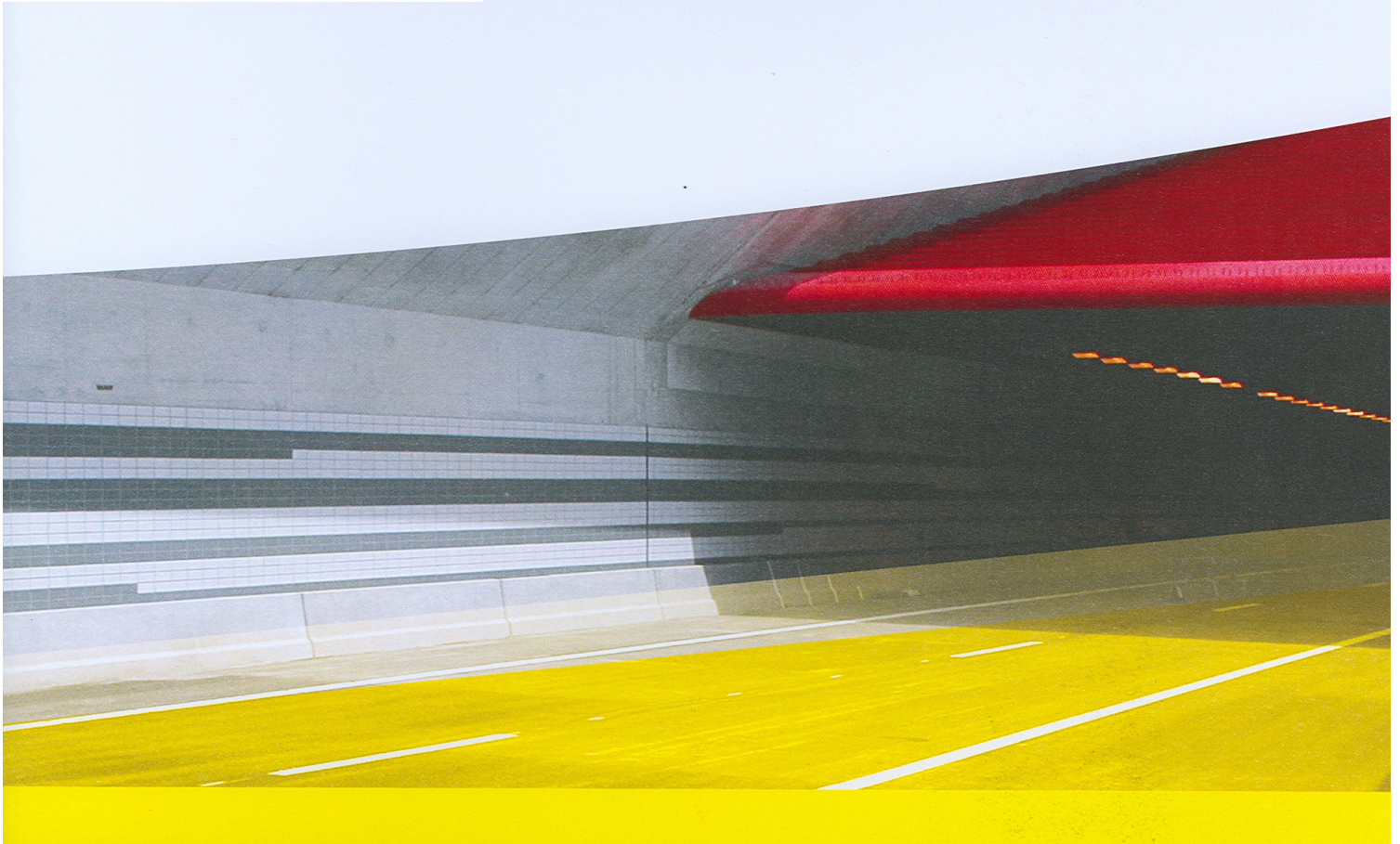


Versie 1.1

definitief



Rijkswaterstaat



Wegontwerp in tunnels Convergentie- en divergentiepunten in en nabij tunnels

Datum: 31-07-2008

**WEGONTWERP IN TUNNELS
CONVERGENTIE- EN DIVERGENTIEPUNTEN IN
EN NABIJ TUNNELS**

RIJKSWATERSTAAT BOUWDIENST
STEUNPUNT TUNNELVEILIGHEID

31 juli 2008

141234/CE8/034/003002

Inhoud

Samenvatting	5
1 Inleiding	7
1.1 Aanleiding	7
1.2 Onderzoeksvraag	8
1.3 Afbakening	8
1.4 Aanpak	8
1.5 Leeswijzer	9
2 Probleemanalyse	11
2.1 Inleiding	11
2.2 Definities en elementen	11
2.3 Praktijksituaties	14
2.3.1 Nederlandse tunnels	15
2.3.2 Buitenlandse tunnels	16
2.4 Verkeersafwikkelingproces	19
2.4.1 Algemeen	19
2.4.2 Specifieke omstandigheden in- en nabij tunnels	21
2.5 Richtlijnen en handboeken	23
2.5.1 Richtlijnen voor het ontwerpen van autosnelwegen	23
2.5.2 Richtlijnen voor het ontwerpen van Tunnels	25
2.6 Samenvatting	28
3 Onderzoeken	29
3.1 Is in- en uitvoegen bij tunnels veilig?	29
3.2 Ongevallenanalyse convergentie- en divergentiepunten	31
3.3 Tunnelverlichting, VRC-bijlagen	31
3.4 Het ontwerp van ingangsverlichting	34
3.5 Oostenrijks onderzoek verkeersveiligheid in tunnels	36
3.6 SAFESTAR-onderzoeken TNO	38
3.7 Files in tunnels	39
3.8 Verkeersafwikkelingproces en ongevalkansen	41
3.9 Conclusies	42
4 Minimale afstanden	43
4.1 Inleiding	43
4.2 Risicobenaderingen	43
4.3 Invulling risicobenaderingen	46
4.4 Referentie Europese tunnelrichtlijn	48
4.5 Toepassing risicobenaderingen	49
5 Maatregelen	63
5.1 Inleiding	63

5.2 Beschrijving maatregelen	64
6 Ontwerpproces	67
7 Conclusies en aanbevelingen	75
7.1 Conclusies	75
7.2 Aanbevelingen	76
Bijlage 1 Beschrijving maatregelen	79
Bijlage 2 Beschrijvingen Nederlandse tunnels	101
Bijlage 3 Beschrijvingen buitenlandse tunnels	111
Bijlage 4 Onderzoekresultaten ondersteunende studies	117
Bijlage 5 Oogadaptatie	119
Bijlage 6 Literatuurlijst	125
Colofon	127

Samenvatting

In dit onderzoek staat de volgende vraag centraal: Hoe kan het invoegen en uitvoegen in en nabij tunnels veilig plaatsvinden? Daarbij is het belangrijk om te bepalen in welke situaties en onder welke voorwaarden invoegen, uitvoegen en weven in of nabij tunnels verantwoord is. Hierbij is alleen gekeken naar tunnels in autosnelwegen.

In deze studie is op basis van het verkeersafwikkelingsproces bepaald welke minimale afstand tussen een convergentie- of divergentiepunt en de tunnelingang of -uitgang aangehouden moet worden. Daarbij zijn **alle** typen convergentie- en divergentiepunten beschouwd, zowel in, voor als na de tunnel.

De minimale afstanden zijn samengesteld uit de combinatie van de turbulentieafstand van een convergentie- of divergentiepunt en de afstand waarbinnen de weggebruikers gefixeerd zijn op de tunnelingang of de afstand die weggebruikers nodig hebben om te wennen aan de overgang van licht naar donker (of vice versa).

In onderstaande tabel zijn de minimale afstanden weergegeven:

Type	Locatie	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Meetpunten
Uitvoeger	Voor de tunnel	275 (400)	230 (335)	185 (265)	Puntstuk – tunnelingang
	In de tunnel, t.o.v. tunnelingang	585	465	355	Tunnelingang – puntstuk
	In de tunnel, t.o.v. tunneluitgang	230	170	125	Puntstuk – tunneluitgang
	Na de tunnel	480	390	300	Tunneluitgang – puntstuk
Splitsing	Voor de tunnel	275 (400)	230 (335)	185 (265)	Puntstuk – tunnelingang
	In de tunnel, t.o.v. tunnelingang	900	750	600	Tunnelingang – puntstuk ¹
	In de tunnel, t.o.v. tunneluitgang	230	170	125	Puntstuk – tunneluitgang
	Na de tunnel	900	750	600	Tunneluitgang – puntstuk ¹
Invoeger	Voor de tunnel	575 (750)	480 (625)	385 (500)	Puntstuk – tunnelingang
	In de tunnel, t.o.v. tunnelingang	210	150	105	Tunnelingang – puntstuk
	In de tunnel, t.o.v. tunneluitgang	605	485	375	Puntstuk – tunneluitgang
	Na de tunnel	180	140	100	Tunneluitgang – puntstuk
Samenvoeger	Voor de tunnel	375	315	250	Puntstuk – tunnelingang
	In de tunnel, t.o.v. tunnelingang	210	150	105	Tunnelingang – puntstuk
	In de tunnel, t.o.v. tunneluitgang	375	315	250	Puntstuk – tunneluitgang
	Na de tunnel	180	140	100	Tunneluitgang – puntstuk
Afstreping	Voor de tunnel	400	335	265	Einde rijstrook – tunnelingang
	In de tunnel, t.o.v. tunnelingang	-	-	-	-
	In de tunnel, t.o.v. tunneluitgang	-	-	-	-
	Na de tunnel	295	230	180	Tunneluitgang – einde rijstrook
Weefvak	Voor de tunnel	390	325	260	Puntstuk – tunnelingang
	In de tunnel, t.o.v. tunnelingang	210	150	105	Tunnelingang – puntstuk
	In de tunnel, t.o.v. tunneluitgang	230	170	125	Puntstuk – tunneluitgang
	Na de tunnel	180	140	100	Tunneluitgang – puntstuk
Extra strook	Voor de tunnel	200 (400)	165 (335)	135 (265)	Begin extra str. – tunnelingang
	In de tunnel, t.o.v. tunnelingang	-	-	-	-
	In de tunnel, t.o.v. tunneluitgang	-	-	-	-
	Na de tunnel	105	75	55	Tunneluitgang – begin extra str.

De waarden tussen haakjes zijn van toepassing op tunnels met hellingen (zinktunnels)

De minimale afstanden zijn vergeleken met de Europese Tunnelrichtlijn. In de Europese Tunnelrichtlijn is vastgesteld dat de rijbaan binnen en buiten de tunnel hetzelfde aantal rijstroken telt. Als het aantal rijstroken verandert, gebeurt dat op voldoende afstand voor het tunnelportaal. Deze afstand is tenminste gelijk aan de afstand die een voertuig bij de toegestane maximumsnelheid in 10 seconden aflegt.

Het is onduidelijk hoe de Europese richtlijn geïnterpreteerd moet worden en op welke overwegingen de eis is gebaseerd: wat zijn de referentiepunten waarop de 10 rijseconden betrekking hebben, geldt de richtlijn ook voor samenvoegers en splitsingen?

De minimale afstanden tussen een convergentie- of divergentiepunt en de tunnelingang of -uitgang die in deze studie worden aanbevolen, wijken in lichte mate af van de 10 seconden eis uit de Europese tunnelrichtlijn, zoals die in deze studie wordt geïnterpreteerd (in enkele gevallen zijn de geadviseerde afstanden kleiner).

Voor situaties waarin niet kan worden voldaan aan de minimale afstanden, zijn compenserende maatregelen beschreven, zoals het verlagen van de ontwerpsnelheid, het homogeniseren van verkeersstromen en het beheersen van volgafstanden.

Op basis van dit onderzoek wordt aanbevolen alleen wanneer het door geografische omstandigheden niet mogelijk is een convergentie- of divergentiepunt buiten de tunnel aan te leggen, (bij uitzondering) te overwegen een dergelijk punt in een tunnel aan te leggen. Voor convergentie- of divergentiepunten in tunnels zijn altijd (aanvullende) maatregelen noodzakelijk. Per situatie zal door (verkeers)veiligheidsexperts moeten worden beoordeeld of de maatregelen de veiligheid op een acceptabel niveau brengen. Vanwege de sterk uiteenlopende projectspecifieke omstandigheden is het niet mogelijk om in het algemeen aan te geven welke maatregelen voldoende zijn.

Om in de praktijk eenduidig de minimale afstanden te kunnen bepalen, is het nodig om de eisen in de Europese tunnelrichtlijn en Nederlandse Tunnelwet (WARVW en BARVW) expliciet te maken en de achtergronden waarop de eisen gebaseerd zijn, te vermelden.

De aanbevelingen voor de minimale afstanden tussen een convergentie- of divergentiepunt en de tunnelingang- of uitgang die in deze studie zijn gedaan, zijn gebaseerd op theorieën voor verkeersafwikkeling op convergentie- en divergentiepunten en het effect van een tunnelingang (en uitgang) op het rijgedrag van de weggebruikers. Het is wenselijk om deze theorieën en de minimale eisen die daaruit voortkomen, te valideren aan de hand van ongevallendata. Omdat het aantal Nederlandse tunnels waarbij een convergentie- en divergentiepunt vlakbij een tunnel ligt (nog) beperkt is, zou een dergelijk onderzoek bij voorkeur Europees uitgevoerd moeten worden. Het nadeel van een Europees onderzoek is echter wel dat de tunnels uit verschillende landen soms moeilijk met elkaar vergelijkbaar zijn.

De minimale afstanden zijn gebaseerd op de beïnvloedingsafstanden van een convergentie- of divergentiepunt en de tunnelingang- of uitgang. De lengtes van de invloedsgebieden van de tunnelingang en -uitgang zijn daarbij gebaseerd op een beknopte literatuurstudie. Uitgebreider onderzoek naar de relatie tussen rijgedrag en het binnenrijden en uitrijden van een tunnel, kan leiden tot een betere onderbouwing of aanpassing van de minimale afstanden.

HOOFDSTUK 1 Inleiding

1.1

AANLEIDING

Door ruimtelijke beperkingen, leefbaarheid problemen en het bereiken van de milieugrenzen, is er in toenemende zin aandacht voor het toepassen van tunnels. De in aanleg zijnde Leidsche Rijn tunnel, de A2-traverse door Maastricht, de Zuidas en de discussie rond de tunnel in de verbinding tussen de A6 en de A9 onder het Naardermeer, zijn daar voorbeelden van.

Steeds meer komen ook landtunnels in beeld, waarbij de lengte van de tunnels toeneemt in vergelijking met tunnels die in het verleden zijn gebouwd. Bovendien is in één project een dwarsprofiel van 4 rijstroken per rijbaan gepland. Doordat veel tunnels in stedelijk gebied worden aangelegd of zijn gepland, komen aansluitingen steeds dichterbij of zelfs in een tunnel te liggen.

In een lange tunnel neemt de kans van pech of een calamiteit in de tunnel toe. Ook als het verkeer moet in- en uitvoegen of weven in of vlakbij een tunnel, is het risico groter dan in situaties wanneer dit niet het geval is.

In de praktijk blijkt dat weggebruikers in verkeerstunnels van autosnelwegen in vergelijking met een wegsituatie in de open lucht een extra veiligheidsrisico lopen. Het extra risico in tunnels wordt veroorzaakt door een toename van de ernst van de gevolgen van een incident [1].

Voor lange (land)tunnels en tunnels met aansluitingen in of nabij de tunnel, is het belangrijk om te bepalen hoe groot de risico's zijn. Vervolgens kan bepaald worden hoe met het ontwerp, de inrichting en de uitrusting van de tunnel, het risico op een aanvaardbaar niveau kan worden gebracht (en tegen welke prijs).

De Bouwdienst van Rijkswaterstaat heeft ARCADIS opdracht gegeven om de wegontwerptechnische knelpunten (in de richtlijnen) te onderzoeken en aanbevelingen te doen voor maatregelen. De resultaten kunnen als input dienen voor nieuwe ontwerprijrichtlijnen of nader onderzoek.

1.2 ONDERZOEKSVRAAG

In deze studie staat de volgende onderzoeksvraag centraal:

HOE KAN HET INVOEGEN EN UITVOEGEN IN EN NABIJ TUNNELS VEILIG PLAATSVINDEN?

Bij diverse RWS-projecten, momenteel veelal in de planstudie- en ontwerpfase, is sprake van in- en uitvoegen of weven in of nabij tunnels.

Tijdens het ontwerpen is de verkeersveiligheid een terugkerend onderwerp van discussie. Daarom is onderzoek naar richtlijnen op dit gebied gewenst. Daarbij is het belangrijk om te bepalen in welke situaties en onder welke voorwaarden invoegen, uitvoegen en weven in of nabij tunnels verantwoord is.

1.3 AFBAKENING

Om de studie beheersbaar te houden, is het belangrijk het onderzoeksgebied duidelijk af te bakenen. In deze studie zijn de volgende randvoorwaarden gehanteerd:

- Een tunnel is een lange gesloten constructie. In dit onderzoek worden alleen tunnels beschouwd die langer zijn dan 250 m.
- Er worden alleen tunnels in autosnelwegen onderzocht.
- Naast in- en uitvoegers in of nabij tunnels, zullen ook samenvoegingen, splitsingen, weefvakken en afstrepingen (rijstrookverminderingen) in dit onderzoek betrokken worden.

1.4 AANPAK

Risico's en veiligheid in en rond een tunnel worden bepaald door een groot aantal factoren, zoals het geometrische ontwerp van de weg, de verkeerskundige inrichting, de verkeersintensiteit, de verkeerssamenstelling, de tunnelconstructie, de aanwezige veiligheidsvoorzieningen en de veiligheidsorganisatie.

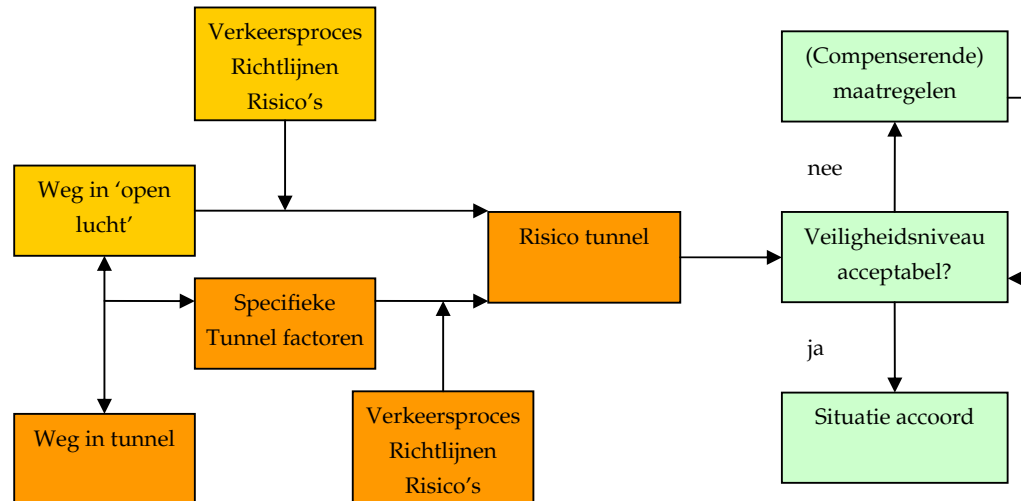
RISICO = KANS X GEVOLG

In dit onderzoek wordt bepaald welke factoren bepalend zijn voor het risico. Daarbij gekeken naar factoren die de kans op incidenten verhogen en factoren die bijdragen aan een toename van de ernst van de gevolgen.

De gevolgde stappen in dit onderzoek, zijn schematisch weergegeven in figuur 1.1:

Figuur 1.1

Aanpak studie



De aanpak van dit onderzoek is gebaseerd op een vergelijking tussen situaties op de 'open weg' en in tunnels. Op basis van beschrijvingen van het verkeersproces, eisen en wensen uit richtlijnen en risicoanalyses (kwalitatief en zo mogelijk kwantitatief), zijn voor beide situaties de risico's in kaart gebracht. Op basis van een analyse van de verschillen tussen situaties op de 'open weg' en tunnels, is bepaald wat de specifieke risico's in een tunnel zijn.

Omdat het risico opgebouwd is uit een kans- en een gevolgcomponent, zijn zowel de aspecten die invloed hebben op de kans op incidenten als de aspecten die de ernst van de gevolgen bepalen, onderzocht. Het product van kans en gevolg bepaalt het risico.

Is het veiligheidsniveau in of vlakbij de tunnel niet acceptabel, dan is dit het vertrekpunt voor een inventarisatie van risicoverlagende maatregelen. Vervolgens wordt bepaald of het effect van de maatregel dusdanig is, dat het veiligheidsniveau weer op een acceptabel niveau is teruggebracht. Op basis van de analyse van de effecten van de maatregelen, worden aanbevelingen gedaan voor het al dan niet toepassen van (compenserende) maatregelen en worden de maatregelen onderling vergeleken.

1.5

LEESWIJZER

In hoofdstuk 2 gaan wij in op de probleemanalyse; deze paragraaf heeft vooral een beschrijvend karakter. In hoofdstuk 3 wordt dieper ingegaan op de mogelijke risico's die zich voor kunnen doen. De minimale afstanden tussen convergentie- en divergentiepunten enerzijds en de tunnelingang en -uitgang anderzijds, komen in hoofdstuk 4 aan bod. In hoofdstuk 5 worden risicoverlagende maatregelen gepresenteerd. In hoofdstuk 6 worden alle bevindingen vertaald naar de toepassing in het ontwerpproces. Ten slotte worden in hoofdstuk 7 de conclusies en aanbevelingen gepresenteerd.

HOOFDSTUK

2 Probleemanalyse

2.1

INLEIDING

In deze probleemanalyse worden de volgende aspecten behandeld:

- Definities en elementen (2.2).
- Praktijksituaties (2.3).
- Verkeersafwikkelingproces (2.4).
- Richtlijnen en handboeken (2.5).

In paragraaf 2.6 wordt de probleemanalyse samengevat.

2.2

DEFINITIES EN ELEMENTEN***Tunnellengte***

Voor de bepaling van de tunnellengte wordt in deze studie uitgegaan van de lengte van het omsloten gedeelte van de langste tunnelbuis waarin een rijbaan is gelegen.

In principe telt een lichtrooster niet mee in de tunnellengte.

(Letse!)Ongevalfrequentie

De (letse!)ongevalfrequentie van een wegvak is het aantal ongevallen per motorvoertuigkilometer (lengte wegvak maal intensiteit) dat op het betreffende wegvak plaatsvindt. Per ongeval kunnen meerdere voertuigen betrokken zijn (en meerdere slachtoffers vallen).

Convergentie- en divergentiepunten

De weggebruiker reageert doorlopend op zijn omgeving, die primair bestaat uit de weg en het verkeer in zijn directe nabijheid. Daarnaast reageert men op het gedrag van het eigen voertuig. Ook elementen naast de weg en weersomstandigheden spelen een rol. Dit alles wikkelt zich af in een continu proces van: waarnemen – beoordelen – beslissen – handelen.

Het beperkte vermogen van de mens om diverse beslissingen tegelijk of zeer kort na elkaar te nemen, stelt ook voorwaarden aan de minimale afstand die tussen opeenvolgende beslis- of actiepunten moet worden aangehouden.

Om deze reden is het belangrijk om allereerst in te gaan op het verkeersafwikkelingproces dat plaatsvindt rond in- en uitvoegpunten. Daarbij wordt eerst gekeken naar het rijgedrag ter hoogte van in- en uitvoegpunten in het algemeen, en later naar de specifieke omstandigheden vlakbij of in tunnels.

Om uitwisseling van verkeer van een autosnelweg met het onderliggende wegennet en met een andere autosnelweg mogelijk te maken, worden zogenaamde convergentie- en divergentiepunten toegepast [2]:

CONVERGENTIEPUNT

Punt of gebied waar twee rijbanen ten behoeve van het verkeer met dezelfde rijrichting onder een flauwe hoek samenkomen en overgaan in één rijbaan.

DIVERGENTIEPUNT

Punt of gebied waar een rijbaan onder een flauwe hoek overgaat in twee rijbanen ten behoeve van het verkeer met dezelfde oorspronkelijke rijrichting.

Er zijn diverse types convergentie- en divergentiepunten (tabel 2.1):

Tabel 2.1

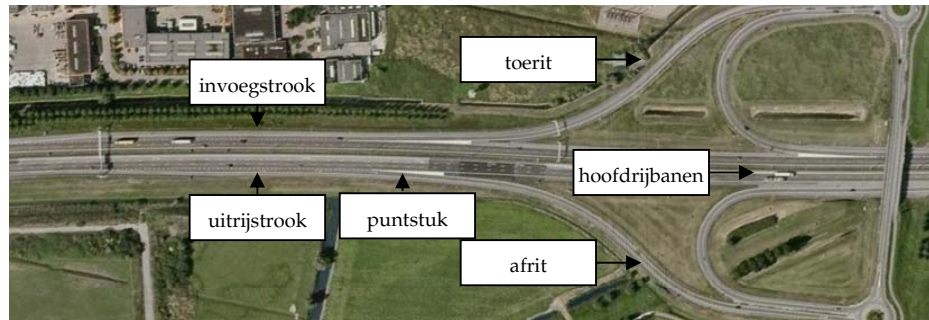
Definities convergentie- en divergentiepunten

Convergentiepunt	Omschrijving
Invoeging	Punt waar een rijbaan door middel van één of meer invoegstroken wordt ingevoerd in de doorgaande rijbaan.
Samenvoeging	Punt waar twee rijbanen samenkomen met ongeveer dezelfde ontwerpsnelheid, waarbij van elk der beide samenkomende rijbanen ten minste één rijstrook doorloopt.
Strookbeëindiging/ afstreping	Punt waarbij het aantal rijstroken van een doorgaande rijbaan wordt verminderd.
Divergentiepunt	Omschrijving
Uitvoeging	Punt waar een rijbaan door middel van één of meer uitrijstroken wordt afgeleid van de doorgaande rijbaan.
Splitsing	Punt waar een rijbaan overgaat in twee rijbanen met elk ongeveer dezelfde ontwerpsnelheid, waarbij beide rijbanen ten minste één rijstrook van de oorspronkelijke rijbaan bevatten.
Extra strook	Een extra strook is bedoeld om het verkeer extra capaciteit te bieden op het volgende wegvak. Deze strook wordt aan de linkerzijde van de verkeersbaan toegevoegd.
Convergentie - divergentiepunt	Omschrijving
Weefvak	Rijbaangedeelte van beperkte lengte tussen een convergentiepunt en een divergentiepunt, dat bedoeld is om te weven. Men onderscheid symmetrische en asymmetrische weefvakken. Symmetrische weefvakken hebben de volgende kenmerken: 1. het aantal rijstroken van de samenkomende rijbanen is gelijk aan dat van de uit elkaar gaande rijbanen. 2. het convergentiepunt en divergentiepunt liggen in het verlengde van dezelfde streep. In alle andere gevallen betreft het een asymmetrisch weefvak.

Uitwisseling tussen een autosnelweg en een niet-autosnelweg vindt plaats in een aansluiting. Verkeerskundig gezien, bestaat een aansluiting uit een hoofdrijbaan, een uitrijstrook, een afrit, een toerit en een invoegstrook (figuur 2.2).

Figuur 2.2

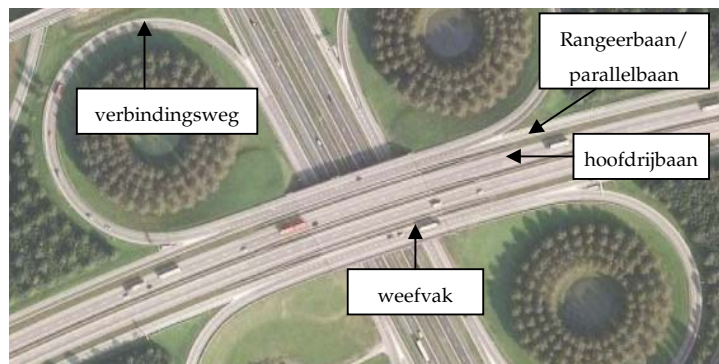
Voorbeeld convergentie- en
divergentiepunten



Uitwisseling van verkeer tussen twee autosnelwegen vindt plaats in knooppunten. In vergelijking met een aansluiting bestaat een knooppunt grotendeels uit dezelfde elementen, alleen in plaats van toe- en afritten worden verbindingswegen toegepast (klaverbladlussen, directe en semidirecte verbinding). Daarnaast kunnen in plaats van in- en uitvoegers ook samenvoegingen en splitsingen en weefvakken voorkomen (figuur 2.3).

