) geeft geen expliciete richtlijnen voor tunnels maar wel voor grote kunstwerken (rivierovergangen en onderdoorgangen) waar andere eisen worden gesteld ten opzichte van de maximale hellingen. Bij een ontwerpssnelheid van 100 en 120 km/uur wordt bij grote kunstwerken een maximaal hellingspercentage van 5% geaccepteerd, ten opzichte van 3% in gewone verticale rechtstanden. De *Richtlijnen voor het Ontwerpen van Autosnelwegen* (ROA; Rijkswaterstaat, 1993) geven aan dat een vluchtstrook slechts achterwege gelaten mag worden na een zorgvuldige afweging van zwaarwegende argumenten op basis van een kosten-batenanalyse. Een dergelijke situatie kan zich voordoen bij een diep gelegen tunnel. Vluchtstroken worden uit overwegingen van kosteneffectiviteit in het algemeen niet aangelegd in tunnels, tenzij verwachte toekomstige verkeersintensiteiten dit rechtvaardigen (Rijkswaterstaat, 2004b).

Rijkswaterstaat heeft ook aanbevelingen gedaan over de minimale afstand tussen een tunnelingang of -uitgang en een invoeging of uitvoeging (Rijkswaterstaat, 2008). Deze geadviseerde afstand is afhankelijk gesteld van de snelheidslimiet. In de Europese richtlijn (2004/54/EG) is vastgesteld dat binnen een afstand van tien rijseconden vóór de tunnelingang het aantal rijstroken niet mag veranderen. Rijkswaterstaat wijkt af van deze 'tienseconde-eis' in die zin dat de afstand van een uitvoegstrook tot de tunnelingang vaak kleiner is dan aanbevolen door de EU-richtlijn, terwijl de afstand tussen een tunneluitgang en daarna een uitvoegstrook vaak groter is (Rijkswaterstaat, 2008). De tienseconde-eis in Richtlijn 2004/54/EG wordt niet onderbouwd en het is niet bekend waarop deze eis is gebaseerd. De eis maakt verder geen onderscheid naar type divergentie of convergentiepunten. Desondanks is deze richtlijn inmiddels verwerkt in de Nederlandse Tunnelwet (Warvw).

Kwaliteitseisen

De *Beleidsnota tunnelveiligheid* behandelt proceseisen en veiligheidseisen voor tunnels (Ministeries van VenW, BZ & VROM, 2003; 2005). Het Steunpunt Tunnelveiligheid van de Dienst Infrastructuur (voorheen de Bouwdienst) van Rijkswaterstaat heeft een integrale benaderingswijze voor de veiligheidsproblematiek van ondergrondse verkeersinfrastructuur geformuleerd: *Veiligheidsrichtlijnen deel A t/m E*. Daarnaast is er een Commissie tunnelveiligheid ingesteld waarin onafhankelijke deskundigen zitten die al in een vroeg stadium van tunnelprojecten advies geven over tunnelveiligheid (www.commissietunnelveiligheid.nl).

Recente ontwikkelingen

In opdracht van het Ministerie van Infrastructuur en Milieu is een evaluatie uitgevoerd naar de rol van de Tunnelwet (Warvw) en de Woningwet bij het plannings-, besluitvormings- en realisatieproces voor veilige wegtunnels (Andersson Elffers Felix & Grontmij, 2011). De aanbevelingen van de evaluatie zijn door de minister van Infrastructuur en Milieu overgenomen in een voorstel voor een nieuwe veiligheidsnorm voor tunnels. De Ministerraad heeft inmiddels ingestemd met dit voorstel voor wijziging van de Tunnelwet (Ministerie van IenM, 2011). De gewijzigde wet beoogt duidelijkheid te scheppen in de veiligheidseisen voor tunnels en de werkwijze hoe hieraan te voldoen. Aanvullend op deze normen komt een regeling die per tunneltype een standaardpakket aan veiligheidsmaatregelen voorschrijft (installaties en systemen). De nieuwe wet beoogt ook te voorkomen dat projecten onnodig worden vertraagd en sluit hiermee aan bij de aanpak *Sneller en beter* van de Commissie Elverding (2008). Verwacht wordt dat de nieuwe Tunnelwet na instemming van de Raad van State per juli 2012 in werking zal treden.

Vanwege de aangepaste werkwijze zal de Commissie tunnelveiligheid een minder belangrijke rol krijgen; de minister heeft daarom geadviseerd de Commissie op te heffen. De kennis- en adviseringrol van de Commissie wordt (mogelijk) overgedragen aan CROW/CURNET in samenwerking met het Centrum voor Ondergronds Bouwen en het Nederlands Instituut voor Fysieke veiligheid.

Welke veiligheidsmaatregelen zijn mogelijk?