Figuur 2.3

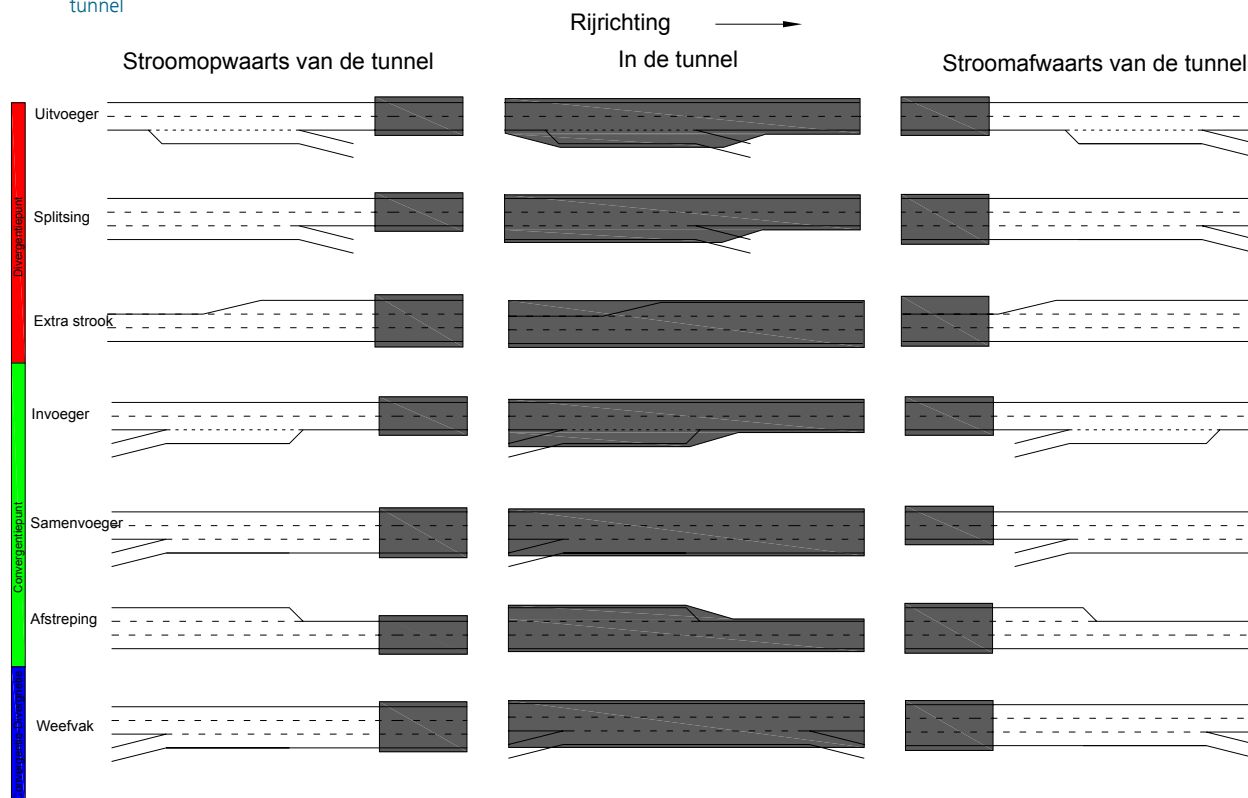
Voorbeeld convergentie- en
divergentiepunten



In figuur 2.4 zijn de mogelijke combinaties van convergentie- en divergentiepunten en tunnels weergegeven. Voor deze combinaties wordt bepaald onder welke voorwaarden ze acceptabel zijn.

Figuur 2.4

Mogelijke combinaties van convergentie- en divergentiepunten met een tunnel



Toelichting:

- Het betreft alle combinaties die in theorie mogelijk zijn. Later in de rapportage worden de combinaties geselecteerd die in de praktijk toegestaan zijn.
- Een samenvoeger en een weefvak dat begint voor de tunnel en een splitsing en een weefvak na de tunnel zijn gelijk; in het geval van een weefvak is er echter altijd sprake van een combinatie van een samenvoeger en een splitsing.

2.3

PRAKTIJSITUATIES

Alvorens in te gaan op de specifieke factoren die het verkeersafwikkelingsproces op convergentie- en divergentiepunten in en nabij tunnels beïnvloeden, bekijken we eerst waar welke type configuraties voorkomen, bij:

- Bestaande tunnels in Nederlandse autosnelwegen.
- Geplande of in ontwerp zijnde tunnels in Nederlandse autosnelwegen.
- Bestaande tunnels in buitenlandse autosnelwegen.

2.3.1

NEDERLANDSE TUNNELS

Bestaande tunnels in Nederlandse autosnelwegen

In de vorige paragraaf is ingegaan op de verschillende types convergentie- en divergentiepunten. In tabel 2.2 is voor de bestaande tunnels in Nederlandse autosnelwegen beschreven welke rijstrookconfiguraties zijn toegepast en op welke afstand de convergentie- en divergentiepunten van de tunnelingang liggen (gemeten vanaf puntstuk).

In Bijlage 2 zijn figuren en foto's van de configuraties van de tunnels opgenomen.

Tabel 2.2

Bestaande tunnels in
Nederland

Configuratie		Afstand ¹		Afstand	Configuratie
Beneluxtunnel (A4)	Samenvoeger (3+2) <=	850m		650m	<= invoeger (2+1)
	Splitsing (2+3) =>	750m		750m	=> uitvoeger (2+1)
Botlektunnel (A15)	Tapersplitsing (3 => 2+2) <=	750m		825m	<= uitvoeger/weefvak (3+1)
	Samenvoeger (2+1) =>	900m		900m	=> Invoeger/weefvak (3+1)
Coentunnel (A10)	Uitvoeger (2+1) <=	600m		400m	<= invoeger/afstropping (2+1)
	Invoeger (2+1) =>	600m		500m	=> 2-strooksuitvoeger (2+2)
Drechtunnel (A16)	Uitvoeger (2+1) <=	300m		250m	<= splitsing/weefvak (2+2)
	Splitsing (2+2) =>	350m		300m	=> uitvoeger (2+1)
Heinenoordtunnel (A29)	Splitsing (2+2) <=	1200m		1300m	<= invoeger (3+1)
	Tapersamenvoeger (2+2 => 3) =>	1300m		1300m	=> uitvoeger (4+1)
Noordtunnel (A15)	Uitvoeger (3+1) <=	1150m		1350m	<= invoeger (3+1)
	Invoeger (3+1) =>	950m		1400m	=> uitvoeger (3+1)
Schiphol tunnel (A4)	Samenvoeger/weefvak (4+2) <=	700m		375m	<= invoeger (2+1)
	Splitsing/weefvak (4+2) =>	800m		750m	=> uitvoeger (1+2)
Thomassentunnel (A15)	Uitvoeger (3+1) <=	220m		500m	<= Uitvoeger/weefvak (2+1)
	Samenvoeger (2+1) =>	120m		500m	=> Invoeger/weefvak (3+1)
Velsertunnel (A22)	Taperuitvoeger (2+2) <=	400m		450m	<= invoeger (2+1)
	Invoeger (2+1) =>	400m		500m	=> 2-strooks uitvoeger (2+2)
Vlaketunnel (A58)	Uitvoeger <=	1250m		1400m	<= invoeger (2+1)
	Invoeger =>	1700m		1400m	=> uitvoeger (2+1)
Wijkertunnel (A9)	Invoeger (2+1) <=	2100m		1250m	<= Invoeger (2+1)
	Taperuitvoeger (2+2) =>	2100m		1250m	=> Uitvoeger/afstropping (3+1)
Zeeburgertunnel (A10)	Uitvoeger (3+1) <=	500m		1300m	<= Invoeger (3+1)
	Invoeger (3+1) =>	500m		1300m	=> Splitsing (3+1)

Toelichting:

- Bij de meeste tunnels is de afstand tussen de tunnel en het convergentie- of divergentiepunt nog aanzienlijk. Bij de Drechtunnel, de Thomassentunnel, de Coentunnel, de Velsertunnel en de Zeeburgertunnel liggen deze punten redelijk dicht bij de tunnelingang of tunneluitgang (afstand kleiner dan 600m).

In paragraaf 2.5 en hoofdstuk 3 wordt een relatie gelegd met de eisen en wensen die de richtlijnen op dit gebied voorschrijven en de ongevallendata.

Geplande of in ontwerp zijnde tunnels in Nederlandse autosnelwegen

Momenteel is er een aantal tunnels in de fase van ontwerp en aanleg. Omdat het ontwerp van de meeste tunnels nog niet is vastgesteld, wordt hier volstaan met een globale beschrijving van de geplande configuraties:

- Gaasperdammertunnel (A9): in- en uitvoegers in de tunnel.
- Keizer Karel tunnel (A9): in en uitvoegers vlakbij de tunnel.
- Leidsche Rijn tunnel (A2): invoeger en uitvoeger vlakbij de tunnel.

¹ Afstand gemeten van het puntstuk tot aan het begin/einde van het gesloten deel van de tunnel.

- Midden Delfland tunnel (A4): convergentie-/divergentiepunt in de tunnel.
- Tunnel Maastricht (A2): weefvak in de tunnel.
- Dok Zuidas (A10): in- en uitvoegers vlakbij de tunnel.
- Roertunnel (A73, reeds geopend): invoeger vlakbij de tunnel (wordt aangepast).

2.3.2

BUITENLANDSE TUNNELS

Met behulp van Google Earth is een 'Quick Scan' uitgevoerd naar Europese tunnels waar convergentie- en divergentiepunten in of vlakbij de tunnelingang of -uitgang zijn gelegen. In de quick scan is een groot aantal tunnels gevonden waar dit het geval is.

In de tabellen 2.3-2.7 is een overzicht gegeven van deze tunnels. Het overzicht is niet uitputtend en alleen bedoeld om de lezer een indruk te geven van de buitenlandse ontwerpfilosofieën en uitvoering. In Bijlage 3 zijn figuren en foto's van de tunnels opgenomen.

Tabel 2.3

Tunnels bij Luik

Luik	Configuratie	Afstand		Afstand	Configuratie
Rondweg E25	Invoeger (2+1) <=	200m			<= uitvoeger (2+1)
	Uitvoeger (2+1) =>	200m			=> invoeger (2+1)
	Uitvoeger (2+1) <=	275m			<= invoeger (2+1)
	Invoeger (2+1) =>	300m			=> uitvoeger (2+1)
	Invoeger (2+1) =>	30m			<= uitvoeger (2+1) => invoeger (2+1)

Toelichting:

- Bij enkele tunnels in de rondweg zijn in- en uitvoegers op zeer korte afstand van de tunnel gelegen: afstanden kleiner dan 100m komen voor. In een enkel geval eindigt de invoegstrook in de tunnel.

Tabel 2.4

Tunnels bij Antwerpen

Antwerpen	Configuratie	Afstand		Afstand	Configuratie
Kennedytunnel (R1)	Taperuitvoeger (4+2) <=	1200m			<= invoeger (3+1)
	Samenv./afstr. (4-1) =>	400m			=> uitvoeger (3+1)
Craeybeckxtunnel (E19)	Invoeger (4+1) <=	600m			<= samenvoeger (3+1)
	Uitvoeger (4+1) =>	600m			=> Splitsing (2+1+1)

Toelichting:

- In de Craeybeckxtunnel wordt de rijbaan naar het noorden gesplitst in 3 rijbanen: richting het centrum van Antwerpen, richting de noordelijke ring en de zuidelijke ring. Het splitsingspunt voor de richting centrum Antwerpen is gelegen vlak voor de tunneluitgang (het puntstuk ligt net buiten de tunnel). Stroomopwaarts van de tunnelingang wordt het verkeer met bewegwijzering en afwijkende belijning al naar de juiste rijstrook voorgesorteerd.

- In zuidelijke richting voegen vlak voor de tunnelgang van de Craeybeckxtunnel 3 rijbanen samen. Het verkeer uit de richting centrum Antwerpen, voegt ter hoogte van de tunnelingang samen met het overige verkeer.

Tabel 2.5

Tunnels bij Parijs

Parijs	Configuratie	Afstand	Afstand	Configuratie
Périphérique (A86)				
Périphérique (A86)	Uitvoeger (2+1) <= Invoeger (2+1) =>	100m -50m	 	In aanbouw
Périphérique (A86)	-	-	  -50m -150m	<= invoeger (2+1) => uitvoeger (2+1)
A13	Afstreping (4-1) <= Uitvoeger (3+1) =>	300m 300m	  -50m -50m	<= samenvoeger (2+1) => splitsing (2+1)
E05	Uitvoeger (4-1) <= Invoeger (4+1) =>	50m 0m	 	

Toelichting:

- Bovenstaande tabel geeft slechts een aantal voorbeelden van convergentie- en divergentiepunten in en nabij tunnels. Op de ringwegen rond Parijs komen veel situaties voor waar het verkeer in of nabij een tunnel moet in- of uitvoegen. Vaak zijn deze situaties ook nog gecombineerd met korte in- of uitvoegstroken en horizontale bogen.

Tabel 2.6

Tunnels bij Aschaffenburg

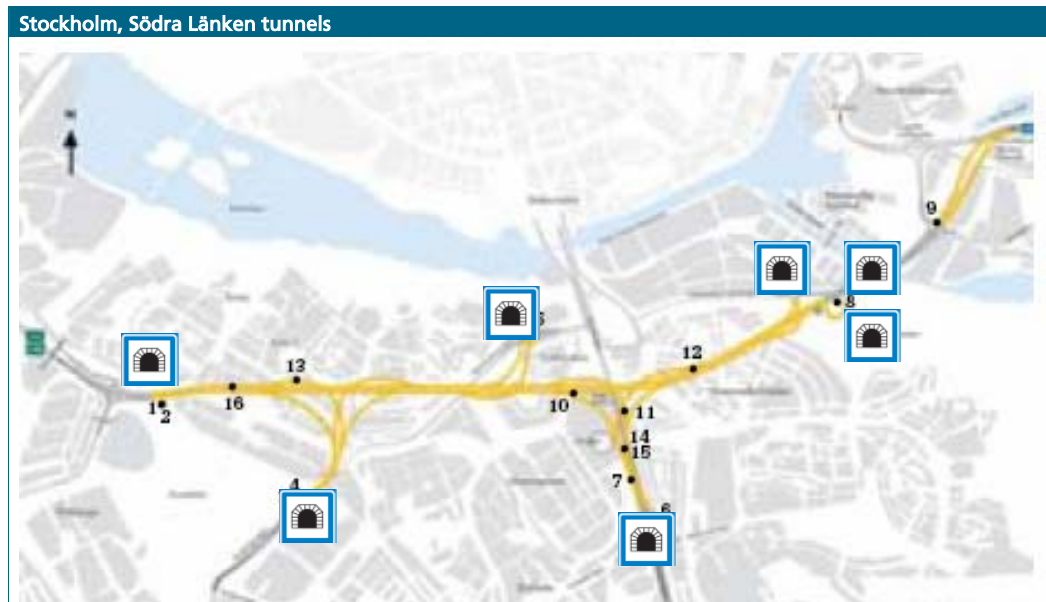
Aschaffenburg	Afstand	Configuratie	Afstand	Configuratie
Hösbach/Golzbach (A3)	 400m 400m	<= invoeger (3+1) => uitvoeger (3+1)	400m 400m	<= uitvoeger (3+1) => invoeger (3+1) 

Toelichting:

- De tunnel is ca. 1400m lang en op maaiveld gelegen. De tunnel wordt over enkele honderden meters onderbroken door een open gedeelte. In de tunnel is zowel een uitvoeger als een invoeger gelegen.

Tabel 2.7

Tunnels bij Stockholm



Toelichting:

- De Södra Länken bestaat uit een systeem van ondergrondse knooppunten en aansluitingen. In dit ondergrondse wegsysteem komen alle mogelijke configuraties voor: weefvakken, splitsingen, samenvoegers, invoegers en uitvoegers.

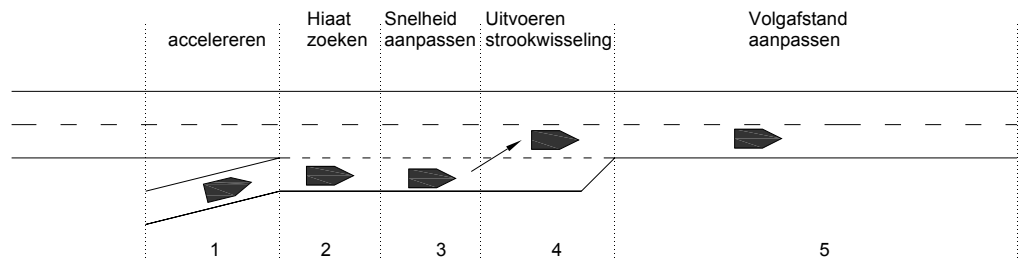
2.4 VERKEERSAFWIKKELINGPROCES

2.4.1 ALGEMEEN

In onderstaande figuren is voor elk type convergentie- en divergentiepunt het verkeersafwikkelingproces kort beschreven [3]. Daarbij is het proces telkens onderverdeeld in een aantal fases.

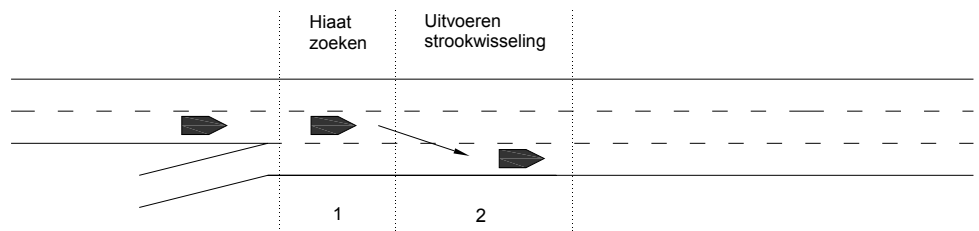
In hoofdstuk 3 wordt bepaald welke manoeuvres en handelingen wel en welke niet gewenst zijn in of nabij een tunnel.

INVOEGING



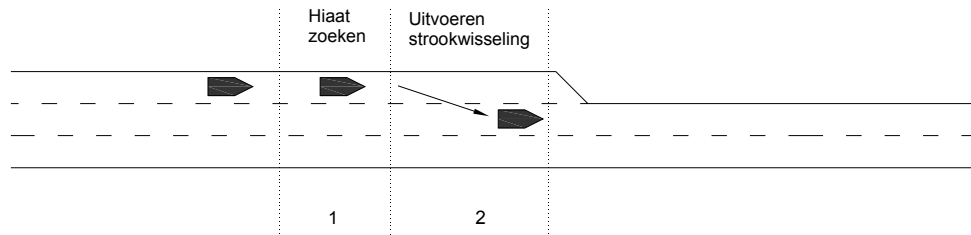
1. Op de toerit accelereren de voertuigen tot een dusdanige snelheid dat ter hoogte van het puntstuk de snelheid overeenstemt met de gerealiseerde snelheid op de rechterrijstrook van de doorgaande rijbaan.
2. Vervolgens wordt een geschikt hiaat gezocht in de verkeersstroom op de rechterrijstrook.
3. Is een hiaat gevonden, dan wordt de snelheid aangepast (middels acceleratie of declaratie).
4. Daarna vindt de eigenlijke invoegbeweging plaats.
5. Tenslotte past de weggebruiker zijn volgafstand aan tot zijn persoonlijke voorkeursafstand (in de gegeven omstandigheden).

SAMENVOEGING



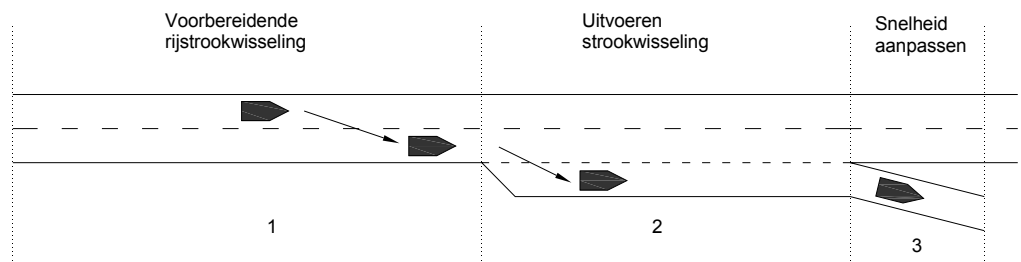
1. Bij een samenvoeging zijn er geen verplichte manoeuvres; het verkeer kan ongewijzigd zijn weg vervolgen. Alleen verkeer op middelste rijstrook wordt geacht na de samenvoeging naar de rechterrijstrook te gaan; in de verkeersstroom op de rechterrijstrook wordt een hiaat gezocht.
2. Nadat een geschikt hiaat is gevonden, wordt de rijstrookwisseling uitgevoerd.

STROOKBEEÏNDIGING/ AFSTREPING



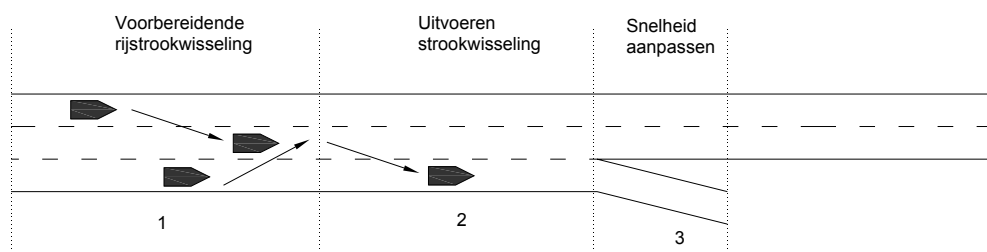
1. Het verkeer op de linkerrijstrook is bij een afstreping gedwongen om deze rijstrook te verlaten. Op enige afstand voor de afstreping zullen weggebruiker op de linkerrijstrook op zoek gaan naar een geschikt hiaat in de verkeersstroom op de middelste rijstrook.
2. Daarna wordt de rijstrookwisseling uitgevoerd; sommige weggebruikers zullen op geruime afstand voor de afstreping een rijstrook naar rechts opschuiven, andere zullen tot vlak voor het verdrijvingsvlak doorrijden.

UITVOEGING



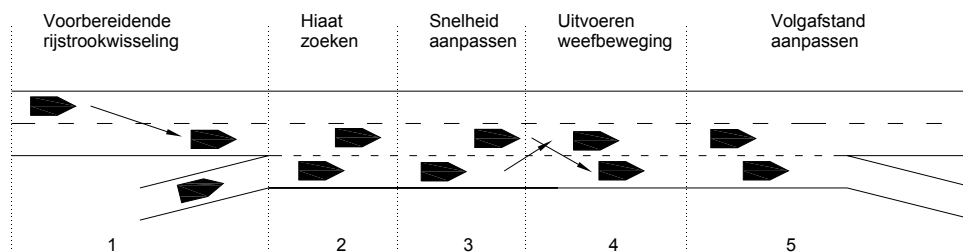
1. Verkeer naar de afrit dat zich stroomopwaarts van de uitvoeging op de linkerrijstrook bevindt, zal een voorbereidende rijstrookwisseling moeten uitvoeren, om vanaf de rechterrijstrook te kunnen uitvoegen.
2. Ter hoogte van de blokmarkering kan de feitelijke uitvoegbeweging plaatsvinden.
3. Na de uitrijstrook mindert de weggebruiker zijn snelheid (in de praktijk remmen veel weggebruikers al op de uitrijstrook af).

SPLITSING



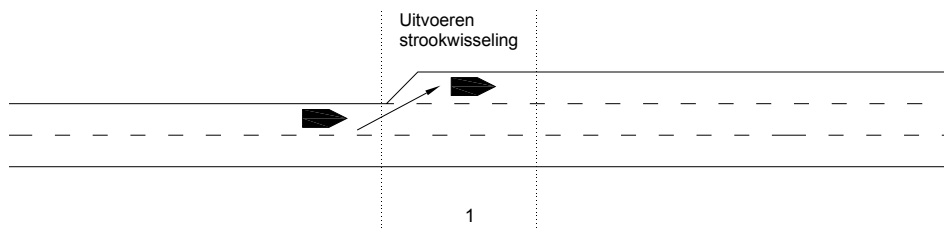
1. Verkeer dat zich stroomopwaarts op de linkerrijstrook bevindt en de doorgaande autosnelweg verlaat, zal voor de splitsingspunt naar de middelste rijstrook voorsorteren. Een belangrijke complicerende factor bij een splitsing is het verkeer dat van de rechterrijstrook een rijstrook naar links moet opschuiven om de doorgaande autosnelweg te blijven volgen.
2. Verder stroomafwaarts moeten deze weggebruikers nog een rijstrook naar rechts opschuiven om hun bestemming te kunnen bereiken. Ook hier kan dit verkeer weer gehinderd worden door verkeer dat een rijstrook naar links moet opschuiven.
3. Indien het wegvak na de splitsing een lagere (ontwerp)snelheid heeft, dan zal de weggebruiker na het splitsingspunt zijn snelheid aanpassen.

WEEFVAK



1. Indien de toe leidende (hoofd)rijbaan uit twee of meer rijstroken bestaat, wordt een voorbereidende rijstrookwisseling uitgevoerd naar de rechterrijstrook.
2. Vervolgens wordt een hiaat gezocht op de strook van bestemming in de aangrenzende verkeersstroom. Het aanbod van hiaten hangt daarbij af van de intensiteit van deze stroom.
3. Is een geschikt hiaat gevonden, dan wordt vervolgens middels acceleratie of deceleratie de snelheid aangepast.
4. Vervolgens wordt de eigenlijke weefbeweging uitgevoerd.
5. Ten slotte past de weggebruiker zijn volgafstand aan tot zijn persoonlijke voorkeursafstand (in de gegeven omstandigheden).

EXTRA RIJSTROOK



1. Een extra rijstrook wordt altijd aan de linkerzijde toegevoegd. De weggebruiker kan van rijstrook wisselen naar een lege rijstrook.

2.4.2

SPECIFIEKE OMSTANDIGHEDEN IN- EN NABIJ TUNNELS

In de vorige paragraaf is het verkeersafwikkelingsproces op verschillende typen convergentie- en divergentiepunten beschreven. Dit is gedaan in het algemeen en niet specifiek voor tunnels. In en nabij tunnels is er sprake van bijzondere omstandigheden, die de verkeersafwikkeling (kunnen) beïnvloeden:

- Lichtomstandigheden

De overgang van de open weg naar een tunnel, en vice versa, vormt een overgang tussen verschillende lichtomstandigheden. Met name bij de tunnelingang, maar ook bij de tunneluitgang, is het belangrijk om de weggebruiker geleidelijk te laten wennen aan de gewijzigde lichtomstandigheden. Is de overgang te abrupt, dan zal de weggebruiker te veel aandacht moeten besteden aan de gewijzigde omstandigheden, wat ten koste gaat van de aandacht voor de weg en het verkeer.

Bij het uitrijden van de tunnel moeten de weggebruikers weer wennen aan het lichtniveau buiten de tunnel. Hoeveel rijseconden voor de oogaccommodatie donker/licht nodig zijn, is sterk situatie gebonden (bij lange tunnels is meer lengte nodig dan bij korte tunnels, het toepassen van luifels heeft ook invloed).

Ook de ligging van de tunneluitgang (noord-zuid of oost-west) is van invloed op het ongevallenpatroon; vooral bij tunnels met een oost-west oriëntatie kan de weggebruiker door de laag staande zon verblind worden.

- Minder zicht

In tunnels die in bogen zijn gelegen, wordt het zicht op het voorliggende weggedeelte beperkt door de tunnelwanden en het tunneldak. De mate van beperking is afhankelijk van de toegepaste boogstralen en de afstand tussen de rijbaan en de tunnelwand. Daar waar weggebruikers onvoldoende zicht op voorliggers of het verloop van de weg hebben, kan dit (ongewenste) reacties als (plotseling) remmen in de hand werken.

- Gesloten constructie

De aanwezigheid van tunnelwanden en een tunneldak, roept bij een (klein) deel van de weggebruikers angstgevoelens op. Deze groep kan door deze gevoelens mogelijk onverwacht handelen (remmen, uitwijken), wat negatieve consequenties voor de verkeersveiligheid kan hebben.

- Ontbreken van de vluchtstrook

In de meeste tunnels ontbreken vluchtstroken. In het geval van pech is er geen ruimte om het voertuig buiten de verkeersstroom te plaatsen en zal het verkeer direct gehinderd worden. Bovendien kunnen hulpdiensten een pechgeval lastiger bereiken.

Indien een vluchtstrook ontbreekt kan een weggebruiker die niet tijdig kan invoegen, niet doorrijden over de vluchtstrook (ook al is dit niet toegestaan).

- Hellingen

Vooraf in tunnels die rivieren of zeearmen kruisen moeten weggebruikers aanzienlijke hoogteverschillen overwinnen. Op neergaande hellingen gaat dit gepaard met snelheidstoenames, op stijgende hellingen met snelheidsdalingen. Omdat niet alle voertuigen dezelfde snelheidsverandering ondergaan, ontstaan er ook snelheidsverschillen (de snelheidsveranderingen treden vooral op bij het vrachtverkeer). De snelheidsverschillen hebben een negatieve invloed op de kans op ongevallen.

- Wegbeeld

Een tunnel vormt voor de weggebruiker een discontinuïteit in het wegbeeld. Zeker wanneer het een diepgelegen tunnel betreft met hellingen en een duidelijk ingangsportaal. In de tunnel wordt het wegbeeld begrensd door de tunnelwanden.

Door deze 'bijzondere omstandigheden' neemt de alertheid van de weggebruiker toe. Bij een zinktunnel zoals de Beneluxtunnel al bij het binnenrijden, bij een landtunnel als de Roertunnel vooral pas in de tunnel (zie figuur 2.5).

Figuur 2.5

Beneluxtunnel (links) en

Roertunnel (rechts)



2.5

RICHTLIJNEN EN HANDBOEKEN

In deze paragraaf wordt ingegaan op nationale en internationale richtlijnen en handboeken die betrekking hebben op de positioneringen van convergentie- en divergentiepunten. In eerste instantie gaan wij in op richtlijnen en handboeken voor wegvakken in de 'open lucht', vervolgens wordt er gekeken naar documenten die specifiek voor tunnels bedoeld zijn.

2.5.1

RICHTLIJNEN VOOR HET ONTWERPEN VAN AUTOSNELWEGEN

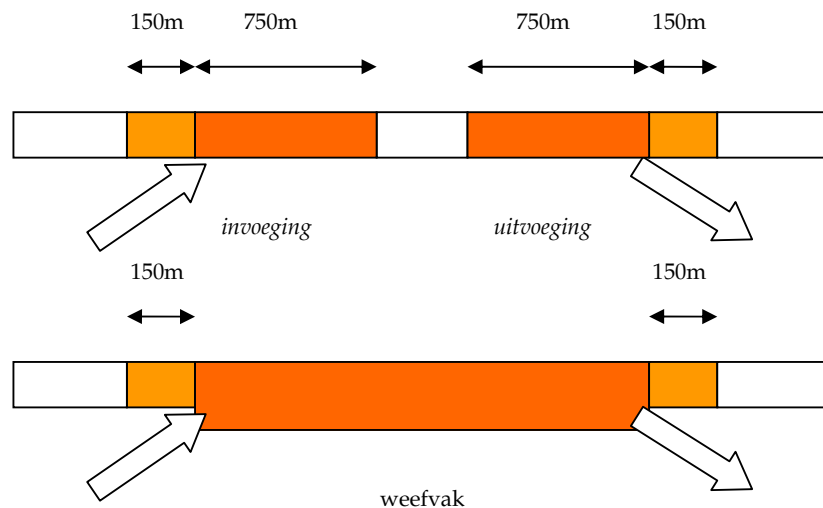
Nederlandse Richtlijnen voor het ontwerpen van autosnelwegen

Invloedsgebieden

In de (oude, niet meer vigerende) Richtlijnen voor het ontwerpen van autosnelwegen (ROA), Hoofdstuk 1 'Basiscriteria' zijn de invloedsgebieden van de verschillende convergentie- en divergentiepunten opgenomen (figuur 2.6) [4]:

Figuur 2.6

Invloedsgebieden invoeging, uitvoeging en weefvak



Opmerkingen:

- Uit de richtlijnen blijkt niet duidelijk wat onder de invloedsgebieden kan worden verstaan en hoe de ontwerper hiermee moet omgaan: hoe erg is het als twee invloedsgebieden elkaar overlappen en wat zijn de consequenties voor de weggebruikers?
- De invloedsgebieden van samenvoegers, splitsingen en afstrepingen worden niet behandeld: welke afstanden moet de ontwerper voor deze convergentie- en divergentiepunten aanhouden?

Turbulentieafstanden

In zowel de oude ontwerprichtlijnen (ROA) [2], als de vigerende richtlijnen (NOA) [5], is het begrip turbulentieafstand opgenomen.

Turbulentieafstanden zijn de afstanden rondom convergentie- en divergentiepunten waarover het rijgedrag en de afwikkeling worden beïnvloed als gevolg van die convergentie- en divergentiepunten.

Turbulentie kenmerkt zich onder meer door afwijkingen in de volgtijd tussen voertuigen en de verdeling van het verkeer over de stroken. Bijbehorende rijgedragkenmerken zijn bijvoorbeeld remacties, uitwijkmanoeuvres of (anticiperende) rijstrookwisselingen.

Turbulentieafstanden hebben een directe relatie met de eerder genoemde invloedsgebieden. Feitelijk zijn de turbulentieafstanden een nadere invulling van de invloedsgebieden.

In de NOA zijn de maatgevende turbulentieafstanden opgenomen (tabel 2.8):

Tabel 2.8

Overzicht turbulentieafstanden

Ligging wegvak	ontwerpsnelheid				meetpunt
	120 km/h	100 km/h	80 km/h	50 km/h	
Stroomopwaarts van invoeging	150	130	100	n.v.t.	Spitse punt puntstuk
Stroomafwaarts van invoeging	750	600	500	n.v.t.	Spitse punt puntstuk
Stroomopwaarts van samenvoeging	150	120	100	n.v.t.	Spitse punt puntstuk
Stroomafwaarts van samenvoeging	375	300	250	n.v.t.	Spitse punt puntstuk/taper
Stroomopwaarts van uitvoeging	750	600	500	n.v.t.	Spitse punt puntstuk/taper
Stroomafwaarts van uitvoeging	150	120	100	n.v.t.	Spitse punt puntstuk
Stroomopwaarts van splitsing	150	120	100	n.v.t.	Begin blokmarkering
Stroomafwaarts van splitsing	150	120	100	n.v.t.	Spitse punt puntstuk
Stroomopwaarts van afstreping	375	300	250	n.v.t.	Begin verdrijfstrepen
Stroomafwaarts van afstreping	150	120	100	n.v.t.	Einde verdrijfstrepen

Toelichting:

- Turbulentie vindt plaats voor en na een discontinuïteit. Om de minimale lengte van een wegvak tussen twee discontinuïteiten op basis van turbulentie te kunnen bepalen, moeten dus twee turbulentieafstanden gecombineerd worden. Dit geldt ook voor de turbulentieafstanden van weefvakken; weefvakken beginnen met een invoeging of samenvoeging en eindigen met een uitvoeging of splitsing.
- De benodigde minimale lengte van een wegvak tussen twee discontinuïteiten uit een oogpunt van turbulentie, is te bepalen door:
 - Te kijken naar het weggedeelte 'stroomafwaarts van de discontinuïteit, dat aan de te toetsen lengte voorafgaat (in de rijrichting gezien).
 - Te kijken naar het weggedeelte 'stroomopwaarts van de discontinuïteit, dat is gelegen aan het einde van de te toetsen lengte (in de rijrichting gezien).
 - Beide afstanden te combineren.

Bij twee opeenvolgende convergentiepunten moeten de afstanden bij elkaar worden opgeteld, in alle andere gevallen kan de helft van de som van de twee waarden worden genomen, omdat voorbij een convergentiepunt sprake is van meer verkeer dan stroomopwaarts van een convergentiepunt.

Voorbeeld 1: de turbulentieafstand tussen een invoeging (convergentie) gevolgd door een strookbeëindiging (convergentie) bedraagt bij 120 km/h: $750 + 375 = 1125\text{m}$ (zie pagina 7-26 NOA).

Voorbeeld 2: de turbulentieafstand tussen een uitvoeging (divergentie) gevolgd door een invoeging (convergentie) bedraagt bij 120 km/h: $(150 + 150)/2 = 150\text{m}$.

Opmerkingen:

- In de richtlijnen wordt geen onderscheid gemaakt in het aantal rijstroken. De vraag is of dit terecht is: het is niet ondenkbaar dat bij een toenemend aantal rijstroken, ook de turbulentieafstand toeneemt. Zo zullen weggebruikers op de linkerrijstrook met bestemming afrit, bij een 4-strooks rijbaan verder van de te voren van rijstrook gaan wisselen dan op een rijbaan met maar 2 rijstroken.
- Uit de richtlijnen is niet te herleiden hoe de afstanden zijn bepaald en wat de consequenties zijn als niet aan de minimale afstanden wordt voldaan. Hoe ernstig is een afwijking voor de verkeersveiligheid?
- Een tunnelingang en –uitgang zijn niet opgenomen in de richtlijnen. Mogen deze twee elementen als convergentiepunt en divergentiepunt worden gezien, en zo ja, welke turbulentieafstanden zijn dan van toepassing? In hoofdstuk 4 wordt teruggekomen op deze vraag.

Buitenlandse richtlijnen voor het ontwerpen van autosnelwegen

AGR

In de 'European Agreement on Main International Traffic Arteries (AGR)' zijn eisen opgenomen ten aanzien van het ontwerp van Europese hoofdwegen [6]. Er zijn geen specifieke eisen opgenomen voor tunnels of de ligging en toepassing van convergentie- en divergentiepunten in tunnels.

Oostenrijkse, Zwitserland en Frankrijk

In zowel de Oostenrijkse, Zwitserse als de Franse richtlijnen voor het ontwerpen van autosnelwegen, zijn geen eisen opgenomen ten aanzien van de positionering van convergentie- en divergentiepunten in of nabij tunnels.

2.5.2

RICHTLIJNEN VOOR HET ONTWERPEN VAN TUNNELS

In deze paragraaf worden uit de nationale en internationale richtlijnen en handboeken voor het ontwerpen van tunnels de passages gedestilleerd, die betrekking hebben op de positionering van convergentie- en divergentiepunten.

SATO

In de SATO (Specifieke Aspecten Tunnel Ontwerp) zijn in hoofdstuk 2 eisen en wensen opgenomen ten aanzien van dwarsprofielen en lengteprofielen [7].

In de SATO wordt niet gerefereerd aan het al dan niet toepassen van in- en uitvoeger in of nabij tunnels.

WARVW en BARVW

In 2006 zijn de Wet Aanvullende Regels Veiligheid Wegtunnels (WARVW) [8] en het Besluit Aanvullende Regels Veiligheid Wegtunnels (BARVW) [9] vastgesteld. In deze wet en dit besluit zijn eisen vastgelegd waaraan Nederlandse wegtunnels moeten voldoen.

In deze paragraaf wordt ingegaan op de passages die betrekking hebben op de positionering van convergentie- en divergentiepunten in of nabij tunnels.

In Staatsblad 2006 248 BARVW, Artikel 10, lid 1 wordt gesteld:

“De rijbaan voor een tunnelbuis heeft hetzelfde aantal rijstroken als die in de tunnelbuis. Mogelijke vermindering van het aantal rijstroken voor de tunnelbuis, vindt op zodanige afstand voor de tunnelbuis plaats dat geen onrustige verkeersbewegingen als gevolg van die vermindering in de tunnelbuis kunnen optreden”.

Verder is de zogenaamde gelijkwaardigheidsbepaling van belang (BARVW, Artikel 4, lid 1):

“Aan een in deze paragraaf gesteld voorschrift hoeft niet te worden voldaan voor zover een andere wijze ten minste eenzelfde mate van veiligheid biedt als met het betrokken voorschrift is beoogd.”

Opmerkingen:

- Beide artikelen zijn kwalitatief van aard; er wordt geen norm gesteld aan minimale afstanden of een ongewenst type manoeuvre. Ook de omschrijving ‘eenzelfde mate van veiligheid’ wordt niet ondersteund door een kwantitatieve eis. Ook is de wijze van bepaling van het veiligheidsniveau niet uitgewerkt.
- Het is onduidelijk of met dit artikel alleen afstrepingen worden bedoeld of ook invoegingen. Volgens de gangbare verkeerskundige definities zou dit artikel alleen van toepassing zijn op afstrepingen. Vermoed wordt echter dat ook invoegingen met dit artikel worden bedoeld.
- In artikel 10 lid 1 wordt gesteld dat het aantal rijstroken voor en in de tunnel gelijk moet zijn; ook in situaties waar het aantal rijstroken gelijk blijft (samenvoegingen), kunnen onrustige verkeersbewegingen voorkomen.
- Configuraties na de tunnel die onrustige verkeersbewegingen in de tunnel kunnen veroorzaken, worden niet genoemd;
- Convergentie- en divergentiepunten in de tunnel worden niet expliciet genoemd. Het is onduidelijk of bijvoorbeeld ook invoegingen in een tunnel met artikel 10 worden uitgesloten.

Europese tunnelrichtlijn

De Europese Richtlijn “Directive 2004/54/EC of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 on minimum safety requirements for tunnels in the trans-European road network” [10].

In de Europese tunnelrichtlijn zijn in Annex I, de volgende relevante passages (in het kader van dit onderzoek) opgenomen (om interpretatieverschillen te voorkomen, zijn zowel de Engelse als de Nederlandse tekst opgenomen):

Artikel 2.1, Number of tubes and lanes, Artikel 2.1.3:

“With the exception of the emergency lane, the same number of lanes shall be maintained inside and outside the tunnel. Any change in the number of lanes shall occur at a sufficient distance in front of the tunnel portal; this distance shall be at least the distance covered in 10 seconds by a vehicle traveling at the speed limit. When geographic circumstances prevent this, additional and/or reinforced measures shall be taken to enhance safety.”

“Afgezien van de vluchstrook blijft de weg binnen en buiten de tunnel hetzelfde aantal rijstroken tellen. Als het aantal rijstroken verandert, gebeurt dat op voldoende afstand voor het tunnelportaal. Deze afstand is tenminste gelijk aan de afstand die een voertuig bij de toegestane maximumsnelheid in 10 seconden aflegt. Indien dit wegens geografische omstandigheden niet mogelijk is, worden aanvullende en/of strengere maatregelen getroffen om de veiligheid te waarborgen”.

Artikel 3.9 Distances between vehicles and speed:

“The appropriate speed of vehicles and the safe distance between them are especially important in tunnels and shall be given close attention. This shall include advising tunnel users of appropriate speeds and distances. Enforcement measures shall be initiated as appropriate. Road users driving passenger cars should under normal conditions maintain a minimum distance from the vehicle in front of them equivalent to the distance traveled by a vehicle in two seconds. For heavy goods vehicles this distance should be doubled”.

“Een juiste snelheid van en een veilige afstand tussen voertuigen zijn bijzonder belangrijk in tunnels en moeten nauwlettend in de gaten worden gehouden. Dit houdt in dat tunnelgebruikers advies wordt gegeven over passende snelheden en afstanden. Waar nodig worden handhavingsmaatregelen ingevoerd. Onder normale omstandigheden bewaren de bestuurders van personenvoertuigen ten opzichte van de voorligger een minimumafstand die gelijk is aan de afstand die een voertuig in twee seconden aflegt. Voor vrachtwagens geldt het dubbele van deze afstand.”

Opmerkingen:

- De opmerkingen die van toepassing zijn op de WARVW zijn grotendeels ook hier van toepassing (dit is ook niet vreemd, omdat de WARVW van de Europese tunnelrichtlijn is afgeleid).
- In tegenstelling tot de WARVW, is in de Europese tunnelrichtlijn wel de afstand tussen de rijstrookvermindering en de tunnelingang gekwantificeerd (minimaal 10 rijseconden).
- Het is echter niet duidelijk op welke meetpunten de eis van toepassing is.
- De Europese tunnelrichtlijn is van toepassing op het trans-Europees wegennet.

Omdat artikel 2.1.3 op verschillende wijzen geïnterpreteerd kan worden, is het betreffende artikel door het Steunpunt Tunnelveiligheid in Brussel aan het Comité van tunnelexperts voorgelegd:



EUROPEAN COMMISSION
DIRECTORATE-GENERAL ENERGY AND TRANSPORT
DIRECTION E – Inland Transport
Road Safety

Brussels, 30 January 2007
TREN E3/

Number of lanes inside and outside the tunnels (Annex I, par. 2.1.3)

Paragraph 2.1.3 of Annex I reads "With the exception of the emergency lane, the same number of lanes shall be maintained inside and outside the tunnel. Any change in the number of lanes shall occur at a sufficient distance in front of the tunnel portal; this distance shall be at least the distance covered in 10 seconds by a vehicle traveling at the speed limit. [...]"

Purpose of this paragraph is to avoid that a reduction (or an increase) of the number of ordinary lanes occur in the tunnel or in its proximity; the number of lanes at the entry portal of the tunnel shall be equal to the number of the lanes at the exit portal of the tunnel. So, for example, a three lanes tube shall not end in a two lanes tube. Moreover, ordinary lanes shall end or start at a sufficient distance from both the entry and exit portal of the tunnel, as defined by the above-mentioned paragraph.

Ramps and interchanges are not concerned by this paragraph. Of course, recommendations to avoid such solutions are appreciable.

Opmerkingen:

- Het artikel heeft geen betrekking op in- en uitvoegers in de tunnel (ramps and interchanges).

Franse richtlijnen

Het 'Centre d'Etudes des Tunnels' van het Franse Ministerie van Infrastructuur en Transport heeft een 'Guide to Road Tunnel Safety Dossiers' opgesteld [11].

In de handreiking worden files en rijstrookwisselingen als potentiële gebruiksrisico's aangeduid. Welke situaties wel en welke niet acceptabel zijn, is echter niet benoemd.

2.6

SAMENVATTING

- Bij de meeste bestaande Nederlandse tunnels zijn convergentie- en divergentiepunten op ruime afstand van de tunnelingang cq tunneluitgang gelegen.
- In het buitenland komen wel veel tunnels voor waar vlak bij de tunnel in- en uitvoegers gelegen zijn. In Stockholm is zelfs een ondergronds netwerk van in- en uitvoegers en weefvakken aangelegd.
- Overwogen wordt om ook in Nederlandse tunnels tunnels convergentie- en divergentiepunten in de tunnel aan te leggen.
- Uitgaande van het verkeersafwikkelingproces, is het wenselijk om minimale afstanden tussen de diverse convergentie- en divergentiepunten en de tunnelingang of uitgang aan te houden.
- In de Nederlandse en de Europese tunnelrichtlijn zijn eisen opgenomen voor deze minimale afstanden. Deze eisen zijn echter niet eenduidig en dus aan interpretatie onderhevig.

HOOFDSTUK 3 Onderzoeken

In dit hoofdstuk worden onderzoeken beschreven die een relatie hebben met de risico's van het in- en uitvoegen in en nabij tunnels.

3.1 IS IN- EN UITVOEGEN BIJ TUNNELS VEILIG?

Door de Bouwdienst is in 2004 de studie "Is in- en uitvoegen bij tunnels veilig? Een verkeersveiligheidsonderzoek naar de ligging van in- en uitvoegstroken nabij tunnels" [12] uitgevoerd.

In deze studie is gezocht naar de invloed van con- en divergentiepunten op de verkeersveiligheid van tunnelwegvakken in Nederland.

Als hypothese is gesteld dat:

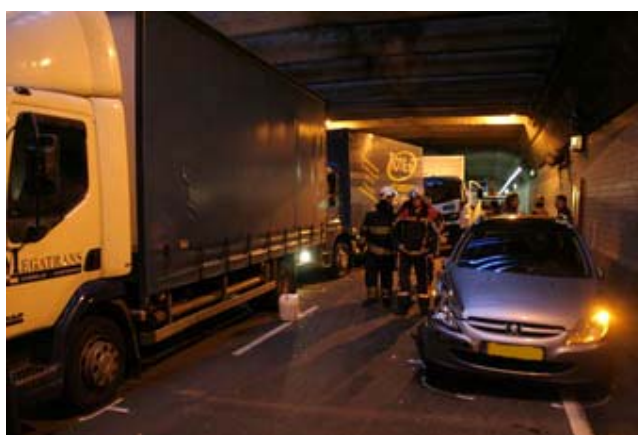
De ongevalfrequentie meer dan evenredig toeneemt, naarmate de afstand tussen de con- en divergentiepunten tot een tunnel afneemt.

Deze hypothese is getoetst aan de hand van ongevalgegevens, intensiteitgegevens en wegvakgegevens, afkomstig van 11 autosnelwegtunnels in Nederland over een periode van 10 jaar (1992-2001). In Bijlage 4 zijn de onderzoeksresultaten in grafiekvorm opgenomen.

Op basis van dit onderzoek kan de hypothese niet verworpen worden: er bestaat een verband tussen de ongevalfrequentie en de afstand tussen het begin c.q. einde van een tunnel en het eerstvolgende con- of divergentiepunt.

In het onderzoek wordt geconcludeerd dat de oorzaak van dit verband moeilijk is vast te stellen, omdat een groot aantal factoren de verkeersveiligheid van (tunnel)wegvakken bepaalt. Daarom is onderzoek gedaan naar (eventuele) ongevalpieken op de tunnelwegvakken. Er zijn drie locaties gevonden die een bovengemiddeld hoge ongevalfrequentie hebben:

- Con- of divergentiepunten (voornamelijk invoegstroken).
- De tunnelingang.
- Het diepste punt van de tunnel.



Ongeval Coentunnel 22 januari 2008

Bovendien zijn er bij een aantal tunnels (met name de Coentunnel en de Velsertunnel) ongevalpieken gevonden waarbij een convergentiepunt en een tunnelingang dicht bij elkaar liggen [12]. Bij de Velsertunnel zijn zelfs maatregelen genomen om het aantal ongevallen te verminderen en de verkeersafwikkeling te verbeteren.

Ook bij de reconstructies van de Schipholtunnel zijn aanpassingen gedaan aan een uitvoeging. Hier is de uitvoeging verder van de tunneluitgang gelegd, omwille van de verkeersveiligheid en de verkeersafwikkeling.

Over het algemeen kan worden geconcludeerd dat het aanleggen van con- of divergentiepunten vlakbij een tunnel nadelig is voor de verkeersveiligheid. Verder is gevonden dat bij de con- en divergentiepunten en de tunnelingang relatief meer letselongevallen voorkomen dan bij het diepste punt van een tunnel.

3.2

ONGEVALLENANALYSE CONVERGENTIE- EN DIVERGENTIEPUNTEN

Om een indruk te krijgen van het (extra) risico bij elke type convergentie- en divergentiepunt, is specifiek voor deze studie bepaald hoe het aantal ongevallen in het invloedsgebied van het convergentie- of divergentiepunt zich verhoudt tot het aantal ongevallen op het aangrenzende wegvak. Daarbij is het aangenomen dat de intensiteiten niet te veel variëren.

Dit is gedaan door van 5 bestaande situaties van elk type convergentie- en divergentiepunt het aantal ongevallen over een periode van 5 jaar te tellen (periode 2002-2006). Daarbij zijn situaties geselecteerd waarbij het betreffende convergentie- en divergentiepunt zo min mogelijk in het invloedsgebied van een ander convergentie- of divergentiepunt is gelegen.

Resultaten:

- Bij vrijwel alle onderzochte convergentie- en divergentiepunten is het aantal ongevallen in het invloedsgebied hoger dan op de aangrenzende wegvakken op dezelfde autosnelweg.
- Omdat het aantal ongevallen niet gerelateerd is aan de intensiteiten (er zijn geen ongevalfrequenties bepaald), mogen de convergentie- en divergentiepunten onderling niet vergeleken worden.

In Bijlage 4 zijn de onderzoeksresultaten opgenomen.

3.3

TUNNELVERLICHTING, VRC-BIJLAGEN

Uit de VRC-bijlagen zijn de passages geselecteerd die een relatie hebben met het rijgedrag van weggebruikers bij het binnenrijden en uitrijden van een tunnel [13].

Men verdeelt een tunnel lichttechnisch veelal in de volgende delen:

- De ingangszone, waarin het lichtniveau geleidelijk wordt verminderd.
- De centrale zone, waarin het lichtniveau constant is.
- De uitgangszone, waarin het lichtniveau geleidelijk wordt verhoogd.

Men verdeelt de ingangszone weer in twee delen: de drempelzone en de overgangszone. Daarnaast onderscheidt men nog de toegangszone en de verlatingszone.

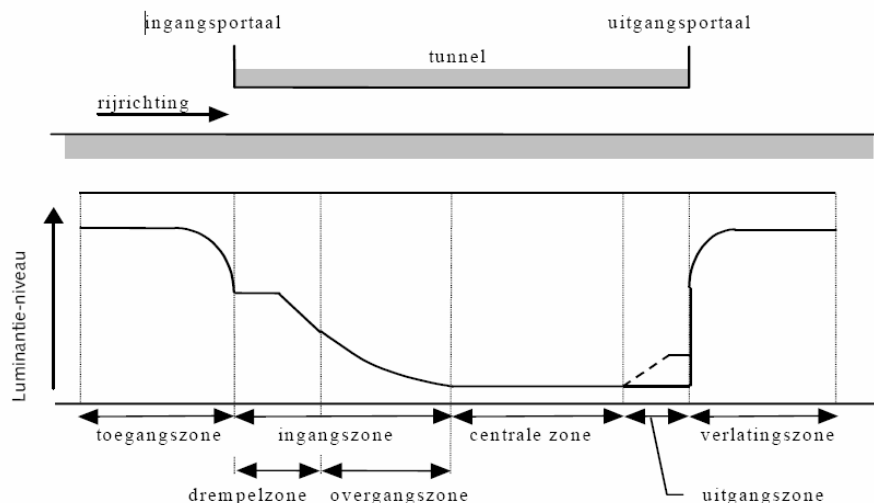
Bij het rijden door een tunnel doen zich achtereenvolgens de volgende situaties voor:

1. Toegangszone: tijdens het naderen van de tunnel moet men, nog rijdend in het daglicht, in de ten opzichte van de buitenwereld relatief donkere ingangszone van de tunnel kunnen onderscheiden of de weg vrij is dan wel dat men manoeuvres moet maken. Men moet hierbij contrasten voldoende kunnen waarnemen. De toegangszone begint op stopafstand voor het ingangsportaal en eindigt bij het ingangsportaal [14].
2. Ingangszone: bij het binnenrijden van de tunnel wordt de hoeveelheid waargenomen licht in korte tijd veel minder waardoor het oog zich moet adapteren aan de gewijzigde verlichtingssituatie. Oogadaptatie is een tijdsafhankelijk proces. De mate waarin het verlichtingsniveau in het verdere verloop van de ingangszone afneemt dient derhalve te zijn afgestemd op de ontwerpsnelheid.
3. Centrale zone: bij het rijden door de centrale zone van de tunnel, waarbij men is gewend aan het lage lichtniveau, dient de verlichting een voldoende niveau en gelijkmatigheid te hebben.
4. Uitgangszone: bij het naderen van de uitgang kan men, vooral bij lange tunnels (tunnels langer dan circa 1km) met een laag lichtniveau, verblind raken door de uitgang. Bij lange tunnels waar het lichtniveau in de centrale zone erg laag is, vormt men daarom een uitgangszone met een verhoogd lichtniveau. Tunnels waarvan de passagetijd meer dan 30s bedraagt moeten voorzien zijn van een uitgangszone. De lengte van de uitgangszone moet tenminste gelijk zijn aan de stopafstand behorende bij de ontwerpsnelheid plus 20 m[14].
5. Verlatingszone: bij het verlaten van de tunnel moet men weer wennen aan het daglichtniveau buiten de tunnel.

Het verloop van het verlichtingsniveau is weergegeven in figuur 3.7.

Figuur 3.7

Indeling tunnel in zones



In de drempelzone is de waarneming van contrasten van grotere invloed op het verlichtingsniveau dan de oogadaptatie. De drempelzone begint bij het ingangsportaal. De lengte van de drempelzone is gelijk aan de stopafstand [14].

In de overgangszone is de oogadaptatie van weggebruikers maatgevend. De overgangszone strekt zich uit van het eind van de drempelzone tot het begin van de centrale zone. De lengte van de overgangszone is afhankelijk van verschillende factoren; het is niet mogelijk om één waarde te noemen (zie voor een toelichting op oogadaptatie bijlage 5).