In *Veiligheidsrichtlijnen Deel C* (Rijkswaterstaat, 2004b) worden maatregelen besproken om de veiligheid in tunnels te waarborgen. Ook is er een richtlijn voor het ontwerp van convergentie- en divergentiepunten in en nabij tunnels (Rijkswaterstaat, 2008). Effectieve veiligheidsmaatregelen voor Nederlandse tunnels in autosnelwegen zijn het toepassen van vluchtstroken, het beperken van

hellingspercentages (of het aanbrenge van kruipstroken), het toepassen van ruime bochten en het blijven gebruiken van aparte tunnelbuizen (ook voor aparte doelgroepen). Verder moeten in- en uitvoeringen en weefvakken in de tunnel of in de nabijheid van de tunnelingang en -uitgang zo veel mogelijk vermeden worden. Ook dient de verlichting bij de tunnelingang en -uitgang van goede kwaliteit te zijn, dient er continue bewaking van de tunnel te zijn, evenals voldoende ventilatie, en moet de tunnel zijn voorzien van nooduitgangen enzovoort. Daarnaast moet de tunnel zijn voorzien van een hoogwaardig afvoersysteem voor vloeistoffen (bestaande uit het wegdek, het riolerings-systeem, waterkelders en een pompinstallatie) om te voorkomen dat er grote plassen regenwater, benzine of andere gevaarlijke vloeistoffen in de tunnelbuis blijven liggen. Ondanks bovengenoemde veiligheidsrichtlijnen blijven tunnels risicovolle schakels in het wegennet. Daarom zijn aanvullende preventieve maatregelen van belang. Voor de Nederlandse tunnels zijn dat bijvoorbeeld snelheidsbeperking, toegangsdosering, een inhaalverbod voor het vrachtverkeer, detectiesysteem voor gevaarlijke stoffen, dynamische/grafische route-informatiepanelen en dergelijke. Daarnaast kunnen nieuwe ontwikkelingen mogelijk een bijdrage leveren aan het vergroten van de veiligheid in tunnels. Vashitz et al. (2008) hebben een studie gedaan naar het gebruik van een in-voertuiginformatiesysteem in tunnels en komen tot de conclusie dat het informatiesysteem zorgt voor een vermindering van angst en verveling bij het rijden in tunnels en dus kan bijdragen aan een verbetering van de veiligheid in tunnels. Manser & Hancock (2007) bespreken hoe de snelheid in tunnels beïnvloed kan worden door patronen op de tunnelwand.

Welke kosten en baten van maatregelen zijn afgewogen?

Voor vluchtstroken in tunnels heeft Rijkswaterstaat in enkele gevallen een kosten-batenafweging gemaakt met het BOMVIT-model (Rijkswaterstaat, 2003a). Dit model beschouwt onder andere de winst in doorstroming en verkeersveiligheid (bespaarde kosten van doden, gewonden en materiële schade). De grootste winst van vluchtstroken in tunnels met hoge verkeersintensiteiten blijkt een betere verkeersafwikkeling te zijn: minder congestie als gevolg van pechgevallen en ongevallen. Uit het oogpunt van verkeersveiligheid alleen is een vluchtstrook in een tunnel niet kosteneffectief en om deze reden worden er in Nederland, zoals eerder gezegd, geen vluchtstroken in tunnels aangelegd. Duits onderzoek geeft verder aan dat het maatschappelijk nut van vluchtstroken in tunnels sterk toeneemt naarmate de verkeersintensiteit toeneemt (Brilon & Lemke, 2000); dit vooral door een betere verkeersafwikkeling. Ook bij een toename van het percentage vrachtverkeer en van het hellingspercentage stijgt het nut van de vluchtstrook doordat deze gebruikt kan worden als kruipstrook of inhaalstrook.

Voor hellingen in tunnels heeft Rijkswaterstaat een kosten-batenanalyse uitgevoerd met het model BOMHIT (Rijkswaterstaat, 2003b), afgeleid van het BOMVIT-model. Met dit model zijn tunnelhellingen van 4,5% en 6% tegen elkaar afgewogen. Ook in dit model blijkt de meeste winst in de verkeersafwikkeling te zitten, voornamelijk door een capaciteitsverhoging bij een minder steile helling. Wanneer alleen naar de verkeersveiligheidswinst wordt gekeken is het lagere hellingspercentage niet kosteneffectief.

Al met al kunnen we stellen dat de kosten en baten van vluchtstroken en hellingen in tunnels realistisch kunnen worden afgewogen als ook de baten op het gebied van verkeersdoorstroming in de berekeningen worden betrokken.