Voor de ingangsverlichting zijn er drie verschillende methoden te onderscheiden:

- Tegenstraalverlichting: hierbij wordt meer licht tegen de rijrichting in gestraald dan met de rijrichting mee, waardoor het wegdek zich extra verlicht voordoet terwijl de achterzijde van voertuigen zich donker voordoet (contrast door donker voertuig tegen licht wegdek).
- Symmetrische verlichting: hierbij wordt zowel tegen de rijrichting in als met de rijrichting mee evenveel licht uitgestraald; donkere voertuigen hebben een contrast tegen een licht wegdek, lichte voertuigen tegen een relatief donkerder wegdek.
- Meestraalverlichting: het meeste licht wordt met de rijrichting mee gestraald, waardoor voertuigen als lichte objecten tegen een donker wegdek afsteken.

Het daglicht werkt bij de ingang als meestraalverlichting en heeft een overheersende invloed over de eerste 20m vanaf de ingang. Bij tunnels geheel boven maaiveld (er valt dan veel daglicht in de tunnelingang) kan tegenstraalverlichting duurder zijn dan symmetrische verlichting. De tegenstraalverlichting moet het dan opnemen tegen het meestralende daglicht waardoor een hoog lichtniveau en daardoor een omvangrijke installatie nodig is. In alle andere gevallen blijkt tegenstraalverlichting goedkoper te zijn dan symmetrische verlichting.

Bij toepassing van meestraalverlichting doet de tunnelingang zich als een 'donker gat' voor aan weggebruikers en versterkt daardoor gevoelens van onbehagen. Tevens doet circa 75% van de voertuigen zich lichttechnisch gesproken donker voor waardoor bij meestraalverlichting veel meer licht moet worden geïnstalleerd dan bij symmetrische of tegenstraalverlichting het geval zou zijn. Meestraalverlichting kan daarom meestal beter niet worden toegepast.

Het niveau van de ingangsverlichting dient te worden geregeld op basis van de hoeveelheid daglicht. De regeling geschiedt bij voorkeur op basis van een diminstallatie (bestaande uit dimmers en groepsschakelaars), maar kan bij tunnels met een gering verkeersaanbod worden uitgevoerd door het schakelen van groepen armaturen. Een te laag lichtniveau in de ingang leidt tot gevoelens van onbehagen bij weggebruikers. Een te hoog lichtniveau in de ingang leidt tot verblinding. Beide situaties kunnen tot onveilig verkeersgedrag leiden.

Rijkswaterstaat heeft onderzoek laten uitvoeren waaruit blijkt dat wanneer een optimaal schakelsysteem wordt gebruikt er qua totale kosten weinig verschil is tussen een geschakeld systeem en een gedimd systeem. Echter een optimaal geschakeld systeem vereist een meer uitgekiende vorm van lampvervanging die in de praktijk moeilijker is te realiseren dan de lampvervanging bij een gedimd systeem. Tevens is de verlichtingssituatie bij dimmen voor de weggebruikers aangenamer omdat er minder discontinuïteiten in de verlichting zijn wanneer een laag lichtniveau is ingeschakeld.

De verlichting in de centrale zone wordt in principe bepaald door het niveau en de gelijkmatigheid in dwars- en langsrichting. In moderne tunnels is meestal hoge druk natrium puntverlichting aangebracht.

Naarmate de tunnel langer is kan het lichtniveau in de centrale zone lager zijn. Hoe lager het lichtniveau in de tunnel is hoe meer het oog moet adapteren aan het daglichtniveau buiten de tunnel. Bij lage lichtniveaus in de tunnel dient het lichtniveau in de uitgangszone met de lengte toe te nemen zodat het oog alvast enigszins adapteert.

Wanneer men bij een lange tunnel reeds op grote afstand de heldere uitgang kan zien kunnen weggebruikers daarop gefixeerd raken waardoor hun concentratie op de verkeerssituatie vermindert. Dit kan worden voorkomen door bijvoorbeeld aan het eind van de tunnel een bocht te maken of door het directe daglicht in de verlatingszone (gedeeltelijk) af te schermen.

3.4

HET ONTWERP VAN INGANGSVERLICHTING

Uit de publicatie 'Het ontwerp van ingangsverlichting' [15] zijn de voor deze studie relevante passages geciteerd [15].

In juni 2003 is in Nederland de 'Aanbeveling verlichting van tunnels en onderdoorgangen' gepubliceerd [14]. Deze aanbeveling vervangt de eerdere uit 1990. In de aanbeveling wordt onder meer aandacht besteed aan de zogenaamde contrastmethode: een methode voor het bepalen van de ingangsverlichting.

Wanneer men een tunnel nadert moet men, terwijl men nog in het daglicht rijdt, in de relatief donkere ingangszone van de tunnel kunnen onderscheiden of de weg vrij is en of men manoeuvres moet maken.

Bij het binnenrijden van de tunnel neemt de hoeveelheid waargenomen licht in korte tijd af. Hierdoor moet het oog zich adapteren aan de gewijzigde verlichtingssituatie, wat enige tijd in beslag neemt.

Op basis van deze twee fenomenen wordt bij verkeerstunnels in de eerste zone van de tunnel, veelal de ingangszone genoemd, een hoger lichtniveau geïnstalleerd dan in het overige deel van de tunnel. Dit hogere lichtniveau wordt na het ingangsportaal in lengterichting volgens een zekere curve verlaagd tot het lage lichtniveau in de tunnel.

Voor het verloop van het lichtniveau over de lengte van de tunnel dacht men oorspronkelijk dat in het eerste deel van de ingangszone, de drempelzone genoemd, het lichtniveau constant moest zijn over de lengte van de stopafstand. Doch uit ervaring bleek dat een goed resultaat kon worden bereikt door het lichtniveau constant te houden tot de helft van de stopafstand en daarna het lichtniveau lineair te verlagen tot 40% aan het einde van de stopafstand na het ingangsportaal. Op dat punt gaat de oogadaptatie een rol spelen. Dit tweede deel van de ingangszone noemt men de overgangszone.

In de laatste 20 jaar is in verschillende landen getracht een rekenmethodiek te ontwikkelen voor het bepalen van het vereiste lichtniveau bij de tunnelingang, waarbij de waarnemer zich op stop zichtafstand voor de tunnelingang bevindt. De rekenmethode is gebaseerd op het uitgangspunt dat men verkeersobjecten waarneemt aan de hand van helderheidscontrasten.

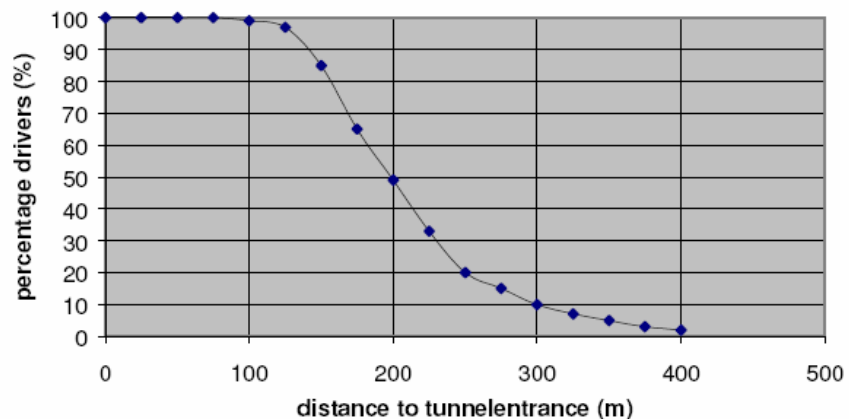
Opgemerkt moet worden dat in een zone van 30-40m na het ingangsportaal het vrijwel onmogelijk is om voldoende contrast te bereiken door middel van tunnelverlichting. Dit wordt veroorzaakt door het daglicht dat in deze zone de tunnelverlichting overstraalt.

In 1971/1972 is in Japan door Narisada en Yoshikawa onderzoek gedaan naar de mate van concentratie van bestuurders op tunnelingangen. Zij hebben een aantal proefpersonen door meer dan 20 verschillende tunnels laten rijden. Daarbij zijn de oogbewegingen, oogknipperingen en de tijd dat men zijn oog op een bepaald punt gericht hield, gemeten. Uit dit onderzoek is af te leiden dat men zich 200 tot 300m voor de tunnelingang begint te concentreren op de tunnelingang en dat bij 100m of minder men vrijwel gefixeerd is op de tunnelingang. Opmerkelijk is dat de omringende verkeerssituatie daar nauwelijks invloed op heeft, de afstand is de overheersende factor.

De resultaten van dit onderzoek zijn in figuur 3.8 weergegeven.

Figuur 3.8

Fixatie op de tunnelingang



Toelichting:

- Op de horizontale as is de afstand tot de tunnelingang weergegeven (gesloten deel).
- Op de verticale as is aangegeven welk deel van de weggebruikers gefixeerd is op de tunnelingang.
- Het onderzoek vermeldt niet of de afstanden snelheidsafhankelijk zijn. Omdat bekend is dat weggebruikers in het algemeen verder voor zich uit kijken met een toenemende rijsnelheid, wordt dit effect ook bij tunnelingangen verondersteld.

In 1995/1996 is in opdracht van de Bouwdienst een soortgelijk onderzoek gedaan. Uit dit onderzoek blijkt dat in een zone 200-100m voor de ingang de hersenactiviteit toeneemt en het aantal oogknipperingen vermindert. In de zone 100m tot aan de ingang, neemt het aantal oogknipperingen nog wat verder af, maar minder dan in deze zone daarvoor. De resultaten sluiten aan bij het Japanse onderzoek, omdat ook hier werd geconstateerd dat in de zone 100-200m voor het ingangsportaal weggebruikers geconcentreerd raken op het ingangsportaal. Uit deze onderzoeken is geconcludeerd dat de benodigde mate van opvallendheid, of wel het benodigde contrast, omgekeerd evenredig is met het attentieniveau. Niet geheel in lijn met de grafiek, maar wel overeenstemmend met de metingen als zodanig, is geconcludeerd dat voor stopafstanden tot 150 meter het vereiste contrast, zoals gevonden voor een afstand van 100 meter, niet hoeft te worden verhoogd en dat voor een stopafstand van 210m (120 km/h) het vereiste contrast 1,5 maal zo groot moet zijn als voor 100 meter.

3.5

OOSTENRIJKS ONDERZOEK VERKEERSVEILIGHEID IN TUNNELS

In opdracht van het Oostenrijkse Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie zijn tunnels met tegenverkeer en éénrichtingsverkeer met andere wegentypen vergeleken [16]. De resultaten van het onderzoek zijn gebaseerd op data uit de periode 1999-2003 van 136 Oostenrijkse tunnels, waarvan 110 tunnels met verkeer in één rijrichting per buis. In tabel 3.9 zijn de ongevalrisico's weergegeven.

Tabel 3.9

Ongevallenkenmerken
Oostenrijk

Unfallrelativzahlen	Autobahn	Schnellstrasse	Landesstrasse Freiland	Tunnel
Unfallrate [UPS/1 Mio. Kpz-km]	0,137	0,151	0,433	0,104
Verunglücktenrate [V/1 Mio. Kfz-km]	0,224	0,227	0,662	0,186

Toelichting:

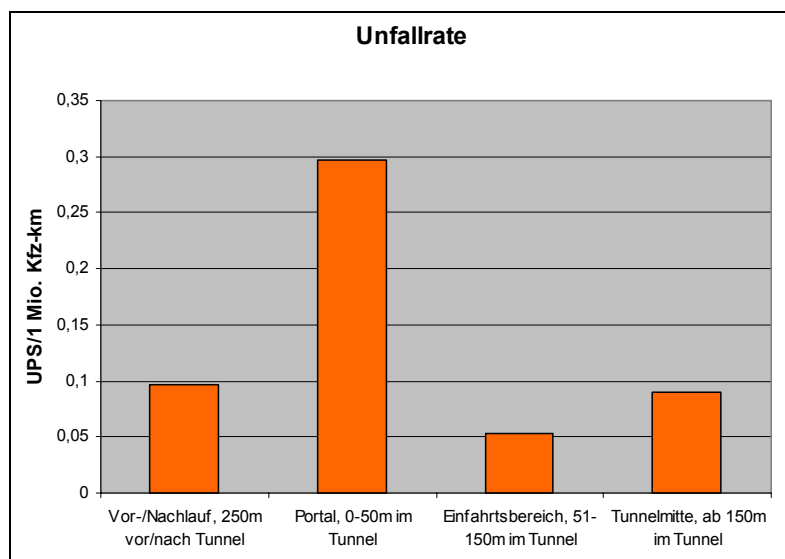
- De ongeval- en letselongevalfrequenties in tunnels zijn lager dan die op autosnelwegen in de open lucht.
- De afloop van een ongeval in een tunnel is echter duidelijk ernstiger dan wanneer een ongeval niet in een tunnel plaatsvindt.

Op autosnelwegen overlijdt 3,3% van het aantal verkeersslachtoffers, terwijl dit aandeel in tunnels (zonder tegenverkeer) 6,3% is. In tunnels met eenrichtingsverkeer treden vooral kop-staart ongevallen en ongevallen bij het wisselen van rijstrook op (61%), daarnaast komen relatief veel enkelzijdige ongevallen voor (36%). Vrachtwagens zijn relatief vaak betrokken bij ongevallen (77%).

Verder is onderzoek gedaan naar de locaties van ongevallen. In figuur 3.9 is het ongevalrisico (uitgedrukt in aantal letselongevallen per miljoen voertuigkilometer), weergegeven.

Figuur 3.9

Verdeling ongevallen over de
lengte van de tunnel



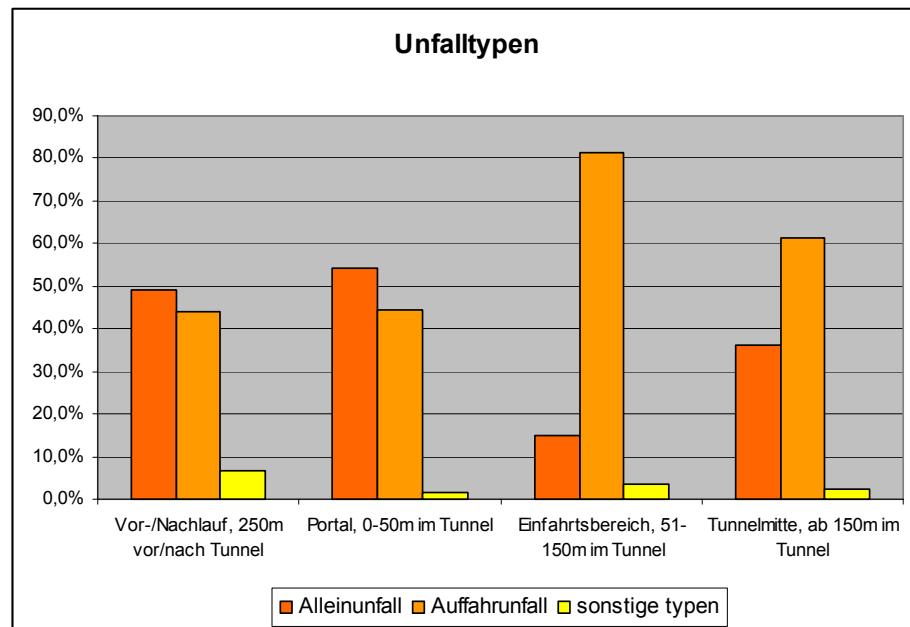
Toelichting:

- De letselongevalfrequenties zijn veruit het hoogst ter hoogte van de tunnelingang.
- Vlak na de tunnelingang is het risico relatief laag.
- Een Noors onderzoek heeft soortgelijke resultaten laten zien.

Het onderzoek naar de locatie van de ongevallen is uitgewerkt naar oorzaken (figuur 3.10).

Figuur 3.10

Typering ongevallen verdeeld over de tunnel



Toelichting:

- In het invloedsgebied van de tunnelingang en de tunneluitgang, is het aandeel enkelzijdige en meervoudige ongevallen redelijk gelijk.
- In de tunnel overheerst het aandeel van de meervoudige ongevallen.
- Als belangrijkste oorzaak voor de meervoudige ongevallen is het te weinig afstand houden, geconstateerd (in de tunnel).
- Als belangrijkste oorzaak voor de enkelvoudige ongevallen, is snelheidsoverschrijding geconstateerd.

In het onderzoek wordt aanbevolen om maatregelen ter verhoging van de verkeersveiligheid al op enige afstand voor de tunnelingang in te zetten: op tenminste 250m voor de tunnelingang.

3.6

SAFESTAR-ONDERZOEKEN TNO

Effects of emergency lanes and exits and entries in tunnels on driving behaviour: driving simulator studies [17].

In het experiment zijn geen onveilige verkeerssituaties ontstaan bij in- en uitvoeringen in de gegeven condities: een invoegstrook van 350m, een uitvoegstrook van 250m en weefvakken van 600m. Alle proefpersonen waren in staat om alle manoeuvres uit te voeren binnen de afstand die hiervoor beschikbaar was. Dit geeft aan dat de proefpersonen de manoeuvres op een relatief veilige wijze ten uitvoer brachten. Er werden geen duidelijke effecten gevonden van de zichtafstand en er werd geen duidelijk verschil gevonden tussen open wegen en tunnels. Dit geeft aan dat er geen afwijkende richtlijnen nodig zijn voor in- en uitvoeringen in tunnels, ondanks dat de omstandigheden in tunnels enigszins anders zijn. Dit experiment heeft alleen zichtafstanden van 100m of meer onderzocht. Zichtafstanden van minder dan 100m moeten niet overwogen worden. Weefvakken kunnen toegestaan worden in tunnels, echter slechts indien dit weefvak voldoende ruimte beschikbaar stelt om de manoeuvres uit te voeren zonder het overige verkeer te hinderen. De lengte die voor een weefvak op een open weg vereist is, zou ook vereist moeten zijn in tunnels. Weefvakken bieden de mogelijkheid om weer uit te voegen in geval een invoegmanoeuvre mislukt. Wanneer de verwachte verkeersintensiteit erg hoog is, met veel in- en uitvoegend verkeer, zou de aanleg van weefvakken vermeden moeten worden. Een vluchtstrook moet altijd aanwezig zijn op locaties waar invoegend verkeer aanwezig is in een tunnel, aangezien er voldoende ruimte beschikbaar moet zijn om fouten of conflicten op te kunnen lossen.

Effects of tunnel design characteristics on driving behaviour and traffic safety: a literature review [18]

Omdat invoeringen en uitvoeringen gepaard gaan met een extra belasting van de rijtaak, de mogelijkheid om te anticiperen op in- en uitvoeringen beperkt is en weggebruikers geen in- en uitvoeringen in een tunnel verwachten, is invloed op de verkeersveiligheid waarschijnlijk.

Guidelines and standards for tunnels on motorways [19]

Voor uitvoeringen wordt gesteld dat de uitrijstrook lang genoeg moet zijn om de benodigde declaratie uit te voeren. Voor een enkelstrooks uitvoeger wordt een minimale lengte van 250 voor een uitrijstrook geadviseerd bij een ontwerpsnelheid van 120 km/h. Voor tweestrooks uitvoegers wordt een lengte van 450m aanbevolen (bij 120 km/h). Als de ontwerpsnelheid van het uitgaande wegvak lager is dan de snelheid van de hoofdrijbaan, dan wordt gesteld dat na de uitvoeger een rechtstand van 100m moet worden toegepast. Als de uitvoeger is gesitueerd op een neergaande helling van 2,5% of meer of een horizontale boog heeft met een straal kleiner dan 75m, dan moet deze afstand vergroot worden.

Vanwege de zichtafstand op de uitvoegende rijstrook is het verstandig om ter hoogte van het puntstuk de rijstrook te verbreden (maar niet breder dan 4,50m). Het moet mogelijk zijn om over het puntstuk te rijden in noodgevallen. De afrit moet voorzien worden van een vluchtstrook. Als de hoofdrijbaan een horizontale boog naar rechts bevat met een straal kleiner dan 2000m of een boog naar links met een straal kleiner dan 10.000m, dan is het niet wenselijk een uitvoeger toe te passen.

Voor invoegstroken is gesteld dat de laatste 100m een goed zicht op de hoofdrijbaan moeten bieden. De benodigde zichtafstand op de invoegstrook is gelijk aan benodigde stopzichtafstand. Zodoende kan een weggebruiker als het invoegen niet lukt, veilig tot stilstand komen. De standaard lengte voor een invoegstrook is 310m. Het Zweedse Vägverket adviseert een lengte van 350m voor een ontwerpsnelheid van 110 km/h. Als de hoofdrijbaan in een horizontale boog is gelegen, moeten de laatste 100m van de invoegstrook dezelfde boogstraal hebben als de hoofdrijbaan.

Voor samenvoegingen geldt dat zowel voor als na het samenvoegpunt over 200m beide rijbanen dezelfde ontwerpsnelheid moeten hebben. Het aantal rijstroken voor de samenvoeger moet gelijk zijn aan het aantal rijstroken na de samenvoeger. Als dit niet mogelijk is, moet een rijstrook stroomopwaarts van de samenvoeger beëindigd worden. De laatste 100m voor een samenvoeger moet een rechtstand zijn.

In de literatuurstudie wordt verder gesteld dat er meer onderzoek nodig is naar convergentie- en divergentiepunten in tunnels. In het algemeen zijn de richtlijnen voor de open weg toepasbaar. Wel is speciale aandacht nodig voor zichtafstanden en anticipatie, welke beperkt kunnen zijn door tunnelwanden, hellingen en bogen. Een ander aandachtspunt is het verwachtingspatroon van de weggebruiker. Omdat weggebruikers geen in- en uitvoegers verwachten, kan dit plotselinge manoeuvres tot gevolg hebben.

3.7

FILES IN TUNNELS

In opdracht van het Steunpunt Tunnelveiligheid is door de Bouwdienst het onderzoek 'Files in tunnels, maatregelen ter verlaging van het risico bij files in tunnels' uitgevoerd [20].

De aanwezigheid van een file in een tunnel, is één van de belangrijkste, negatieve invloedsfactoren op de veiligheid in tunnels.

In het geval van een brand in een tunnel met langsventilatie, bevinden weggebruikers stroomopwaarts van het incident zich in een veilige zone. Weggebruikers in een file stroomafwaarts van het incident lopen het gevaar bloot gesteld te worden aan rook, hitte en giftige stoffen die hun kant opgeblazen worden.

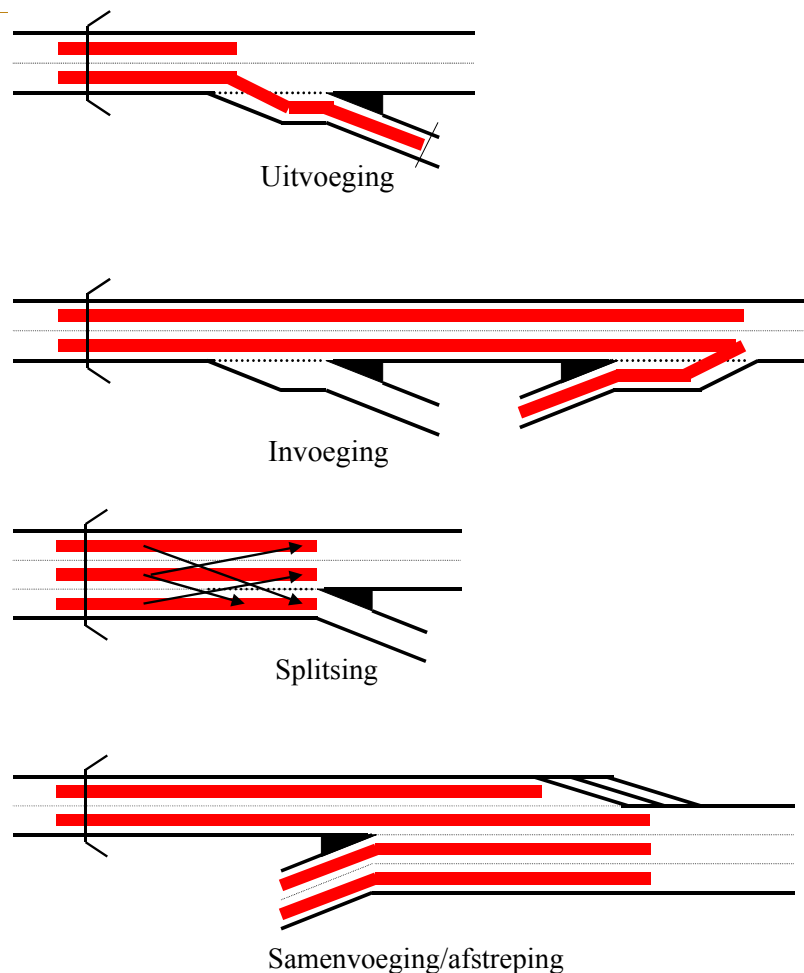
In het geval van een explosie lopen alle aanwezigen in een tunnel, zowel stroomopwaarts als stroomafwaarts van het incident, risico.

Dit betekent dat structurele congestie in een tunnel, veroorzaakt door een (grote) bottleneck stroomafwaarts van of in een tunnel vermeden dient te worden.

Figuur 3.11

File in een tunnel

In figuur 3.11 zijn potentieel filegevoelige situaties weergegeven.



Opmerking:

- In dit voorbeeld zijn de samenvoeging en de afstreping gecombineerd. Er zijn ook bottlenecks mogelijk in situaties alleen met een afstreping.

De volgende oplossingsrichtingen zijn mogelijk:

- Voorkomen/verminderen van voorspelbare files (regulier en niet-regulier).
- Verplaatsen van voorspelbare files (regulier en niet-regulier) naar een locatie buiten de tunnel.

Per oplossingsrichting zijn verschillende maatregelen mogelijk. Maatregelen die gericht zijn op het voorkomen of verplaatsen van voorspelbare files, worden afgestemd op de locatie en de vormgeving van de bottleneck; een file veroorzakende toerit na een tunnel vraagt om andere maatregelen dan een file in een tunnel veroorzaakt door een splitsing. Maatregelen uit deze categorie zijn bijvoorbeeld toeritdosering, het afkruisen van rijstroken, aanpassen van de rijstrokenconfiguratie en aanpassen van de verkeersregeling op de afrit.

Aan de hand van een nauwkeurige omgevingsanalyse kan per tunnel bepaald worden of maatregelen zinvol zijn, welke maatregelen het meest geschikt zijn en hoe deze het beste uitgevoerd kunnen worden.

3.8

VERKEERSAFWIKKELINGPROCES EN ONGEVALKANSEN

In hoofdstuk 2 is het verkeersafwikkelingsproces voor de verschillende convergentie- en divergentiepunten beschreven. Op basis van deze beschrijvingen wordt nu aan elke fase een risicolabel toegekend: een inschatting van de ongevalkans.

Daarbij wordt vooralsnog de aanwezigheid van een tunnel buiten beschouwing gelaten.

Bij het bepalen van de ongevalkans is gekeken naar de complexiteit van de rijtaak; hoe complexer de rijtaak, des te groter is de kans dat een weggebruiker een fout maakt. De complexiteit is daarbij bepaald op basis van:

- Het type rijstrookwisseling dat uitgevoerd moet worden: zo is het invoegen lastiger dan het uitvoegen.
- De mate waarin snelheidsaanpassingen noodzakelijk zijn.
- De hoeveelheid te verwerken informatie.
- Het aantal tegelijk te verrichten handelingen.

In tabel 3.10 is per convergentie- en divergentiepunt met symbolen  aangegeven hoe groot de ongevalkans is. Het doel van de tabel is tweeledig:

- Een overzicht van de verschillen in ongevalkansen tussen de diverse convergentie- en divergentiepunten.
- Een indicatie van de meeste kritische fases in het verkeersafwikkelingsproces.

Bij het bepalen van de kans op fouten is uitgegaan van ontwerpen conform de richtlijnen.

Tabel 3.10

Inschatting risico's
convergentie- en
divergentiepunten

	Convergentiepunten			Divergentiepunten		Extra rijstrook	Con-divergentie Weefvak
	Invoeging	Samenvoeging	Afstreping	Uitvoeging	Splitsing		
Fase 1	Accelereren 	Hiaat zoeken	Hiaat zoeken	Voorbereiding strookwisseling 	Voorber. Strookw.   	-	Voorber. Strookw. 
Fase 2	Hiaat zoeken	Strookwisseling  	Strookwisseling   	Uitvoegen 	Strookwisseling  		Hiaat zoeken
Fase 3	Snelheid aanpassen 	-	-	Snelheid aanpassen 	Snelheid aanpassen		Snelheid aanpas. 
Fase 4	Invoegen   	-	-	-	-		Weefbeweging   
Fase 5	Volgafstanden aanpassen 	-	-	-	-		Volgaf. Aanpassen 
Totaal	     	 	  	  	    	-	     

3.9

CONCLUSIES

- De tunnelingang, tunneluitgang, convergentiepunten en divergentiepunten zijn voor de weggebruiker discontinuïteiten. Ter hoogte van deze punten wordt zijn rijgedrag beïnvloed.
- Uit binnenlands en buitenlands onderzoek kan worden afgeleid dat ter hoogte van de tunnelingang relatief veel ongevallen plaatsvinden.
- Uit onderzoek naar Nederlandse autosnelwegtunnels mag worden geconcludeerd dat de ongevalfrequentie toeneemt naarmate een convergentie-/divergentiepunt dichterbij de tunnelingang/-uitgang is gelegen.

HOOFDSTUK

4 Minimale afstanden

4.1

INLEIDING

Op basis van de onderzoeken en studies die in het vorige hoofdstuk zijn beschreven, wordt nu bepaald in welke situaties een configuratie acceptabel is en wanneer niet.

Hierbij wordt een verband gelegd tussen het risico en het invloedsgebied van een discontinuïteit, waarbij de discontinuïteit een convergentiepunt, een divergentiepunt, een tunnelingang of een tunneluitgang kan zijn.

Uitgangspunt is dat de tunnelingang en de tunneluitgang de weggebruiker altijd in zekere mate in zijn rijgedrag zullen beïnvloeden, ondanks een optimale vormgeving en inrichting van de tunnelingang en de tunneluitgang.

4.2

RISICOBENADERINGEN

Om de minimale afstand tussen een convergentie- of divergentiepunt en een tunnelingang- of uitgang te bepalen, wordt er gebruik gemaakt van de volgende theorieën en studies:

	Theorie	Herkomst
Convergentie- en divergentiepunt	Turbulentie	ROA/NOA
Tunnelingang- en uitgang	Fixatie en oogaccommodatie	Japans onderzoek (uit 'het ontwerp van ingangsverlichting')

Door combinatie van de theorieën kunnen de minimale afstanden bepaald worden. Voor de combinatie van de theorieën zijn er drie risicobenaderingen opgesteld (figuur 4.12). Onderstaand worden de benaderingen toegelicht aan de hand van een situatie waarin een invoeger wordt gevolgd door de tunnelingang:

- A. *Het invloedsgebied van een convergentie- of divergentiepunt en het invloedsgebied van een tunnelingang of -uitgang mogen elkaar **niet** overlappen ($X+Y$).*

Benadering A gaat uit van het principe dat een weggebruiker zich eerst concentreert op het invoegen en vervolgens pas op het binnenrijden van de tunnel (scheiden van verschillende rijtaken). De afstand tussen de invoeger en de tunnelingang is gelijk aan de som van beide invloedsafstanden.

- B. *Het risico ter plaatse van de tunnelingang of -uitgang mag niet verhoogd worden door de aanwezigheid van een convergentie- of divergentiepunt nabij de tunnel (max X,Y).*

Deze benadering staat een overlap van de invloedsgebieden toe. De afstand tussen een invoeger en een tunnelingang is gelijk aan de grootste lengte van beide invloedsgebieden.

- C. *De minimale afstand tussen een tunnelingang of -uitgang en een convergentie- of divergentiepunt is gelijk aan de som helft van beide invloedsafstanden. Op helft van beide invloedsafstanden wordt het extra risico acceptabel geacht ($1/2X + 1/2Y$).*

Ook bij deze benadering is er sprake van een overlap van de invloedsgebieden. In tegenstelling tot benadering B, veroorzaakt de invoeger een (kleine) toename van het extra risico ter hoogte van de tunnelingang.

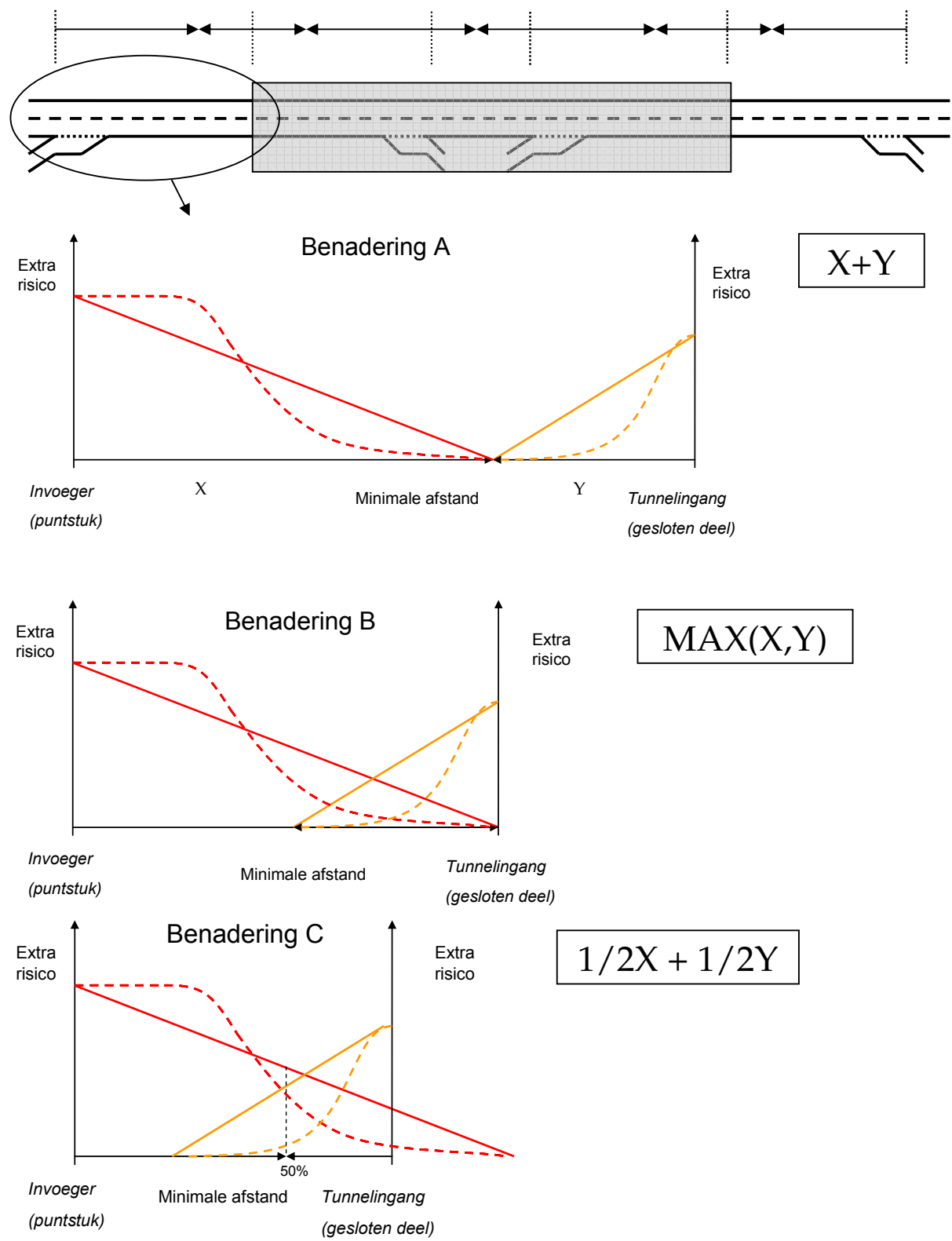
Bovenstaande benaderingen zijn in figuur 4.12 schematisch weergegeven.

Toelichting:

- In het bovenste deel van de figuur is voor een opeenvolging van convergentie- en divergentiepunten in en nabij een tunnel schematisch de ligging van de invloedsgebieden weergegeven.
- In de drie onderste onderdelen zijn de risicobenaderingen waarmee de minimale afstand kan worden bepaald, schematisch afgebeeld. Als voorbeeld is dit gedaan voor een invoeger stroomopwaarts van een tunnel. Andere convergentie- en divergentiepunten kunnen naar analogie worden uitgewerkt.
- Met de rode lijnen is het risicoverloop van de invoeger weergegeven, met de oranje lijnen het risicoverloop van de tunnelingang.
- De hoogtes van de risico's zijn onbekend; het gaat in deze studie (vooral) om de afstanden waarover de risico's beïnvloed worden.
- Het invloedsgebied en de hoogte van het risico verschillen in de praktijk per tunnel. Het gaat in deze beschouwing om het principe.
- Omdat er geen studies bekend zijn waarin het risicoverloop van een convergentie- of divergentiepunt en het risicoverloop van een tunnelingang- of uitgang zijn onderzocht, zijn er twee mogelijke risicoverlopen weergegeven: een lineair verloop en een S-vormig verloop (het Japanse onderzoek naar de fixatieafstanden op de tunnelingang kan niet direct naar risico's "vertaald" worden).
- Het S-vormig risicoverloop van de invoeger is gerelateerd aan het invoegproces zoals beschreven in paragraaf 3.7: de grootste risico's treden op ter hoogte van de invoegstrook, daarna is er slechts een klein risico als gevolg van het aanpassen van de volgafstand. Het S-vormig verloop is dan ook waarschijnlijker dan een lineair verloop.

Figuur 4.12

Risico's



4.3

INVULLING RISICOBENADERINGEN

De risicobenaderingen zijn opgebouwd uit een aantal standaardelementen. In deze paragraaf worden de lengtes van de elementen bepaald.

Convergentie- en divergentiepunten

In onderstaande tabel zijn de turbulentieafstanden behorende bij de verschillende convergentie- en divergentiepunten weergegeven (afkomstig uit de NOA).

Ligging wegvak	Turbulentieafstanden (X)					
	Benadering A en B			Benadering C		
	120 km/h	100 km/h	80 km/h	120 km/h	100 km/h	80 km/h
Stroomopwaarts van invoeging	150m	125m	100m	75m	63m	50m
Stroomafwaarts van invoeging	750m	625m	500m	375m	313m	250m
Stroomopwaarts van samenvoeging	150m	125m	100m	75m	63m	50m
Stroomafwaarts van samenvoeging	375m	313m	250m	188m	157m	125m
Stroomopwaarts van uitvoeging	750m	625m	500m	375m	313m	250m
Stroomafwaarts van uitvoeging	150m	125m	100m	75m	63m	50m
Stroomopwaarts van splitsing	150m	125m	100m	75m	63m	50m
Stroomafwaarts van splitsing	150m	125m	100m	75m	63m	50m
Stroomopwaarts van afstreping	375m	313m	250m	188m	157m	125m
Stroomafwaarts van afstreping	150m	125m	100m	75m	63m	50m
Stroomopwaarts van extra rijstrook	-	-	-	-	-	-
Stroomafwaarts van extra rijstrook	-	-	-	-	-	-

Opmerking:

- In afwijking van de NOA zijn de waarden voor 100 km/h bepaald door interpolatie van de waarden voor 120 en 80 km/h.
- De NOA kent geen turbulentieafstanden voor een extra rijstrook (omdat de weggebruikers naar een lege rijstrook gaan en er geen risico's aan deze manoeuvre verbonden zijn). In deze studie wordt voor een extra rijstrook gerekend met een turbulentieafstand 0.

Tunnelingang

Voor de Tunnelingang

Het invloedsgebied stroomopwaarts van de tunnelingang wordt gebaseerd op de mate van concentratie op de tunnelingang (Japans onderzoek, zie hoofdstuk 3). De afstand waarop de eerste weggebruikers op de tunnelingang gefixeerd zijn, is 400m (bij 120 km/h). Op 200m van de tunnelingang is circa 50% van de weggebruikers gefixeerd op de tunnelingang. Verondersteld wordt dat de fixatieafstand recht evenredig is met de ontwerpsnelheid; bekend is dat weggebruikers verder voor zich uitkijken naarmate de rijnsnelheid toeneemt [4].

Ontwerpsnelheid	Fixatieafstand tunnelingang (Y)	
	Benadering A en B	Benadering C
120 km/h	400m	200m
100 km/h	333m	167m
80 km/h	267m	133m

Na de tunnelingang

Na het binnenrijden en van de tunnel moet de weggebruiker wennen aan de gewijzigde lichtomstandigheden. Voor het bepalen van de minimale afstand wordt uitgegaan van de lengte van de drempelzone: na de drempelzone is de weggebruiker weer in staat om contrasten goed waar te nemen. Na de drempelzone wordt de tunnelverlichting geleidelijk gedimd zodat het oog zich geleidelijk aan kan passen.

De lengte van de drempelzone is gelijk aan de stopafstand. In tunnels worden de volgende stopafstanden aangehouden [14]:

Ontwerpsnelheid	Drempelzone (Y) (stopafstand)
120 km/h	210m
100 km/h	150m
80 km/h	105m

Voor alle risicobenaderingen wordt van dezelfde afstanden uitgegaan.

*Tunneluitgang**Voor de tunneluitgang*

Bij het naderen van de uitgang kan men, vooral bij lange tunnels (tunnels langer dan ca. 1 km) met een laag lichtniveau, verblind raken door de uitgang. In de uitgangzone van een lange tunnel wordt daarom het lichtniveau geleidelijk verhoogd. De lengte van de uitgangszone moet ten minste gelijk zijn aan de stopafstand behorende bij de ontwerpsnelheid plus 20m [14]:

Ontwerpsnelheid	Uitgangszone (Y) (stopafstand + 20m)
120 km/h	230m
100 km/h	170m
80 km/h	125m

Ook hier wordt bij alle risicobenaderingen van dezelfde afstand uitgegaan.

Na de tunneluitgang

bij het verlaten van de tunnel moet men weer wennen aan het daglichtniveau buiten de tunnel. Er geldt dat de oogadaptatie van een laag naar een hoog lichtniveau veel sneller plaats kan vinden dan voor een hoog naar een laag niveau. Voor tunnels betekent dit, dat men nauwelijks problemen ervaart bij het verlaten van een tunnel. De lengte van de zogenaamde verlatingszone wordt voor risicobenadering A en B (arbitrair) vastgesteld op de stopafstand, voor benadering C op 50% van de stopafstand:

Ontwerpsnelheid	Lengte verlatingszone (Y)	
	Benadering A en B	Benadering C
120 km/h	210m	105m
100 km/h	150m	75m
80 km/h	105m	52m

4.4

REFERENTIE EUROPESE TUNNELRICHTLIJN

De verschillende risicobenaderingen kunnen worden vergeleken met de eisen uit de Europese tunnelrichtlijn. In deze paragraaf wordt de Europese tunnelrichtlijn nader toegelicht.

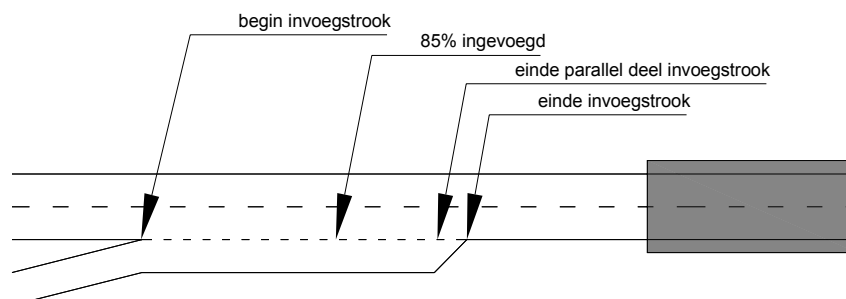
In de Europese tunnelrichtlijn is opgenomen, dat het aantal rijstroken in de tunnel gelijk moet zijn aan het aantal rijstroken buiten de tunnel (met uitzondering van de vluchtstrook). Een wijziging in aantal rijstroken dient ten minste op 10 rijseconden voor de tunnelingang plaats te vinden. De Europese tunnelrichtlijn is niet volledig eenduidig: sommige aspecten bieden meerdere interpretatiemogelijkheden. Bovendien zijn er enkele kanttekeningen te plaatsen ten aanzien van de consequenties voor de toepassing in de praktijk.

- Het is niet duidelijk of met de term rijstroken alleen de doorgaande rijstroken van een rijbaan worden bedoeld, of ook de invoeg-, uitrij- en weefstroken. Wanneer alleen de rijstroken van de doorgaande rijbaan zijn inbegrepen, zou dit betekenen dat de eis van 10 seconden niet van toepassing is op invoegers, uitvoegers en weefvakken, maar alleen op afstrepelingen en bijkomende rijstroken. Hoewel in de Europese tunnelrichtlijn geen onderbouwing is opgenomen voor de 10 rijseconden, lijkt het niet waarschijnlijk om invoegers, uitvoegers en weefvakken uit te sluiten van deze eis. De weggebruiker heeft enige tijd al zijn aandacht nodig om zich te richten op het binnenrijden cq uitrijden van een tunnel. Uiteraard geldt dit niet alleen voor afstrepelingen.
- Als de eis van 10 rijseconden van toepassing wordt verklaard op alle typen convergentie- en divergentiepunten, dan wordt er geen onderscheid gemaakt tussen samenvoegers, invoegers, splitsingen, uitvoegers, weefvakken en afstrepelingen. Uitgaande van het verkeersproces en de risico's, is dit niet geheel logisch: zo is het logisch dat de minimale afstand tussen een uitvoeger en de tunnelingang kleiner is dan de minimale afstand tussen een invoeger en de tunnelingang.
- De eis van 10 rijseconden is alleen van toepassing op het weggedeelte voor de tunnelingang. Uiteraard hebben convergentie- en divergentiepunten in en vlak na de tunnel ook een negatieve invloed op de (verkeers)veiligheid.
- In de Europese richtlijn is niet aangegeven vanaf welk punt de 10 rijseconden moet worden berekend: vanaf het puntstuk, het punt waar het parallelle deel van de invoeg- of uitrijstrook begint of eindigt, het punt waar 85% van het verkeer is ingevoegd of uitgevoegd of het begin of einde van de invoegstrook of uitrijstrook?

In figuur 4.13 zijn de mogelijkheden voor een invoegstrook weergegeven.

Figuur 4.13

Mogelijke Referentiepunten '10 seconden eis'



In deze studie wordt de Europese tunnelrichtlijn ruim en 'aan de veilige kant' geïnterpreteerd. Dit uitgangspunt leidt tot de volgende keuzes:

- Alle typen convergentie- en divergentiepunten worden meegenomen.
- De meetpunten worden gekoppeld aan het punt waar de volledige breedte van de rijstrook begint of eindigt:
 - Uitvoeger: het begin van het parallelle deel van de uitrijstrook.
 - Splitsing: het begin van de blokmarkering/puntstuk.
 - Invoeger: het einde van het parallelle deel van de invoegstrook.
 - Samenvoeger: spitse punt van het puntstuk.
 - Afstreping: het begin van de afstreping (sergeantstrepen).
 - Weefvak: de spitse punten van de puntstukken.
 - Extra strook: punt waar de extra strook de volledige breedte heeft.

Hoewel het grootste deel van het verkeer aan het begin van de invoegstrook invoegt, wordt toch uitgegaan van het einde van het parallelle deel van de invoegstrook. Vrachtverkeer gebruikt regelmatig een groot deel van de invoegstrook en ook bij hoge intensiteiten op de hoofdrijbaan kan het autoverkeer een aanzienlijk deel van de invoegstrook nodig hebben. Omdat bij splitsingen het verkeer doorgaans al ver voor het puntstuk van rijstrook wisselt, wordt er uitgegaan van het begin van de blokmarkering. Op dit punt begint de bewegwijzering.

Bij afstrepingen wordt uitgegaan van het begin van de verdrijfstrepen.

4.5

TOEPASSING RISICOBENADERINGEN

In de tabellen op pagina 49-55 zijn per type convergentie- en divergentiepunt de minimale afstanden tot de tunnelingang en de tunneluitgang opgenomen.

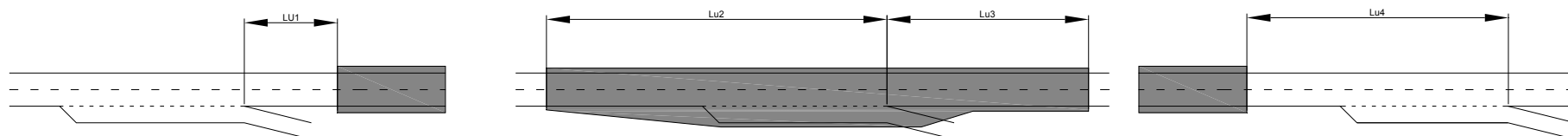
Toelichting:

- Als een convergentie- of divergentiepunt voor of na een tunnel is gepland en op voldoende afstand van de tunnelingang of tunneluitgang is gelegen (waarbij ook aan alle overige ontwerptechnische randvoorwaarden is voldaan), dan is de configuratie acceptabel. Dit betekent dat er geen aanvullende maatregelen noodzakelijk zijn.
- Als een convergentie- of divergentiepunt voor of na een tunnel is gepland, maar er niet kan worden voldaan aan de minimale afstand tot de tunnelingang of tunneluitgang, dan moet onderzocht worden of met compenserende maatregelen het veiligheidsniveau alsnog op een acceptabel niveau kan worden gebracht. In hoofdstuk 5 en 6 worden de compenserende maatregelen beschreven en beoordeeld. Er wordt aangegeven in welke omstandigheden (een combinatie van) maatregelen voldoende effect hebben om een configuratie alsnog te accepteren, daarbij ook rekening houdend met andere aspecten dan veiligheid (doorstroming, kosten, etc.).
- Naast de eisen ten aanzien van de afstand tot de tunnelingang of -uitgang, moet er ook nog voldaan worden aan andere ontwerptechnische randvoorwaarden. Onder de tabellen is aangegeven welke randvoorwaarden het betreft.
- **Er dient specifieke aandacht te worden besteed aan de randvoorwaarde met betrekking tot files in tunnels: een convergentiepunt of divergentiepunt na of in de tunnel mag geen file in de tunnel veroorzaken. In paragraaf 3.7 worden de problematiek en oplossingen uitgebreid beschreven.**

- Als er niet aan de overige randvoorwaarden kan worden voldaan, dan wordt het ontwerp afgekeurd. Door aanpassingen in het ontwerp moet worden getracht, alsnog een acceptabel ontwerp te realiseren. Dergelijke aanpassingen vallen buiten de scope van dit onderzoek.
- **Omdat de gevolgen van een incident in een tunnel ernstiger zijn, dan de gevolgen van eenzelfde incident in de open lucht, moet in alle gevallen getracht worden een convergentie- of divergentiepunt buiten de tunnel (op de voldoende afstand van de tunnelingang- of uitgang) aan te leggen.**
- Wanneer om zwaarwegende redenen dit niet mogelijk is, dan moet het convergentie- of divergentiepunt op voldoende afstand van de tunnelingang- of uitgang (in de tunnel) gerealiseerd worden, waarbij in **alle gevallen** compenserende maatregelen overwogen moeten worden. Deze maatregelen worden in hoofdstuk 5 en 6 besproken. Dit hoeft overigens niet altijd te betekenen dat met compenserende maatregelen een convergentie- of divergentiepunt in een tunnel wel acceptabel is; in bepaalde gevallen kan het effect van compenserende maatregelen onvoldoende zijn, waardoor een configuratie als nog als onacceptabel wordt beoordeeld.
- Als een convergentie- of divergentiepunt in een tunnel onvermijdelijk is, dan zijn belangrijke aandachtspunten de overgang van licht naar donker op de toerit zelf en de overgang van donker naar licht op de afrit zelf. Ook voor deze punten geldt dat de weggebruiker tijd nodig heeft om zich aan te passen aan de gewijzigde lichtomstandigheden. In deze periode mogen geen rijtaakverzwarende elementen aanwezig zijn (krappe bogen, kans op stilstaand verkeer, rijstrookwisselingen, etc.).

Uitvoegers

Voor de tunnel (L_{u1})				In de tunnel								Na de tunnel (L_{u4})			
				Na de tunnelingang (L_{u2})				Voor de tunneluitgang (L_{u3})							
Risicobenadering A	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering A	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering A	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering A	120 km/h	100 km/h	80 km/h
turbulentie na puntstuk	150	125	100	oogaccommodatie	210	150	105	turbulentie na puntstuk	150	125	100	oogaccommodatie	210	150	105
fixatie tunnelingang	400	333	267	turbulentie voor puntstuk	750	625	500	fixatie tunneluitgang	230	170	125	turbulentie voor puntstuk	750	625	500
TOTAAL	550	458	367	TOTAAL	960	775	605	TOTAAL	380	295	225	TOTAAL	960	775	605
Risicobenadering B	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering B	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering B	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering B	120 km/h	100 km/h	80 km/h
turbulentie na puntstuk	150	125	100	oogaccommodatie	210	150	105	turbulentie na puntstuk	150	125	100	oogaccommodatie	210	150	105
fixatie tunnelingang	400	333	267	turbulentie voor puntstuk	750	625	500	fixatie tunneluitgang	230	170	125	turbulentie voor puntstuk	750	625	500
MAXIMALE WAARDE	400	333	267	MAXIMALE WAARDE	750	625	500	MAXIMALE WAARDE	230	170	125	MAXIMALE WAARDE	750	625	500
Risicobenadering C	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering C	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering C	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering C	120 km/h	100 km/h	80 km/h
turbulentie na puntstuk (50%)	75	63	50	oogaccommodatie	210	150	105	turbulentie na puntstuk (50%)	75	63	50	oogaccommodatie (50%)	105	75	53
fixatie tunnelingang (50%)	200	167	133	turbulentie voor puntstuk (50%)	375	313	250	fixatie tunneluitgang	230	170	125	turbulentie voor puntstuk (50%)	375	313	250
TOTAAL	275	229	183	TOTAAL	585	463	355	TOTAAL	305	233	175	TOTAAL	480	388	303



Invloedsfactoren

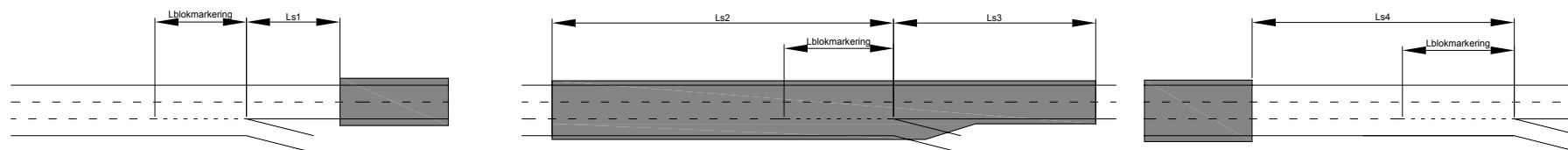
Algemeen: - Intensiteit - Aandeel vrachtverkeer (kwaliteit van de) verlichting in de tunnel - Breedte van het dwarsprofiel - Wel/geen vluchstrook - Horizontaal alignement - Verticaal alignement	Voor de tunnel - Zicht op de tunnelingang - Vormgeving van de tunnelingang	In de tunnel: - Lengte van de uitrijstrook - Zicht op de uitrijstrook en op de afrit - Afstand tussen de uitrijstrook en de tunneluitgang (lengte afrit in de tunnel) - Kans op terugslag van file op de afrit tot in de tunnel (randvoorwaarde). - Bewegwijzering voor en in de tunnel	Na de tunnel: - Zicht op de uitrijstrook en op de afrit - Kans op terugslag van file op de afrit tot in de tunnel (randvoorwaarde). - Bewegwijzering in en na de tunnel
--	--	--	--

Splitsingen

Voor de tunnel (L_{s1})				In de tunnel												Na de tunnel (L_{s4})			
				Na de tunnelingang (L_{s2})				Voor de tunneluitgang (L_{s3})											
Risicobenadering A	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering A	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering A	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering A	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering A	120 km/h	100 km/h	80 km/h
turbulentie na puntstuk	150	125	100	oogaccommodatie	210	150	105	turbulentie na puntstuk	150	125	100	oogaccommodatie	210	150	105	turbulentie na puntstuk	150	125	100
fixatie tunnelingang	400	333	267	turbulentie voor puntstuk	150	125	100	fixatie tunneluitgang	230	170	125	turbulentie voor puntstuk	150	125	100	fixatie tunnelingang	400	333	267
TOTAAL	550	458	367	TOTAAL	1110	900	705	TOTAAL	380	295	225	TOTAAL	1110	900	705	TOTAAL	1110	900	705
Risicobenadering B	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering B	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering B	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering B	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering B	120 km/h	100 km/h	80 km/h
turbulentie na puntstuk	150	125	100	oogaccommodatie	210	150	105	turbulentie na puntstuk	150	125	100	oogaccommodatie	210	150	105	turbulentie na puntstuk	150	125	100
fixatie tunnelingang	400	333	267	turbulentie voor puntstuk	150	125	100	fixatie tunneluitgang	230	170	125	turbulentie voor puntstuk	150	125	100	fixatie tunnelingang	400	333	267
MAXIMALE WAARDE	400	333	267	MAXIMALE WAARDE	900	750	600	MAXIMALE WAARDE	230	170	125	MAXIMALE WAARDE	900	750	600	MAXIMALE WAARDE	900	750	600
Risicobenadering C	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering C	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering C	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering C	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering C	120 km/h	100 km/h	80 km/h
turbulentie na puntstuk (50%)	75	63	50	oogaccommodatie	210	150	105	turbulentie na puntstuk (50%)	75	63	50	oogaccommodatie (50%)	105	75	53	turbulentie na puntstuk (50%)	75	63	50
fixatie tunnelingang (50%)	200	167	133	turbulentie voor puntstuk (50%)	75	63	50	fixatie tunneluitgang	230	170	125	turbulentie voor puntstuk (50%)	75	63	50	fixatie tunnelingang (50%)	200	167	133
TOTAAL	275	229	183	TOTAAL	1035	838	655	TOTAAL	305	233	175	TOTAAL	930	763	603	TOTAAL	930	763	603
Europese tunnelrichtlijn	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Europese tunnelrichtlijn	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Europese tunnelrichtlijn	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Europese tunnelrichtlijn	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Europese tunnelrichtlijn	120 km/h	100 km/h	80 km/h
10 rijseconden	333	278	222																

¹ Lengte blokmarkering varieert per type splitsing.