Conclusie

Het aantal ongevallen met ernstige afloop in Nederlandse autosnelwegtunnels is beperkt, vooral omdat er slechts veertien van dergelijke tunnels zijn. Deze zijn allemaal in beheer van het Rijk hebben een gezamenlijke lengte van ongeveer 10 km. Bij vergelijking van tunnels met open wegvakken zijn het vooral de *gevolgen* van een ongeval die in een tunnel groter zijn, met name als er brand ontstaat of giftige stoffen vrijkomen. Of ongevallen relatief gezien ook *vaker* in tunnels gebeuren is in zijn algemeenheid niet te zeggen. De recente ongevallencijfers laten zien dat er de afgelopen jaren in Nederlandse tunnels naar verhouding meer ernstige ongevallen per weglengte zijn geweest dan op de rest van het autosnelwegennetwerk. Tunnels beslaan namelijk minder dan een half procent van de weglengte maar nemen 1% van de ernstige ongevallen voor hun rekening). In een tunnel zijn veel extra risicofactoren aanwezig. Aangezien deze risicofactoren meestal tegelijk voorkomen is het moeilijk om aan te geven wat de oorzaak van een tunnelongeval is. De risicofactoren waarin autosnelwegtunnels afwijken van de open weg zijn: de nabijheid van de tunnelwand, hellingen en snelheidsverschillen, en wegverloop en (beperkte) zichtafstand. De verkeersveiligheid in tunnels kan worden verbeterd door vluchtstroken toe te passen waardoor de ruimte tot de tunnelwand wordt

vergroot, door de hellingspercentages te beperken en zo snelheidsverschillen te minimaliseren (alternatief is om aparte kruipstroken voor langzaam verkeer aan te leggen), en door eventueel noodzakelijke horizontale bochten ruim in te richten. Verder moeten de tunnelingang en -uitgang zorgvuldig worden ontworpen: de verlichting moet van goede kwaliteit zijn en in- en uitvoeringen en weefvakken moeten vermeden worden, zowel in de nabijheid van de tunnel als in de tunnel zelf, wanneer er geen vluchtstroken zijn. Daarnaast moet de tunnel worden voorzien van een hoogwaardig afvoersysteem voor vloeistoffen.

Publicaties en bronnen

AASHTO (2001). [A policy on geometric design of highways and streets](#). Fourth Edition. American Association of State Highway and Transport Officials AASHTO, Washington, D.C.

Admundsen, F.H. (1992). [Driver behaviour in Norwegian tunnels](#). In: Vardy, A.E. (ed.). Safety in road and rail tunnels. Proceedings of the first international conference on safety in road and rail tunnels, 23-25 November 1992, Basel, p. 315-325.

Andersson Elffers Felix & Grontmij (2011). [Evaluatie wetgeving tunnelveiligheid](#). Andersson Elffers Felix, Utrecht

Bressler, A. (2001). [Verkehrssicherheit und Verkehrsablauf an Steigungsstrecken; Kriterien für Zusatzfahrstreifen](#). Schriftenreihe Lehrstuhl für Verkehrswesen Heft 24. Ruhr-Universität Bochum, Bochum.

Bressler, A. (2003). [Zusatzfahrstreifen an Steigungsstrecken von Autobahnen](#). In: Strassenverkehrstechnik, vol. 47, nr. 2, p. 66-74.

Brilon, W. & Lemke, K. (2000). [Strassenquerschnitte in Tunneln](#). Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 78. Bundesminister für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abteilung Strassenbau, Strassenverkehr, Bonn-Bad Godesberg.

Commandeur, J.J.F., Bijleveld, F.D., Braimaister, L.G. & Janssen, S.T.M.C. (2002). [De analyse van ongeval-, weg- en verkeerskenmerken van de Nederlandse rijkswegen](#). R-2002-19. Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV, Leidschendam.

Commissie Elverding (2008). [Sneller en beter](#). Advies Commissie Versnelling Besluitvorming Infrastructurele Projecten. [s.l.]

Ees, T.C. van, Barends, P.J. & Kanhai, M.H. (1997). [N120 Beveiligingsconcept ondergrondse bouwwerken. Literatuurrapport](#). Ministerie van Binnenlandse Zaken, Centrum Ondergronds Bouwen (COB), Gouda.

Kleef, E.A. van, Kuiken, M.J. & Bakker, M.P. (2001). [Scenario's tunnelincidenten](#). R2435-01-001. Rapport in het kader van het project MAVIT (maatschappelijk aanvaardbaar veiligheidsniveau in tunnels) in opdracht van het Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties en het Ministerie van Verkeer en Waterstaat. DHV Milieu en Infrastructuur, Amersfoort.

Manser, M.P & Hancock, P.A. (2007). [The influence of perceptual speed regulation on speed perception, choice, and control: Tunnel wall characteristics and influences](#). In: Accident Analysis and Prevention, vol. 39, nr. 1, p. 69-78.

Martens, M.H. & Kaptein, N.A. (1997). [Effect of tunnel design characteristics on driving behaviour and traffic safety; A literature study](#). Rapport TM-97-B005. TNO Human Factors Research Institute, Soesterberg.