² Bewegwijzeringsafstand varieert per type splitsing.

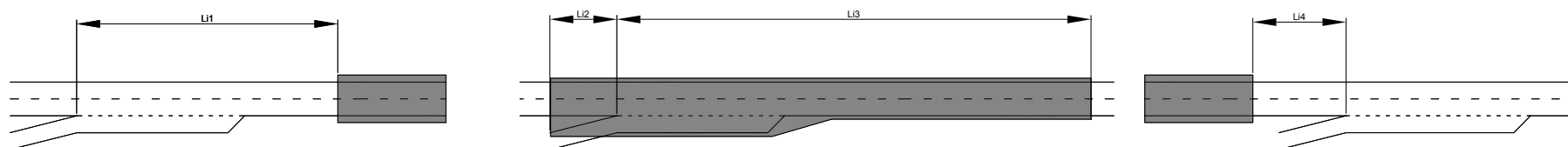


Invloedsfactoren

Algemeen: - Intensiteit - Aandeel vrachtverkeer - Verhouding doorgaand/afslaand verkeer (kwaliteit van de) verlichting in de tunnel - Wel/geen vluchtstrook - Breedte van het dwarsprofiel - Horizontaal alignement - Verticaal alignement	Voor de tunnel - Zicht op de tunnelingang - Vormgeving van de tunnelingang	In de tunnel: - Zicht op de afrit - Afstand tussen het puntstuk en de tunneluitgang (lengte afrit in de tunnel) - Kans op terugslag van file (op de afrit) tot in de tunnel (randvoorwaarde). - Bewegwijzering voor en in de tunnel	Na de tunnel: - Zicht op de afrit - Kans op terugslag van file (op de afrit) tot in de tunnel (randvoorwaarde). - Bewegwijzering in en na de tunnel
--	--	---	--

Invoegers

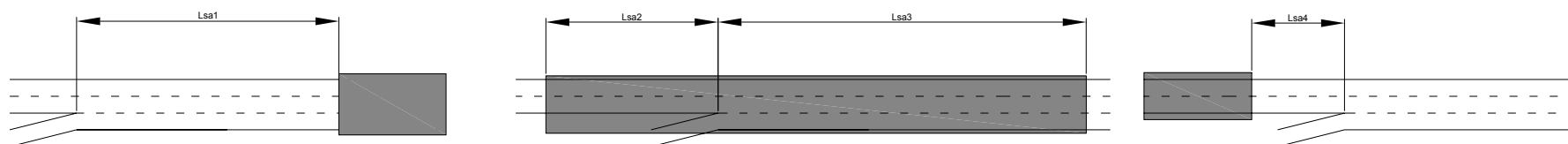
Voor de tunnel (L ₁₁)				In de tunnel								Na de tunnel (L ₁₄)			
				Na de tunnelingang (L ₁₂)				Voor de tunneluitgang (L ₁₃)							
Risicobenadering A	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering A	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering A	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering A	120 km/h	100 km/h	80 km/h
turbulentie na puntstuk	750	625	500	oogaccommodatie	210	150	105	turbulentie na puntstuk	750	625	500	oogaccommodatie	210	150	105
fixatie tunnelingang	400	333	267	turbulentie voor puntstuk	150	125	100	fixatie tunneluitgang	230	170	125	turbulentie voor puntstuk	150	125	100
TOTAAL	1150	958	767	TOTAAL	360	275	205	TOTAAL	980	795	625	TOTAAL	360	275	205
Risicobenadering B	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering B	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering B	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering B	120 km/h	100 km/h	80 km/h
turbulentie na puntstuk	750	625	500	oogaccommodatie	210	150	105	turbulentie na puntstuk	750	625	500	oogaccommodatie	210	150	105
fixatie tunnelingang	200	167	133	turbulentie voor puntstuk	150	125	100	fixatie tunneluitgang	230	170	125	turbulentie voor puntstuk	150	125	100
MAXIMALE WAARDE	750	625	500	MAXIMALE WAARDE	210	150	105	MAXIMALE WAARDE	750	625	500	MAXIMALE WAARDE	210	150	105
Risicobenadering C	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering C	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering C	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering C	120 km/h	100 km/h	80 km/h
turbulentie na puntstuk (50%)	375	313	250	oogaccommodatie	210	150	105	turbulentie na puntstuk (50%)	375	313	250	oogaccommodatie (50%)	105	75	53
fixatie tunnelingang (50%)	200	167	133	turbulentie voor puntstuk (50%)	75	63	50	fixatie tunneluitgang	230	170	125	turbulentie voor puntstuk (50%)	75	63	50
TOTAAL	575	479	383	TOTAAL	285	213	155	TOTAAL	605	483	375	TOTAAL	180	138	103
Europese tunnelrichtlijn	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Europese tunnelrichtlijn	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Europese tunnelrichtlijn	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Europese tunnelrichtlijn	120 km/h	100 km/h	80 km/h
lengte invoegstrook parallel deel	250	200	155												
10 rijseconden	333	278	222												
TOTAAL	583	478	377												

**Invoedsfactoren**

Algemeen: - Intensiteit - Aandeel vrachtverkeer - Intensiteit invoegend verkeer (kwaliteit van de) verlichting in de tunnel - Breedte van het dwarsprofiel - Wel/geen vluchtstrook - Lengte van de invoegstrook - Horizontaal alignement - Verticaal alignement	Voor de tunnel: - Zicht op de tunnelingang - Vormgeving van de tunnelingang	In de tunnel: - Zicht van het verkeer op de toerit op het verkeer op de hoofdrijbaan - Kans op file ter hoogte van de invoeger (randvoorwaarde).	Na de tunnel: - Zicht van het verkeer op de toerit op het verkeer op de hoofdrijbaan - Kans op file ter hoogte van de invoeger en terugslag tot in de tunnel (randvoorwaarde).
--	---	--	--

Samenvoegers

Voor de tunnel (Lsa ₁)				In de tunnel								Na de tunnel (Lsa ₄)			
				Na de tunnelingang (Lsa ₂)				Voor de tunneluitgang (Lsa ₃)							
Risicobenadering A	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering A	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering A	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering A	120 km/h	100 km/h	80 km/h
turbulentie na puntstuk	375	313	250	oogaccommodatie	210	150	105	turbulentie na puntstuk	375	313	250	oogaccommodatie	210	150	105
fixatie tunnelingang	400	333	267	turbulentie voor puntstuk	150	125	100	fixatie tunneluitgang	230	170	125	turbulentie voor puntstuk	150	125	100
TOTAAL	775	646	517	TOTAAL	360	275	205	TOTAAL	605	483	375	TOTAAL	360	275	205
Risicobenadering B	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering B	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering B	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering B	120 km/h	100 km/h	80 km/h
turbulentie na puntstuk	375	313	250	oogaccommodatie	210	150	105	turbulentie na puntstuk	375	313	250	oogaccommodatie	210	150	105
fixatie tunnelingang	200	167	133	turbulentie voor puntstuk	150	125	100	fixatie tunneluitgang	230	170	125	turbulentie voor puntstuk	150	125	100
MAXIMALE WAARDE	375	313	250	MAXIMALE WAARDE	210	150	105	MAXIMALE WAARDE	375	313	250	MAXIMALE WAARDE	210	150	105
Risicobenadering C	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering C	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering C	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering C	120 km/h	100 km/h	80 km/h
turbulentie na puntstuk (50%)	188	156	125	oogaccommodatie	210	150	105	turbulentie na puntstuk (50%)	188	156	125	oogaccommodatie (50%)	105	75	53
fixatie tunnelingang (50%)	200	167	133	turbulentie voor puntstuk (50%)	75	63	50	fixatie tunneluitgang	230	170	125	turbulentie voor puntstuk (50%)	75	63	50
TOTAAL	388	323	258	TOTAAL	285	213	155	TOTAAL	418	326	250	TOTAAL	180	138	103

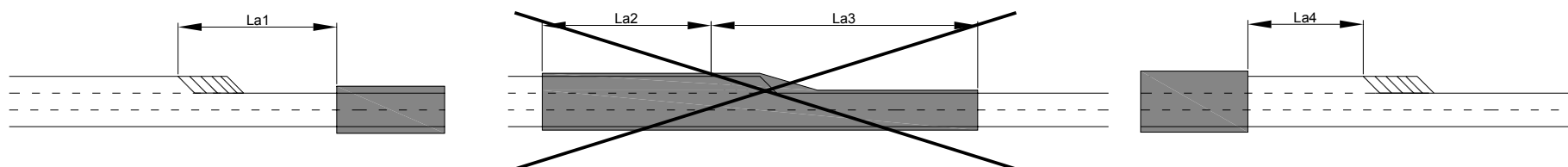


Invloedsfactoren

Algemeen: - Intensiteit - Aandeel vrachtverkeer - Intensiteit verkeer vanaf de toerit (kwaliteit van de) verlichting in de tunnel - Breedte van het dwarsprofiel - Wel/geen vluchtstrook - Horizontaal alignement - Verticaal alignement	Voor de tunnel: - Zicht op de tunnelingang - Vormgeving van de tunnelingang	In de tunnel: -	Na de tunnel: -
--	---	--	--

Strookbeëindigingen/afstrepingen

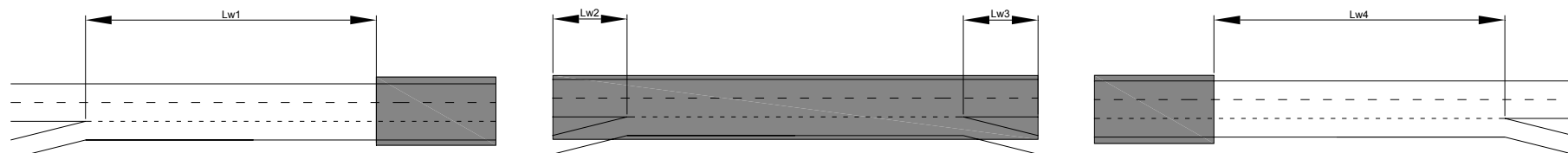
Voor de tunnel (La ₁)				In de tunnel				Na de tunnel (La ₄)			
Na de tunnelingang (La ₂)				Voor de tunneluitgang (La ₃)							
Risicobenadering A	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering A	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering A	120 km/h	100 km/h	80 km/h
lengte afstreping	150	150	150	afstreping in tunnel niet toegestaan				oogaccommodatie	210	150	105
turbulentie na afstreping	150	125	100					turbulentie voor afstreping	375	313	250
fixatie tunnelingang	400	333	267					TOTAAL	585	463	355
TOTAAL	700	608	517								
Risicobenadering B	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering B	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering B	120 km/h	100 km/h	80 km/h
lengte afstreping	150	150	150	afstreping in tunnel niet toegestaan				oogaccommodatie	105	75	50
turbulentie na afstreping	150	125	100					turbulentie voor afstreping	375	313	250
fixatie tunnelingang	400	333	267					MAXIMALE WAARDE	375	313	250
MAXIMALE WAARDE	400	333	267								
Risicobenadering C	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering C	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering C	120 km/h	100 km/h	80 km/h
lengte afstreping	150	150	150	afstreping in tunnel niet toegestaan				oogaccommodatie (50%)	105	75	53
turbulentie na afstreping (50%)	75	63	50					invloedsgebied afstreping (50%)	188	156	125
fixatie tunnelingang (50%)	200	167	133					TOTAAL	293	231	178
TOTAAL	425	380	333								
Europese tunnelrichtlijn	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Europese tunnelrichtlijn	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Europese tunnelrichtlijn	120 km/h	100 km/h	80 km/h
10 rijseconden	333	278	222								

**Invloedsfactoren**

Algemeen: - Intensiteit - Aandeel vrachtverkeer (kwaliteit van de) verlichting in de tunnel - Breedte van het dwarsprofiel - Wel/geen vluchtstrook - Horizontaal alignement - Verticaal alignement	Voor de tunnel: - Zicht op de tunnelingang - Vormgeving van de tunnelingang	In de tunnel: Afstreping in de tunnel niet toegestaan	Na de tunnel: - Zicht van het verkeer op de afstreping - Kans op file ter hoogte van de afstreping en terugslag tot in de tunnel (randvoorwaarde).
---	---	--	--

Weefvakken

Voor de tunnel (Lw ₁)				In de tunnel								Na de tunnel (Lw ₄)			
				Na de tunnelingang (Lw ₂)				Voor de tunneluitgang (Lw ₃)							
Risicobenadering A	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering A	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering A	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering A	120 km/h	100 km/h	80 km/h
turbulentie na puntstuk	375	313	250	oogaccommodatie	210	150	105	turbulentie na puntstuk	150	125	100	oogaccommodatie	210	150	105
fixatie tunnelingang	400	333	267	turbulentie voor puntstuk	150	125	100	fixatie tunneluitgang	230	170	125	turbulentie voor puntstuk	150	125	100
TOTAAL	775	646	517	TOTAAL	360	275	205	TOTAAL	380	295	225	TOTAAL	360	275	205
Risicobenadering B	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering B	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering B	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering B	120 km/h	100 km/h	80 km/h
turbulentie na puntstuk	375	313	250	oogaccommodatie	210	150	105	turbulentie na puntstuk	150	125	100	oogaccommodatie	210	150	105
fixatie tunnelingang	400	333	267	turbulentie voor puntstuk	150	125	100	fixatie tunneluitgang	230	170	125	turbulentie voor puntstuk	150	125	100
MAXIMALE WAARDE	400	333	267	MAXIMALE WAARDE	210	150	105	MAXIMALE WAARDE	230	170	125	MAXIMALE WAARDE	210	150	105
Risicobenadering C	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering C	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering C	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering C	120 km/h	100 km/h	80 km/h
turbulentie na puntstuk (50%)	188	156	125	oogaccommodatie	210	150	105	turbulentie na puntstuk (50%)	75	63	50	oogaccommodatie (50%)	105	75	53
fixatie tunnelingang (50%)	200	167	133	turbulentie voor puntstuk (50%)	75	63	50	fixatie tunneluitgang	230	170	125	turbulentie voor puntstuk (50%)	75	63	50
TOTAAL	388	323	258	TOTAAL	285	213	155	TOTAAL	305	233	175	TOTAAL	180	138	103

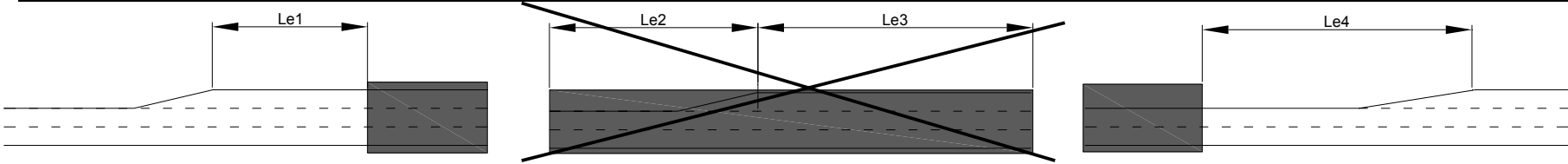


Invloedsfactoren

Algemeen: - Intensiteit - Aandeel vrachtverkeer - Aandeel wevend verkeer (kwaliteit van de) verlichting in de tunnel - Breedte van het dwarsprofiel - Wel/geen vluchtstrook - Horizontaal alignement - Verticaal alignement	Voor de tunnel: - Zicht op de tunnelingang - Vormgeving van de tunnelingang	In de tunnel: - Kans op file (randvoorwaarde). - Zicht op de afrit - Afstand tussen het puntstuk en de tunneluitgang (lengte afrit in de tunnel) - Bewegwijzering voor en in de tunnel	Na de tunnel: - Zicht op de afrit - Kans op terugslag van file op de afrit tot in de tunnel (randvoorwaarde). - Bewegwijzering
---	---	--	---

Extra rijstroken

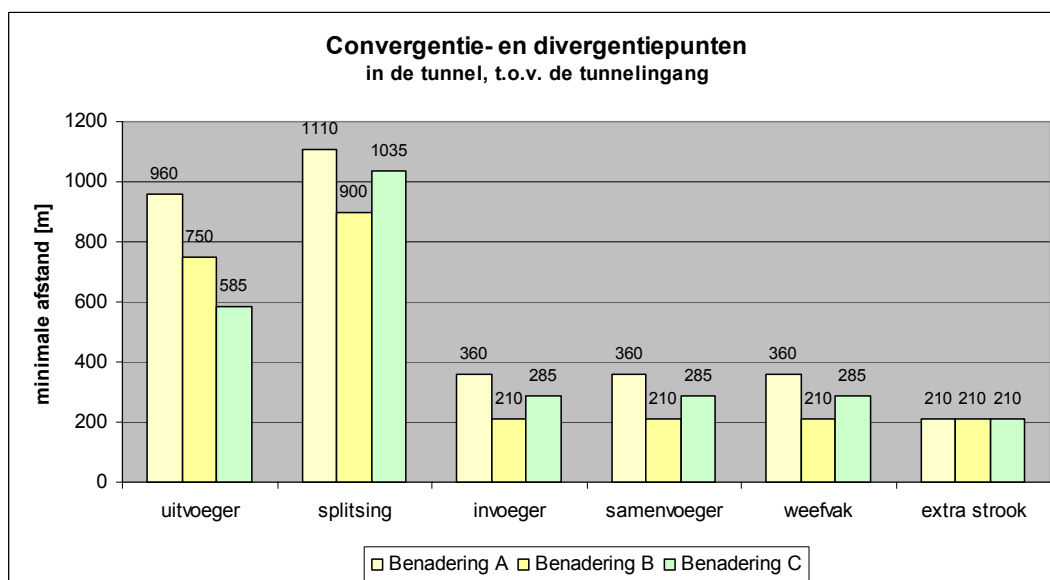
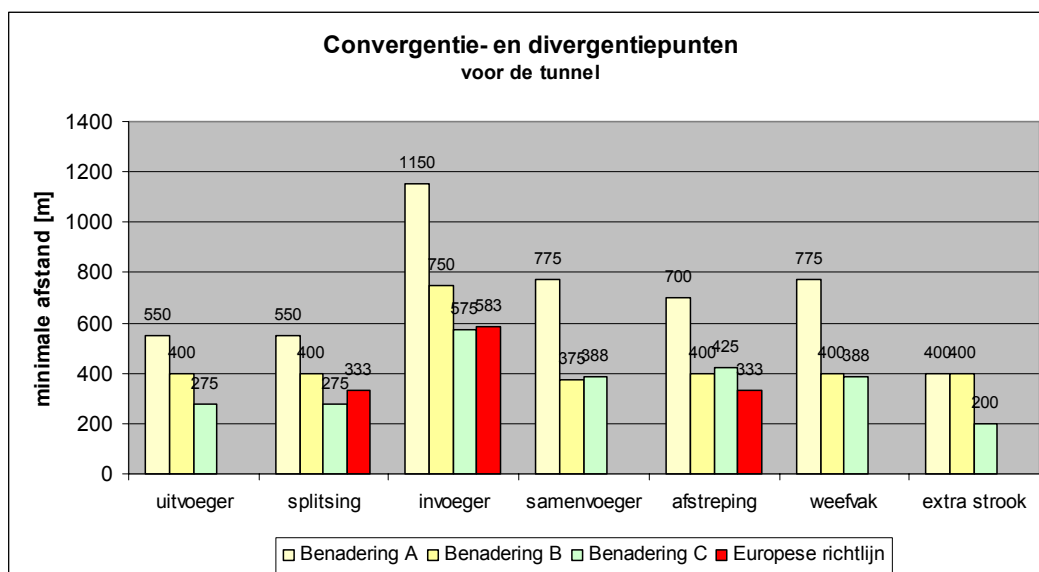
Voor de tunnel (Le ₁)				In de tunnel								Na de tunnel (Le ₄)			
Na de tunnelingang (Le ₂)				Voor de tunneluitgang (Le ₃)								Na de tunnel (Le ₄)			
Risicobenadering A	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering A	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering A	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering A	120 km/h	100 km/h	80 km/h
turbulentie na verbreding	0	0	0	Extra strook in de tunnel niet toegestaan				Extra strook in de tunnel niet toegestaan				oogaccommodatie	210	150	105
fixatie tunnelingang	400	333	267									turbulentie voor verbreding	0	0	0
TOTAAL	400	333	267									TOTAAL	210	150	105
Risicobenadering B	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering B	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering B	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering B	120 km/h	100 km/h	80 km/h
turbulentie na verbreding	0	0	0	Extra strook in de tunnel niet toegestaan				Extra strook in de tunnel niet toegestaan				oogaccommodatie	210	150	105
fixatie tunnelingang	400	333	267									turbulentie voor verbreding	0	0	0
MAXIMALE WAARDE	400	333	267									MAXIMALE WAARDE	210	150	105
Risicobenadering C	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering C	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering C	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Risicobenadering C	120 km/h	100 km/h	80 km/h
turbulentie na verbreding (50%)	0	0	0	Extra strook in de tunnel niet toegestaan				Extra strook in de tunnel niet toegestaan				oogaccommodatie (50%)	105	75	53
fixatie tunnelingang (50%)	200	167	133									turbulentie voor verbreding (50%)	0	0	0
TOTAAL	200	167	133									TOTAAL	105	75	53

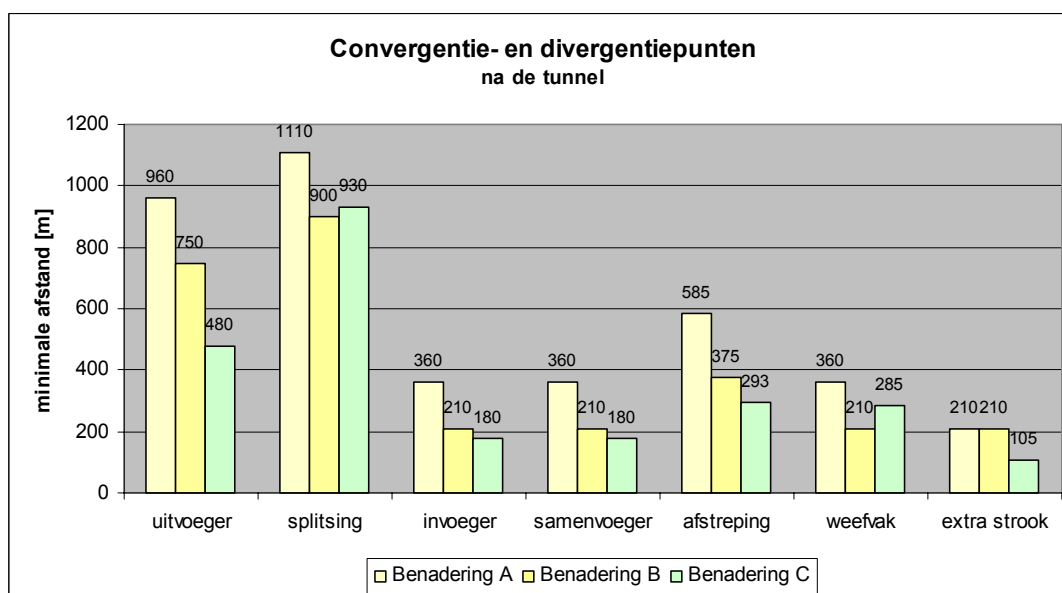
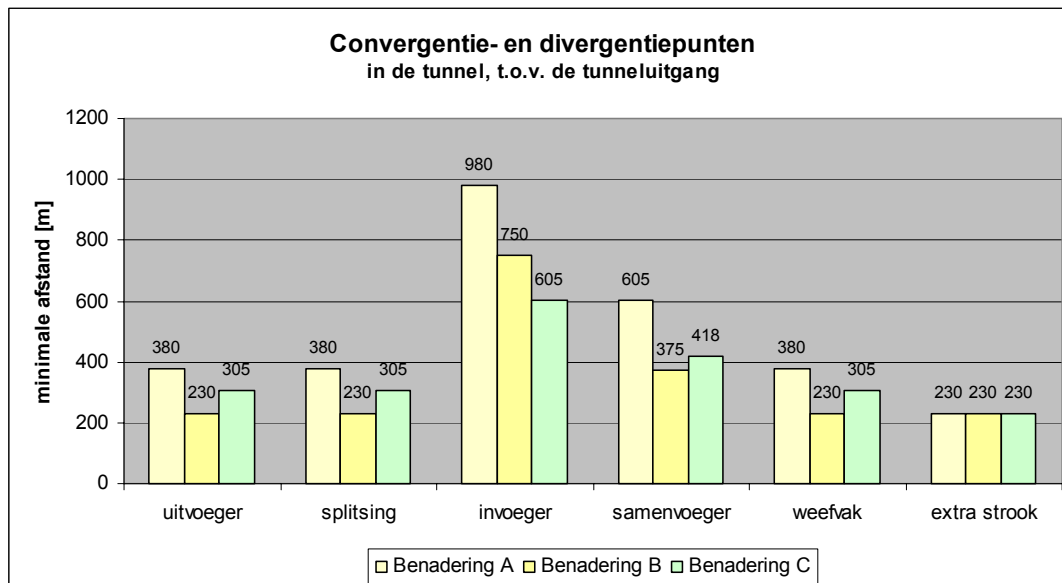


Invoelofsactoren

Algemeen: - De weggebruiker kan van rijstrook wisselen naar een lege rijstrook; er zijn geen risico's verbonden aan deze configuratie. - Een extra rijstrook wordt toegepast wanneer de tunnel mogelijk een bottleneck is (voor de tunnel) of de opgaande helling een te groot snelheidsverval veroorzaakt (van zware voertuigen).	Extra rijstrook in de tunnel niet toegestaan.		
--	---	--	--

In onderstaande figuren zijn de minimale afstanden tussen een convergentie-/divergentiepunt en de tunnelingang/-uitgang samengevat (voor een ontwerpsnelheid van 120 km/h).





Toelichting:

- Risicobenadering A is de meest conservatieve benadering en leidt tot de grootste minimale afstanden. Het toepassen van risicobenadering A heeft tot gevolg dat de minimale afstanden voor een tunnelingang aanzienlijk groter worden dan de Europese tunnelrichtlijn voorschrijft.
- Benadering C sluit het beste aan bij Europese 10 seconden eis ten aanzien van een vermindering van het aantal rijstroken stroomopwaarts van een tunnel.
- Wanneer de risicobenaderingen B en C worden vergeleken, dan verschilt het per type convergentie- en divergentiepunt en per ligging ten opzichte van de tunnel welke benadering tot de grootste minimale afstand leidt.

OP WELKE RISICOBENADERING MOETEN DE MINIMALE AFSTANDEN TUSSEN EEN CONVERGENTIE-/DIVERGENTIEPUNT EN DE TUNNELINGANG-/UITGANG WORDEN GEBASEERD?

In tabel 4.11 zijn de plus- en minpunten van elke benadering samengevat.

Tabel 4.11

Overzicht + en – punten
theorieën

Theorie	+ punten	- punten
Benadering A	Is de veiligste benadering: verschillende rijtaken worden volledig gescheiden	Erg grote afstanden die in de praktijk moeilijk kunnen worden toegepast
Benadering B	Ter plaatse van de tunnelingang- en uitgang geen risicoverhoging door een convergentie-/divergentiepunt	Leidt stroomopwaarts van een tunnel tot grotere afstanden dan de Europese tunnelrichtlijn voorschrijft
Benadering C	- Sluit goed aan op de Europese tunnelrichtlijn - In de praktijk goed toepasbaar	Ter plaatse van de tunnelingang- en uitgang een lichte risicoverhoging door een convergentie-/divergentiepunt

Risicobenadering A is de meest veilige benadering, maar leidt in de praktijk tot toepassingsproblemen. In veel situaties zal niet aan de eisen kunnen worden voldaan. Deze benadering valt af.

Risicobenadering B en C ontlopen elkaar niet veel. Bij benadering C is er sprake van een lichte, maar acceptabele, verhoging van het extra risico. In een aantal gevallen leidt benadering B tot grotere minimale afstanden, in een aantal gevallen benadering C.

De volgende keuze is gemaakt:

- o Bij elke combinatie van een convergentie-/divergentiepunt met een tunnelingang-/uitgang wordt de kleinste minimale afstand voorgeschreven.
- o Bij tunnels met hellingen (zinktunnels) is er een extra risico's op de neergaande helling in vergelijking met tunnels waar de hellingen ontbreken (landtunnels). Daarom wordt bij dit type tunnels benadering B voorgeschreven (geen risicoverhoging ter plaatse van de tunnelingang- en uitgang).

In tabel 4.12 zijn de minimale afstanden tussen een convergentie-/divergentiepunt en de tunnelingang-/uitgang opgenomen.

Tabel 4.12

Minimale afstanden (m) tussen
con- en divergentiepunten en
een tunnel

Type	Locatie	120 km/h	100 km/h	80 km/h	Meetpunten
Uitvoeger	Voor de tunnel	275 (400)	230 (335)	185 (265)	Puntstuk – tunnelingang
	In de tunnel, t.o.v. tunnelingang	585	465	355	Tunnelingang – puntstuk
	In de tunnel, t.o.v. tunneluitgang	230	170	125	Puntstuk – tunneluitgang
	Na de tunnel	480	390	300	Tunneluitgang – puntstuk
Splitsing	Voor de tunnel	275 (400)	230 (335)	185 (265)	Puntstuk – tunnelingang
	In de tunnel, t.o.v. tunnelingang	900	750	600	Tunnelingang – puntstuk ¹
	In de tunnel, t.o.v. tunneluitgang	230	170	125	Puntstuk – tunneluitgang
	Na de tunnel	900	750	600	Tunneluitgang – puntstuk ¹
Invoeger	Voor de tunnel	575 (750)	480 (625)	385 (500)	Puntstuk – tunnelingang
	In de tunnel, t.o.v. tunnelingang	210	150	105	Tunnelingang – puntstuk
	In de tunnel, t.o.v. tunneluitgang	605	485	375	Puntstuk – tunneluitgang
	Na de tunnel	180	140	100	Tunneluitgang – puntstuk
Samenvoeger	Voor de tunnel	375	315	250	Puntstuk – tunnelingang
	In de tunnel, t.o.v. tunnelingang	210	150	105	Tunnelingang – puntstuk
	In de tunnel, t.o.v. tunneluitgang	375	315	250	Puntstuk – tunneluitgang
	Na de tunnel	180	140	100	Tunneluitgang – puntstuk
Afstreping	Voor de tunnel	400	335	265	Einde rijstrook - tunnelingang
	In de tunnel, t.o.v. tunnelingang	-	-	-	-
	In de tunnel, t.o.v. tunneluitgang	-	-	-	-
	Na de tunnel	295	230	180	Tunneluitgang – einde rijstrook
Weefvak	Voor de tunnel	390	325	260	Puntstuk – tunnelingang
	In de tunnel, t.o.v. tunnelingang	210	150	105	Tunnelingang – puntstuk
	In de tunnel, t.o.v. tunneluitgang	230	170	125	Puntstuk – tunneluitgang
	Na de tunnel	180	140	100	Tunneluitgang - puntstuk
Extra strook	Voor de tunnel	200 (400)	165 (335)	135 (265)	Begin extra str. - tunnelingang
	In de tunnel, t.o.v. tunnelingang	-	-	-	-
	In de tunnel, t.o.v. tunneluitgang	-	-	-	-
	Na de tunnel	105	75	55	Tunneluitgang – begin extra str.

¹ Uitgaande van een lengte van de blokmarkering van 750m. Indien de lengte van de blokmarkering afwijkt, dient het verschil verdisconteert te worden.

Opmerkingen:

- Tussen haakjes zijn de minimale afstanden weergegeven die van toepassing zijn op tunnels met hellingen (zinktunnels). Bij de samenvoeger en de afstreping en het weefvak zijn geen specifieke waardes voor zinktunnels aangegeven, omdat de toepassing van de andere risicobenadering nauwelijks tot grotere minimale afstanden leidt.
- Met de aanduiding puntstuk wordt de spitse punt van het puntstuk bedoeld.
- In principe dienen de minimale afstanden te worden toegepast ten opzichte van het begin van het gesloten deel van de tunnel, waarbij het lichtrooster niet meetelt. Het lichtrooster is bedoeld om de overgang van licht naar donker geleidelijk te laten verlopen (hetzelfde effect kan ook door ingangverlichting worden bereikt).

HOOFDSTUK

5 Maatregelen

5.1

INLEIDING

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op risicoverlagende maatregelen. Daarbij worden twee typen maatregelen onderscheiden:

COMPENSERENDE MAATREGELEN

Maatregelen die overwogen kunnen worden om het risico te verlagen als het niet mogelijk is om een convergentie- of divergentiepunt op voldoende afstand van een tunnelingang- of uitgang te positioneren.

AANVULLENDE MAATREGELEN

Maatregelen die genomen dienen te worden als het niet mogelijk is om een convergentie- of divergentiepunt buiten de tunnel aan te leggen (alleen zwaarwegende redenen mogen hieraan ten grondslag liggen).

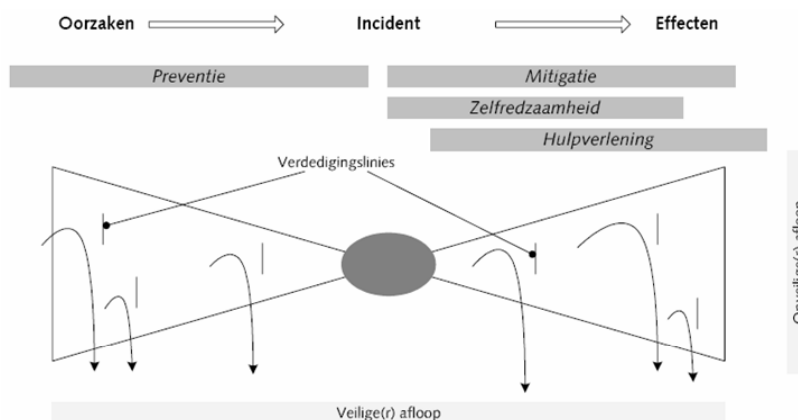
Alvorens de maatregelen worden beschreven, worden eerst twee principes behandeld waarmee de maatregelen gepositioneerd en beoordeeld kunnen worden: het zogenaamde 'Vlinderdasmodel' en het 'ALARA-principe' [21].

Vlinderdasmodel

De keten oorzaken – incident (of verstoring) – effecten wordt vaak weergegeven in het zogenoemde vlinderdasmodel (figuur 5.1).

Figuur 5.1

Vlinderdasmodel



Het vlinderdasmodel wordt gelezen van links naar rechts. Het incident staat centraal. Links ervan staan de ongeval oorzaken en rechts de effecten. Aan beide zijden bestaan aangrijpingspunten voor het beïnvloeden van het verloop van de causale keten.

Enerzijds gaat het om het voorkomen van het incident en anderzijds om na een incident een zo veilig mogelijke afloop te bewerkstelligen.

De onderverdeling in preventie (voorkomen van het incident), mitigatie (voorkómen van escalatie), zelfredding en hulpverlening kan worden beschouwd als een tamelijk ruwe categorisering. Een gedetailleerdere beschouwing van de ongevalsketen brengt de concrete maatregelen in beeld.

De verticale strepen zijn zogenaamde 'verdedigingslijnies'. De pijltjes in deze figuur geven aan, dat een effectieve verdedigingslinie leidt tot een veilige(r) afloop van het incident, met uiteindelijk een terugkeer naar een beheerste en ongestoorde (verkeers)situatie.

Het vlinderdasmodel kan een kader bieden voor de optimale reductie van de risico's.

Daarbij gelden de volgende basisprincipes:

- Zoek de oplossingen zoveel mogelijk voorin de ongevalsketen (preventie).
- Benoem verdedigingslijnies en aangrijpingspunten voor maatregelen.

ALARA

Bij het optimaliseren van de veiligheid wordt verder het ALARA-principe toegepast.

"ALARA" staat voor: As Low As Reasonably Achievable. Zeer vrij vertaald betekent dit:

"Gebruik in het hele ontwerptraject je verstand en kijk waar er met minimale extra investeringen op praktische wijze nog extra veiligheidswinst te boeken valt, ook wanneer de constructie met een kwantitatieve risicoanalyse en een scenario-analyse is getoetst".

Gewoon goed nadenken levert met weinig extra kosten vaak een effectieve veiligheidsverbetering.

5.2

BESCHRIJVING MAATREGELEN

In bijlage I zijn risicoverlagende maatregelen beschreven. Daarbij zijn de maatregelen ingedeeld in 3 categorieën: maatregelen op het gebied van (weg)ontwerp, dynamisch Verkeersmanagement (DVM) en incident Management (IM). Voor de beschrijvingen en beoordelingen van de maatregelen zijn diverse bronnen gebruikt [22],[23],[24]

Bij het beschrijven van de maatregelen worden de volgende aspecten belicht:

- Een korte beschrijving van de maatregel.
- Het werkingsprincipe van de maatregel: verkleinen van de kans op een ongeval (preventie), beperken van de ernst van afloop (mitigatie).
- Toepasbaarheid van de maatregel.
- Het risicoverlagende effect van de maatregel, onderverdeeld in 3 categorieën: laag, midden, hoog. Indien beschikbaar, zijn kwantitatieve gegevens benoemd.
- Randvoorwaarden: binnen welke randvoorwaarden is de maatregel toepasbaar?
- Wegbeeld en begrijpelijkheid: aandachtspunten vanuit het perspectief van de weggebruiker.
- Effect van de maatregel op de doorstroming
- Kosten, aan de hand van 5 categorieën:
 - Kosten < € 100.000,--
 - € 100.000,-- < Kosten < € 250.000,--
 - € 250.000,-- < Kosten < € 500.000,--
 - € 500.000,-- < Kosten < € 1.000.000,--
 - Kosten > € 1.000.000,--

In bijlage I zijn de maatregelen beschreven. In tabel 5.2 op de volgende pagina is een overzicht van de maatregelen opgenomen.

Figuur 5.2

Overzicht maatregelen

Maatregel	Uitvoeger			Splitsing			Invoeger			samenvoeger			afstreping			Weefvak		
	voor	in	na	voor	in	na	voor	in	na	voor	in	na	voor	in	na	voor	in	Na
<i>Wegontwerp</i>																		
▪ Omlapen/aanpassen type aansluiting																		
▪ Verlagen ontwerpsnelheid																		
▪ Vluchtstrook																		
▪ Scheiden van bestemmingen voor de tunnel																		
▪ In- en uitgaande stromen weefvak scheiden																		
<i>Dynamisch Verkeersmanagement (DVM)</i>																		
▪ Homogeniseren verkeersstroom																		
▪ Voorkomen overschrijdingen maximumsnelheid																		
▪ 'Keep your lane'																		
▪ Inhaalverbod vrachtverkeer																		
▪ Veilige volgfstanden																		
▪ Toeritdosering/rijbaandosering																		
▪ Informatie op (berm)DRIP/GRIP voor de tunnel																		
▪ VRI beïnvloeden																		
▪ Toerit/afrit (dynamisch) afsluiten																		
<i>Incident Management (IM)</i>																		
▪ Kenteken volgsysteem																		
▪ Detectiesysteem gevaarlijke stoffen																		
▪ Berger standby																		
▪ Afhandelingassistentie incidenten																		

	Risicoverlagend effect Hoog
	Risicoverlagend effect Midden
	Risicoverlagend effect Laag
	Maatregel niet effectief

Opmerking: voor de extra strook zijn geen maatregelen gedefinieerd, omdat aan de verkeersafwikkeling bij een extra strook geen risico's verbonden zijn.

Toelichting:

- Bovenaan het overzicht is aangegeven in welke situaties een maatregel toegepast kan worden: voor de tunnel, in de tunnel, na de tunnel.
- De ontwerper/projectleider kan maatregelen selecteren, door de bij het project behorende configuratie in de eerste rij op te zoeken. Vervolgens kan in de betreffende kolom afgelezen worden welke maatregelen in aanmerking komen voor toepassing.
- Met een kleur is aangegeven hoe groot het risicoverlagende effect van een maatregel is (hoog, laag of midden). Het betreft een globale inschatting van het effect: op basis van lokale kenmerken en omstandigheden zal per project moeten worden bepaald hoe groot het effect is.
- Het is geen uitputtende lijst van maatregelen. Het overzicht is vooral bedoeld om een projectleider/ontwerper een beeld te geven van de mogelijkheden om het risico te verlagen.

HOOFDSTUK

6 Ontwerpproces

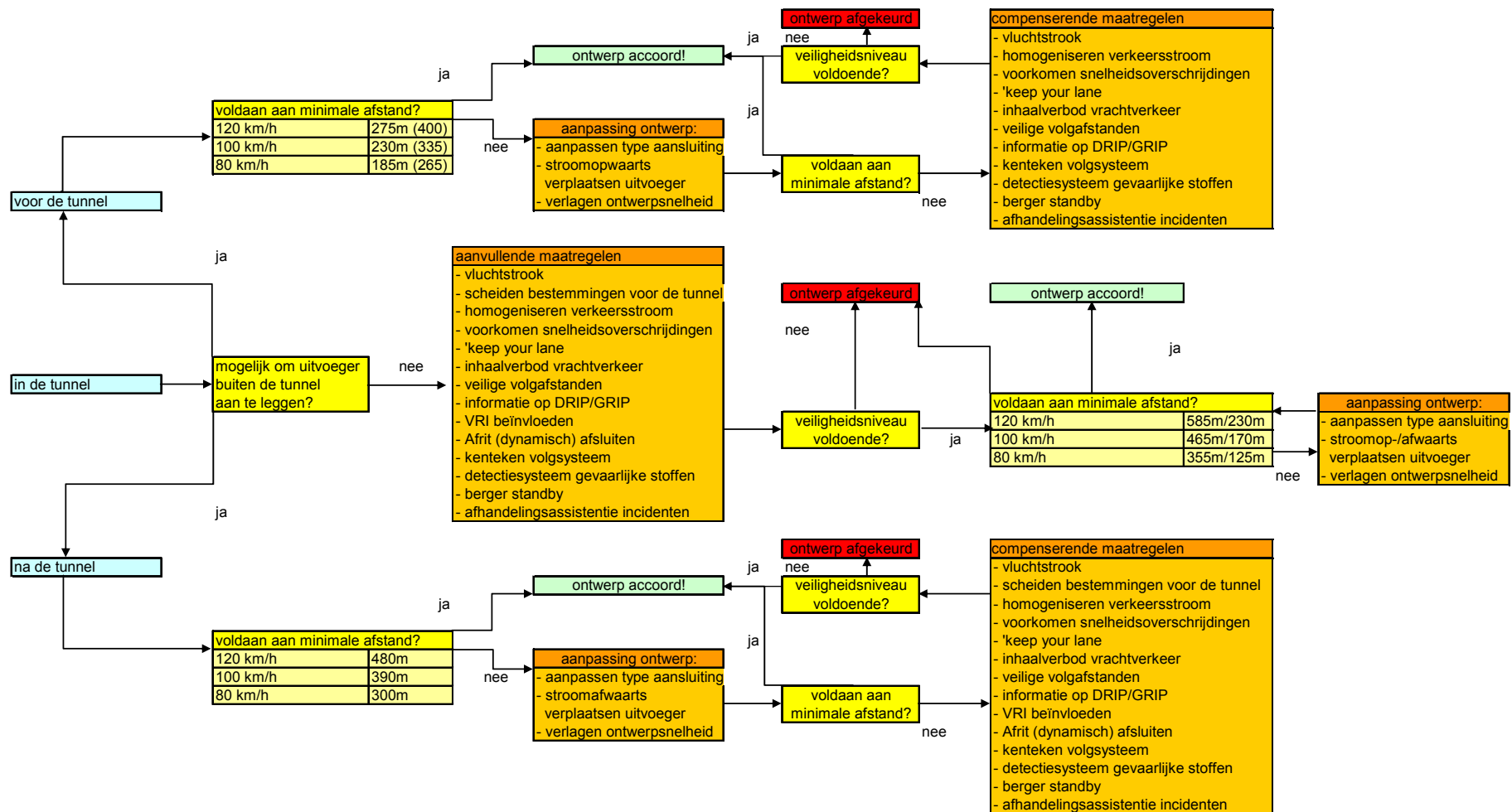
In de voorgaande hoofdstukken is uiteengezet in welke situaties convergentie- en divergentiepunten in en nabij tunnels acceptabel zijn. Tevens is ingegaan op maatregelen die het risico van convergentie- en divergentiepunten in en nabij tunnels kunnen verlagen.

HOE NU OM TE GAAN MET DE CRITERIA VOOR DE POSITIONERING VAN CONVERGENTIE- EN DIVERGENTIEPUNTEN EN DE TOEPASSING VAN MAATREGELEN?

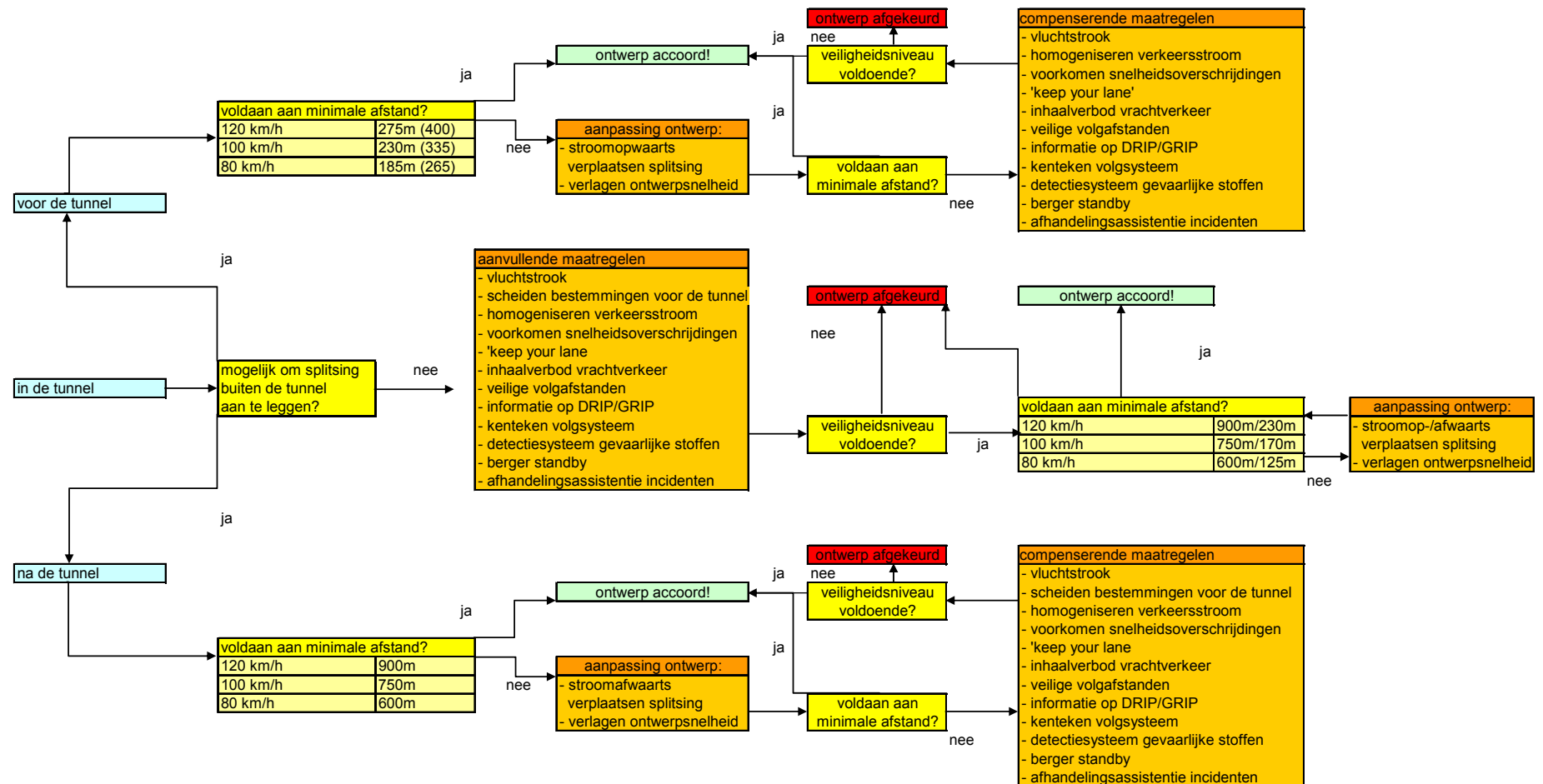
Aan de van stroomschema's (zie volgende pagina's) wordt per type convergentie- en divergentiepunt inzichtelijk gemaakt hoe het ontwerpproces kan worden ingevuld.

Toelichting:

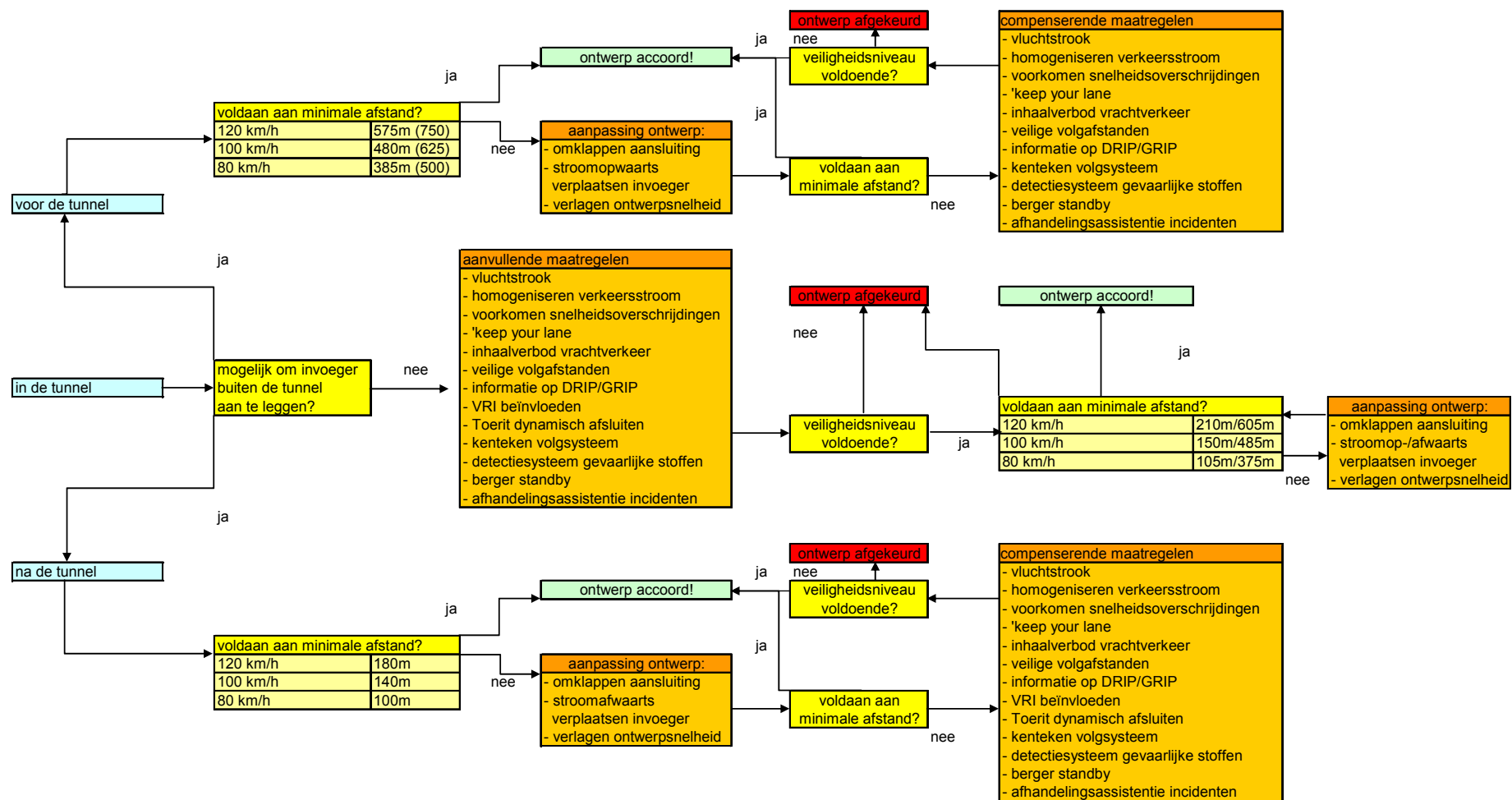
- Aan de linkerkant van elk schema maakt de gebruiker een keuze voor de geplande ligging van het convergentie- of divergentiepunt ten opzichte van de tunnelingang of uitgang. **Convergentie- of divergentiepunten in de tunnel zijn daarbij in principe niet wenselijk.**
- Bij ligging van het convergentie- of divergentiepunt voor of na de tunnel, moet eerst beoordeeld worden of het punt op voldoende afstand van de tunnel ligt.
- Lig het convergentie- of divergentiepunt buiten het invloedsgebied van de tunnel, dan is het ontwerp akkoord.
- Is dit niet zo, dan dient de ontwerper te proberen het ontwerp zo aan te passen dat alsnog aan de eis ten aanzien van de minimale afstand wordt voldaan.
- Is dit niet mogelijk, dan moeten compenserende maatregelen overwogen worden om het veiligheidsniveau op het gewenste niveau te krijgen. Er is een lijst met mogelijke maatregelen opgenomen. Per situatie zal door (verkeers)veiligheidsexperts beoordeeld moeten worden of de maatregelen voldoende effect hebben.
- Zijn de geografische omstandigheden van dien aard, dat een convergentie- of divergentiepunt in de tunnel onvermijdelijk is, dan dienen in elke situatie aanvullende maatregelen overwogen te worden.
- Schatten de (verkeers)veiligheidsexperts het effect van de maatregelen als onvoldoende in, dan wordt het ontwerp afgekeurd.
- Is het effect van de maatregelen voldoende, dan moet vervolgens nog aan de minimale eisen ten aanzien van de ligging van het convergentie- of divergentiepunt ten opzichte van de tunnelingang of –uitgang worden voldaan.
- Kan ook aan deze eis worden voldaan, dan mag bij uitzondering een convergentie- of divergentiepunt in een tunnel worden aangelegd.
- Wanneer er meerdere convergentie- en divergentiepunten in een tunnel zijn gepland, kan de onderlinge afstand gebaseerd worden op turbulentieafstanden (zoals 'buiten').