Martens, M.H. & Kaptein, N.A. (1998). [Effects of emergency lanes and exits and entries in tunnels on driving behaviour; Driving simulator studies](#). Rapport TM-98-C058. TNO Human Factors Research Institute, Soesterberg.

Martens, M.H., Koster, E.R. & Lourens, P. (1998). [Westerscheldetunnel: Verkeersveiligheid tijdens calamiteiten met evacuatie](#). Rapport TM-98-C033. TNO Technische Menskunde, Soesterberg.

Ministeries van VenW, BZ & VROM (2003). [Beleidsnota tunnelveiligheid, deel A: proceseisen](#). Ministeries van Verkeer en Waterstaat, Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties, en Volkshuisvesting Ruimtelijke Ordening en Milieu, 's-Gravenhage.

Ministeries van VenW, BZ & VROM (2005). [Beleidsnota tunnelveiligheid, deel B: veiligheidseisen](#). Ministeries van Verkeer en Waterstaat, Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties en Volkshuisvesting Ruimtelijke Ordening en Milieu, 's-Gravenhage.

Ministerie van IenM (2011). [Regels voor veiligheid tunnels vastgelegd in de wet](#). Nieuwsbericht 11 juli 2011. Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 's-Gravenhage.

Nussbaumer, C. (2007). [Comparative analysis of safety in tunnels](#). In: Young Researchers Seminar, 27-30 May 2007, Brno, Czech Republic.

PIARC (1995). [Road safety in tunnels](#). Committee C5 Road Tunnels. Permanent International Association of Road Congresses PIARC, Paris.

Rijkswaterstaat (1993). [Richtlijnen voor het ontwerpen van autosnelwegen ROA. Hoofdstuk III: Dwarsprofielen](#). Adviesdienst Verkeer en Vervoer, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Rotterdam.

Rijkswaterstaat (2003a). *BOMVIT, BeslissingsOndersteunend Model Vluchtstroken In Tunnels*. Bouwdienst Afdeling Wegontwerp in opdracht van Steunpunt Tunnelveiligheid.

Rijkswaterstaat (2003b). *Kosten-batenanalyse helling 2^e Coentunnel*. Bouwdienst, Afdeling Wegontwerp, Apeldoorn.

Rijkswaterstaat (2004a). *Is in- en uitvoegen bij tunnels veilig?* Bouwdienst, Afdeling Wegontwerp, Apeldoorn.

Rijkswaterstaat (2004b). *Veiligheidsrichtlijnen Deel C, basismaatregelen januari 2004*. versie 1.0. Bouwdienst Rijkswaterstaat, Steunpunt Tunnelveiligheid, Apeldoorn.

Rijkswaterstaat (2007a). [NOA Nieuwe Ontwerprichtlijn Autosnelwegen](#). Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Adviesdienst Verkeer en Vervoer, Rotterdam.

Rijkswaterstaat (2007b). [Leidraad Veiligheidsdocumentatie voor Wegtunnels](#). Versie 1.0 oktober 2007. Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Bouwdienst Rijkswaterstaat, Steunpunt Tunnelveiligheid, Apeldoorn.

Rijkswaterstaat (2008). *Wegontwerp in tunnels Convergentie- en divergentiepunten in en nabij tunnels*. Versie 1.1. Steunpunt tunnelveiligheid, Rijkswaterstaat Bouwdienst, Apeldoorn

Robatsch, K. & Nussbaumer, C. (2004). [Verkehrssicherheitsvergleich von Tunneln mit Gegenverkehr und Richtungsverkehr in Österreich](#). In: Strasse + Autobahn, vol. 55, nr. 7, p. 383-387.

RvTV (2004). [Tweerichtingsverkeer in één tunnelbuis tijdens geplande werkzaamheden](#). Raad voor de Transportveiligheid, Den Haag.

Schreuder, D.A. (1993). [Contrastwaarnemingen in tunnels; Een meetmethode](#). R-93-36. Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV, Leidschendam.

Vashitz, G., Shinar, D. & Blum, Y. (2008). [In-vehicle information systems to improve traffic safety in road tunnels](#). In: Transportation Research part F, vol. 11, nr. 1, p. 61-74.

Verweij, C.A. (2000). [Evaluating acceleration and deceleration of heavy vehicles on gradients](#). In: Proceedings of the conference 'Traffic safety on two continents', 20-22 September 1999, Malmö, Sweden. VTI Konferens No. 13A, Part 1, p. 227-242.

Verwey, W.B., Alferdinck, J.W.A.M. & Theeuwes, J. (1996). [The quality of tunnel entrances in terms of safety and capacity](#). Rapport TM-96-C016, TNO Human Factors Research Institute, Soesterberg.
[Niet openbaar]