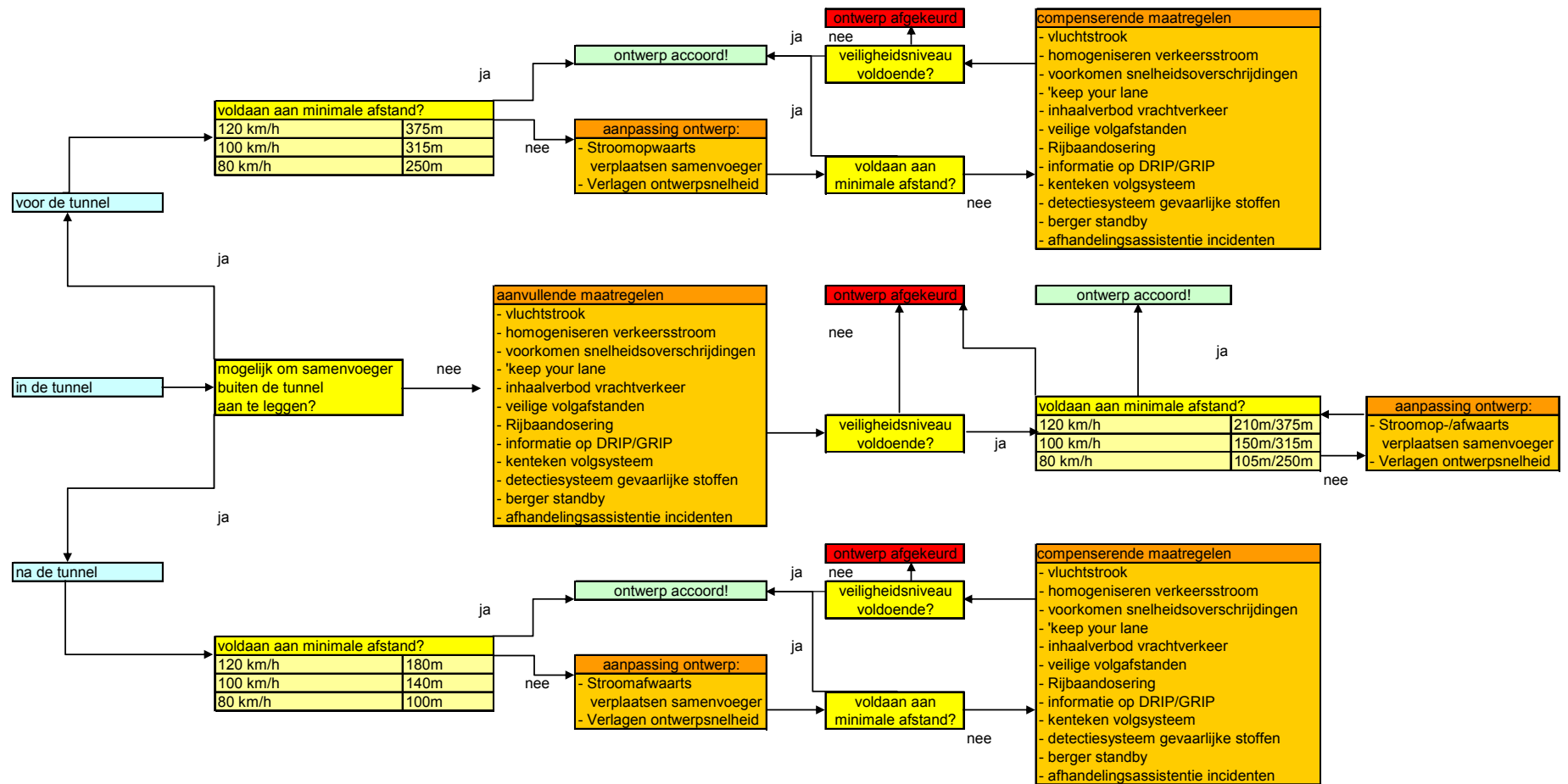
Stroomschema uitvoeger



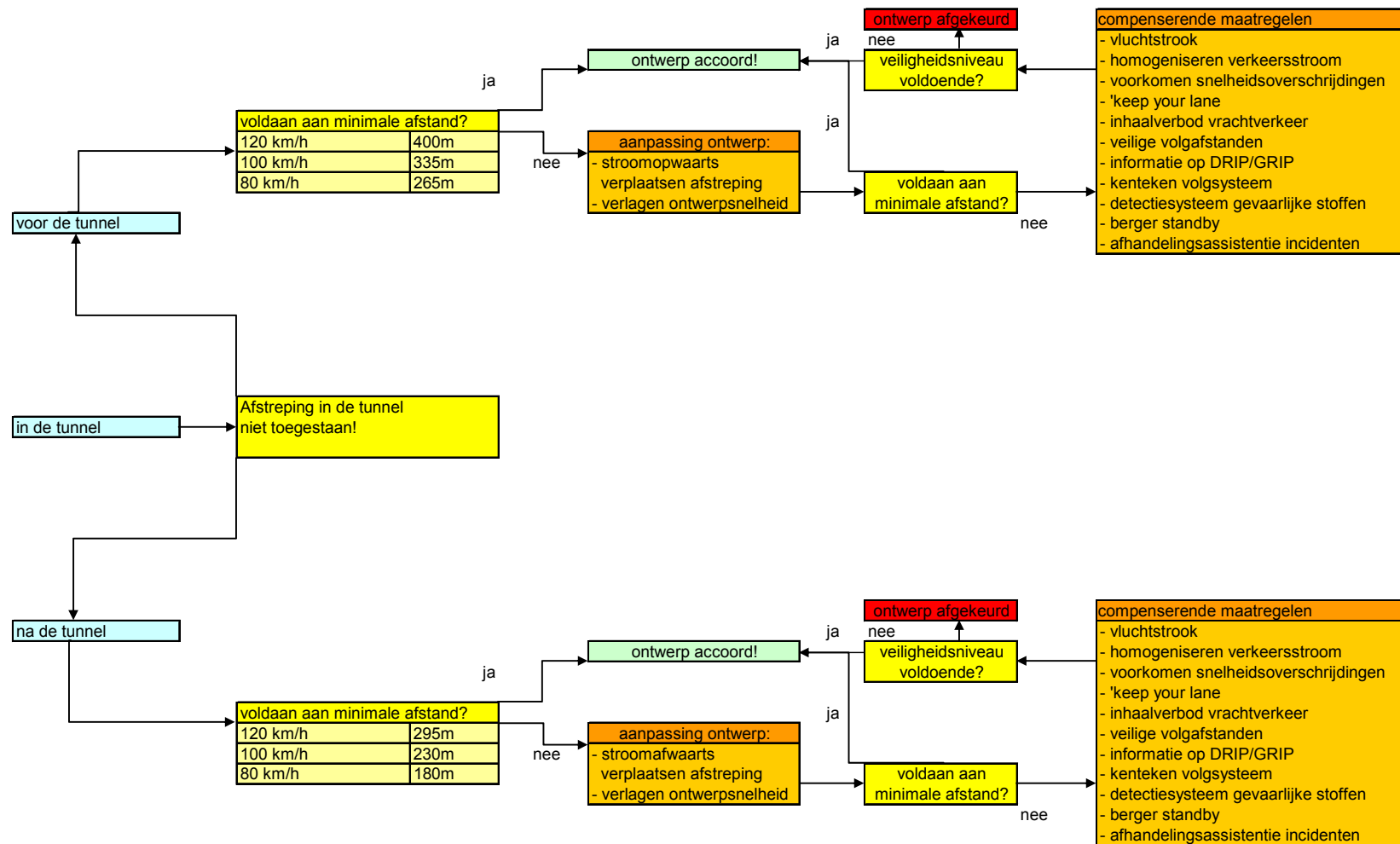
Stroomschema splitsing



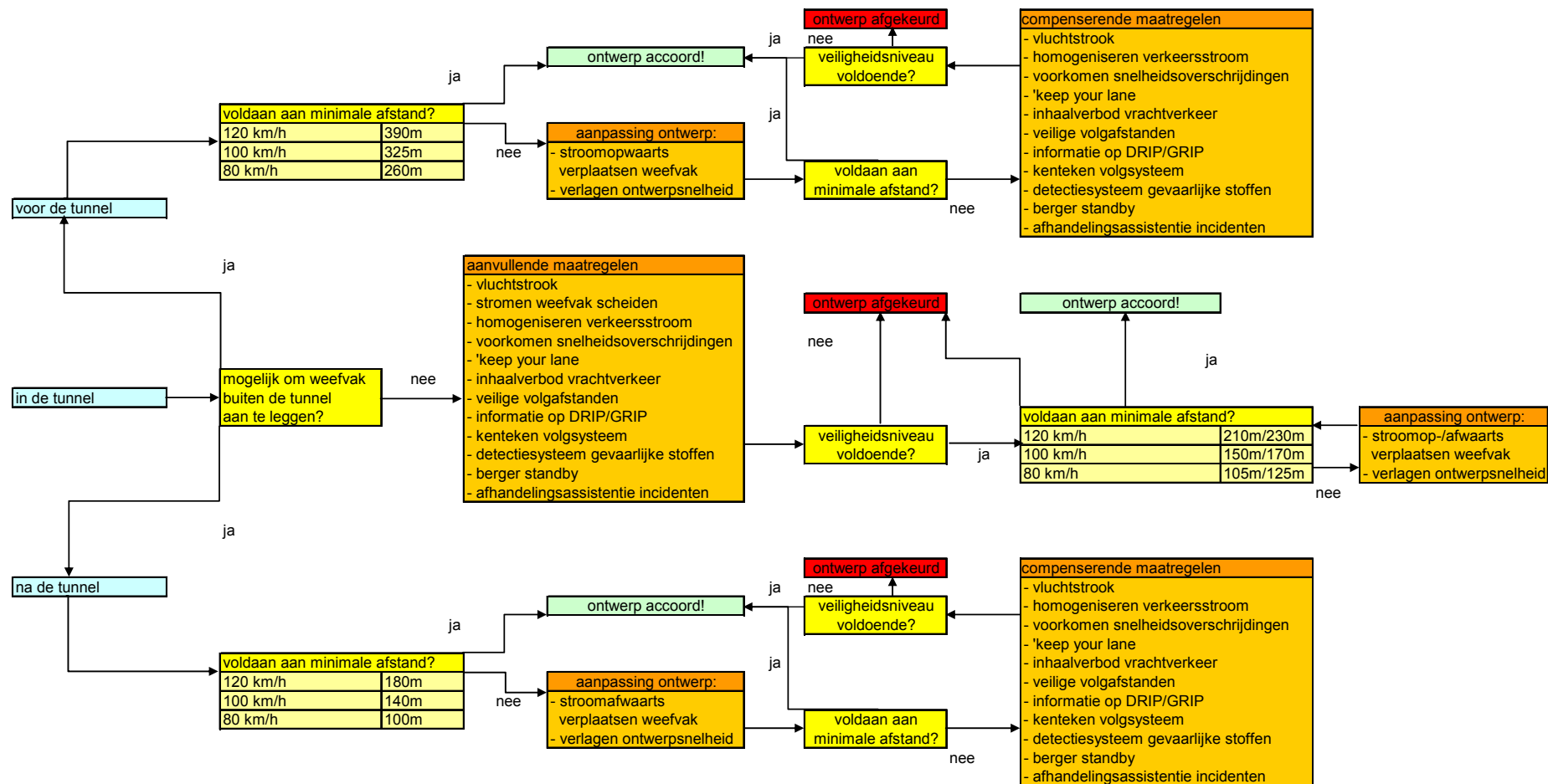
Stroomschema invoeger



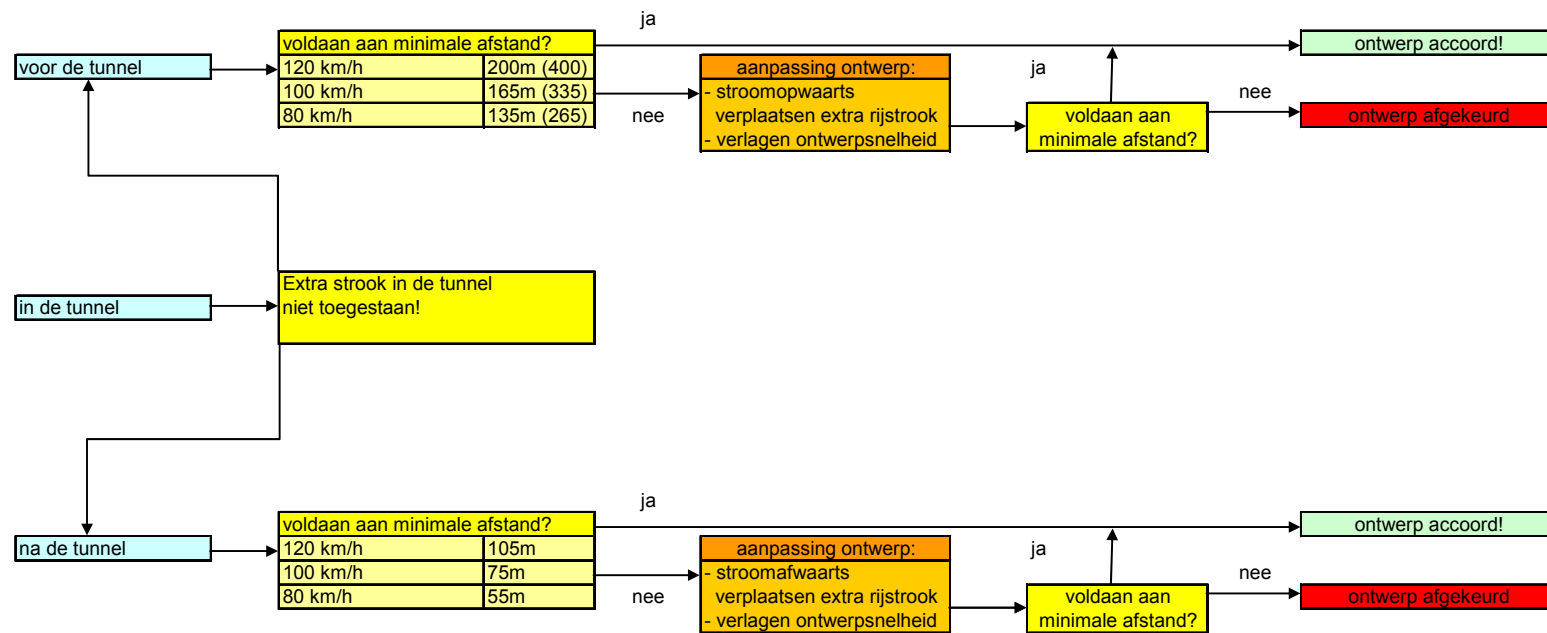
Stroomschema samenvoeger



Stroomschema afstreping



Stroomschema weefvak



Stroomschema extra rijstrook

HOOFDSTUK 7

Conclusies en aanbevelingen

Bij diverse projecten voor tunnels in Nederlandse autosnelwegen wordt overwogen om convergentie- of divergentiepunten (invoegers, uitvoegers, afstrepings, etc.) vlakbij of zelfs in een tunnel aan te leggen.

Omdat hieraan veiligheidsrisico's verbonden zijn, is de volgende onderzoeksvraag gesteld: "Hoe kan het invoegen en uitvoegen in en nabij tunnels veilig plaatsvinden?"

De onderzoeksvraag is beantwoord door:

- Op basis van het verkeersafwikkelingsproces minimale afstanden tussen een convergentie- of divergentiepunt en de tunnelingang of -uitgang te bepalen. Daarbij zijn **alle** typen convergentie- en divergentiepunten beschouwd, zowel in- voor als na de tunnel.
- Maatregelen te definiëren die ingezet kunnen worden als niet aan de minimale afstanden kan worden voldaan.

7.1

CONCLUSIES

- Indien een convergentie- of divergentiepunt dichtbij of in een tunnel ligt, levert dit extra risico's op. Vanuit een oogpunt van (verkeers)veiligheid is het dan ook wenselijk om een convergentie- of divergentiepunt op voldoende afstand van de tunnelingang- of uitgang te positioneren.
- Alleen wanneer het door geografische omstandigheden niet mogelijk is een convergentie- of divergentiepunt buiten de tunnel aan te leggen, mag overwogen worden een dergelijk punt in een tunnel aan te leggen. Daarbij geldt dat in elke situatie aanvullende maatregelen genomen moeten worden. Experts op het gebied van (verkeers)veiligheid beoordelen of de maatregelen de extra risico's voldoende beperken.
- In de Europese Tunnelrichtlijn is vastgesteld dat binnen een afstand van 10 rijseconden vóór de tunnelingang het aantal rijstroken niet mag veranderen. De richtlijn heeft dus alleen betrekking op convergentie- en divergentiepunten voor de tunnel. Daarnaast is het onduidelijk hoe de Europese richtlijn geïnterpreteerd dient te worden en op welke overwegingen de eis van 10 rijseconden is gebaseerd: wat zijn de referentiepunten waarop de 10 rijseconden betrekking hebben, geldt de richtlijn ook voor samenvoegers en splitsingen?

- In deze studie zijn een aantal risicobenaderingen opgesteld waarmee de minimale afstand tussen een convergentie-/divergentiepunt en een tunnelingang-/uitgang kan worden bepaald. Uiteindelijk zijn er twee, vrijwel gelijkwaardige, benaderingen geselecteerd:
 - Het risico ter plaatse van de tunnelingang of -uitgang mag niet verhoogd worden door de aanwezigheid van een convergentie- of divergentiepunt in of nabij de tunnel.
 - De minimale afstand tussen een tunnelingang of -uitgang en een convergentie- of divergentiepunt is gelijk aan de som helft van beide invloedsafstanden. Op helft van beide invloedsafstanden wordt het extra risico acceptabel geacht.

De minimale afstand tussen een convergentie-/divergentiepunt en een tunnelingang-/uitgang is vervolgens bepaald door van beide benaderingen de kleinste afstand te nemen.

Bij tunnels met hellingen (zinktunnels) is er een extra risico's op de neergaande helling in vergelijking met tunnels waar de hellingen ontbreken (landtunnels). Daarom wordt bij dit type tunnels de benadering voorgeschreven waarin geen risicoverhoging ter plaatse van de tunnelingang- en uitgang optreedt.

- De resulterende minimale afstanden wijken in lichte mate af van de Europese tunnelrichtlijn: in enkele gevallen zijn de geadviseerde afstanden groter, in enkele gevallen kleiner. Ook voor situaties waarop de Europese Tunnelrichtlijn geen betrekking heeft, zijn minimale afstanden vastgesteld.
- Voor situaties waarin niet kan worden voldaan aan de minimale afstanden, zijn compenserende maatregelen beschreven. Voor convergentie- of divergentiepunten in tunnels zijn altijd (aanvullende) maatregelen gewenst. Per situatie zal door (verkeers)veiligheidsexperts moeten worden beoordeeld of de maatregelen de veiligheid op een acceptabel niveau brengen. Vanwege de sterk uiteenlopende projectspecifieke omstandigheden is het niet mogelijk om in het algemeen aan te geven welke maatregelen voldoende zijn.

7.2

AANBEVELINGEN

- De Nederlandse tunnelwet (WARVW, BARVW) en de Europese Tunnelrichtlijn zijn niet eenduidig ten aanzien van de eisen voor minimale afstand tussen een convergentie- of divergentiepunt en de tunnelingang- of uitgang: het is niet duidelijk op welke typen convergentie- en divergentiepunten de eisen betrekking hebben, de referentiepunten waarop de minimale afstanden zijn gebaseerd worden niet genoemd en de theorie waarop de eisen zijn gebaseerd is niet bekend. Om in de praktijk eenduidig de minimale afstanden te kunnen bepalen, wordt aanbevolen om de eisen expliciet te maken en de achtergronden waarop de eisen gebaseerd zijn, te vermelden.
- Voor toepassing in de praktijk is het wenselijk om de minimale eisen vast te leggen in een nieuwe richtlijn. Voor achtergrondinformatie kan verwezen worden naar deze studie.
- De aanbevelingen voor de minimale afstanden tussen een convergentie- of divergentiepunt en de tunnelingang- of uitgang die in deze studie zijn gedaan, zijn gebaseerd op theorieën voor verkeersafwikkeling op convergentie- en divergentiepunten en het effect van een tunnelingang (en uitgang) op het rijgedrag van de weggebruikers. Het is wenselijk om deze theorieën en de minimale eisen die daaruit voortkomen, te valideren aan de hand van ongevallendata.

Omdat het aantal Nederlandse tunnels waarbij een convergentie- en divergentiepunt vlakbij een tunnel ligt (nog) beperkt is, zou een dergelijk onderzoek bij voorkeur Europees uitgevoerd moeten worden. Het nadeel van een Europees onderzoek is echter wel dat de tunnels uit verschillende landen soms moeilijk met elkaar vergelijkbaar zijn.

- De minimale afstanden zijn gebaseerd op combinatie van de beïnvloedingsafstanden van een convergentie- of divergentiepunt en de tunnelingang- of uitgang. De lengtes van de invloedsgebieden van de tunnelingang en -uitgang zijn daarbij gebaseerd op een beknopte literatuurstudie. Uitgebreider onderzoek naar de relatie tussen rijgedrag en het binnenrijden en uitrijden van een tunnel, kan leiden tot een betere onderbouwing of aanpassing van de minimale afstanden.
- In deze studie is geen aandacht besteed aan stadstunnels. Gezien de grote dichtheid van convergentie- en divergentiepunten in stedelijke gebieden en plannen van verschillende steden om tunnels aan te leggen, zal de problematiek daar ook spelen. De theorieën die voor autosnelwegen zijn vastgesteld kunnen echter niet één op één zo maar worden doorvertaald naar stadstunnels. Voor stadstunnels is een specifieke studie gewenst.

BIJLAGE

1 Beschrijving maatregelen

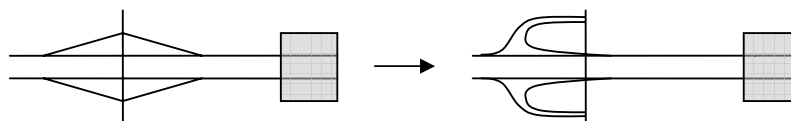
WEGONTWERP MAATREGELEN

Omkappen of aanpassen type aansluiting

Beschrijving

Onder het zogenaamde omklappen van een aansluiting wordt verstaan het verplaatsen van een toerit of afrit naar een ander kwadrant van de aansluiting. Door deze maatregel kan de afstand tussen een convergentie- of divergentiepunt en de tunnelingang- of uitgang vergroot worden, waardoor (mogelijk) weer aan de minimale afstanden wordt voldaan.

In onderstaande figuur is het principe van de maatregel weergegeven.



De Haarlemmermeer aansluiting (links) wordt vervangen door een Halfklaverblad oplossing. Ook zijn er combinaties tussen beide vormen mogelijk.

Weringsprincipe

Verkleinen kans op ongevallen

Toepasbaarheid

Uitvoegers voor de tunnel/in de tunnel/na de tunnel
Invoegers voor de tunnel/in de tunnel/na de tunnel

Risicoverlagend effect

Hoog

De afstand tussen de tunnel en het convergentie- of divergentiepunt wordt met enkele honderden meters vergroot.

Randvoorwaarden

Een halfklaverblad neemt meer ruimte in beslag in de breedte dan een Haarlemmermeer aansluiting: er moet voldoende ruimte zijn om een halfklaverblad in te passen.

Wegbeeld en
begrijpelijkheid
Doorstroming

Er is geen relatie tussen deze maatregel en het wegbeeld/begrijpelijkheid.

Er is geen relatie tussen deze maatregel en de doorstroming. Wel veranderen de verkeersstromen op de kruispunten van de toeritten/afritten met het onderliggende wegennet (locatiespecifiek dient het effect bepaald te worden).

Kosten

Kosten > € 1.000.000,--

Beschrijving	Verlagen ontwerpsnelheid Bij lagere ontwerpsnelheden kan volstaan worden met kleinere minimale afstanden tussen een convergentie-/divergentiepunt en de tunnelingang/-uitgang: de minimale afstanden zijn recht evenredig met de ontwerpsnelheid (voor het deel dat gebaseerd is op de invloedafstand van een convergentie-/divergentiepunt). De ontwerper kan kiezen uit ontwerpsnelheden van 120, 100 en 80 km/h. Een verlaging van de ontwerpsnelheid van 120 naar 80 km/h leidt tot een 33% kortere minimale afstand.
Werkingprincipe	<i>Verkleinen kans op ongevallen</i> <i>Beperken van de ernst van de afloop</i> Bij lagere ontwerpsnelheden zijn de lengtes van convergentie- en divergentiepunten kleiner.
Toepasbaarheid	Alle configuraties
Risicoverlagend effect	Hoog ▪ Bij een gelijkblijvende afstand tussen een convergentie-/divergentiepunt en de tunnelingang/-uitgang heeft de weggebruiker bij lagere snelheden meer tijd om informatie te verwerken. ▪ Bij lagere snelheden zijn de risico's van ongevallen lager (zowel kans als gevolg). Het verband tussen (absolute) snelheid en ongevalrisico is niet lineair, maar volgt een machtsfunctie (gemiddelde snelheid op een wegvak) of een exponentieel verband (individuele voertuigsnelheid) [21]. Bovendien geldt dat in complexere situaties de ongevalkans en de stijging van de ongevalkans bij hogere snelheden groter is dan bij minder complexe situaties. ▪ De snelheidsverschillen zijn kleiner bij lagere snelheden. Grotere snelheidsverschillen worden gerelateerd aan een groter ongevalrisico.
Randvoorwaarden	Er zijn geen randvoorwaarden op deze maatregel van toepassing.
Wegbeeld en begrijpelijkheid	Een verlaging van de ontwerpsnelheid moet consequent doorgevoerd worden in het ontwerp: alle elementen van het ontwerp dienen gedimensioneerd te worden op basis van de verlaagde ontwerpsnelheid. Dus niet alleen de lengte van de in- en uitvoegers, maar ook bijvoorbeeld de breedtes van de dwarsprofielen. Is dit niet het geval, dan zal het wegbeeld niet aansluiten bij de beleving van de weggebruiker. De weggebruiker zal dan eerder geneigd zijn de maximumsnelheid te overschrijden.
Doorstroming	Om milieutechnische redenen zijn op diverse wegvakken van autosnelwegen verlaagde maximumsnelheden ingesteld: onder andere op de A13 bij Overschie en op de A12 bij Utrecht. Omdat het bestaande situaties betreft, zijn de ontwerpsnelheden hoger dan de maximumsnelheden (de wegvakken zijn niet op 80 km/h ontworpen). De effecten op de doorstroming zijn wisselend: in het ene geval neemt de capaciteit toe, in het andere geval af. Bottleneck in de doorstroming is de overgang van het hogere snelheidsregime naar het wegvak met een maximumsnelheid van 80 km/h. Om geen negatief effect op de capaciteit te krijgen, dient de weggebruiker geleidelijk zijn snelheid te verlagen (waardoor schokgolven worden voorkomen). Vanzelfsprekend leidt een lagere maximumsnelheid tot langere reistijden.
Kosten	Een lagere ontwerpsnelheid bespaart kosten.

Vluchtstrook

Beschrijving

Een vluchtstrook vervult de volgende functies:

- Gelegenheid voor koerscorrectie
- Vlucht- en bergingsplaats voor voertuigen
- Rijstrook voor hulpverlening- en onderhoudsvoertuigen
- Tijdelijke rijstrook in bijzondere situaties/omstandigheden

Op open wegvakken geldt dat de vluchtstrook slechts weg mag worden gelaten als resultaat van een zorgvuldige afweging van zwaarwegende argumenten op basis van een kosten-baten analyse.

Voor Nederlandse tunnels geldt dat er geen vluchtstrook wordt toegepast, tenzij er een ruimtereservering noodzakelijk is voor een extra rijstrook (omdat aanzienlijke stijging van de intensiteiten wordt voorzien). Dit uitgangspunt is overigens niet formeel vastgelegd in het beleid.

Werkingsprincipe

*Verkleinen kans op ongevallen (zowel primair als secundair)
Beperken van de ernst van de afloop*

De vluchtstrook heeft zowel een (direct) positief effect op de verkeersveiligheid als op de doorstroming (met name bij incidenten). Omdat een voertuig met pech buiten de verkeersstroom gestald kan worden is er ook een indirect effect op de verkeersveiligheid: de kans op aanrijdingen met voertuigen met pech wordt verlaagd.

De vluchtstrook heeft geen directe relatie met een convergentie- of divergentiepunt. Wel geldt specifiek voor invoegers dat wanneer na een invoeger geen vluchtstrook aanwezig is, een weggebruiker die niet tijdig kan invoegen, geen uitloopmogelijkheid heeft. Dit brengt de volgende risico's met zich mee:

- De weggebruiker voelt zich gedwongen in te voegen, terwijl daar niet voldoende ruimte voor is.
- De weggebruiker zal aan het einde van de vluchtstrook stoppen. Hierdoor wordt het erg lastig om vanuit stilstand in te voegen.
- De weggebruiker heeft onvoldoende lengte om tot stilstand te komen aan het einde van de invoegstrook en loopt het risico in de berm terecht te komen met mogelijke obstakels.

Toepasbaarheid

De aanwezigheid van een vluchtstrook heeft een positief effect op de verkeersveiligheid. Gezien de specifieke problematiek die ontstaat wanneer een invoegstrook niet gevolgd wordt door een vluchtstrook, moet voor een invoeger de vluchtstrook (stroomafwaarts van de invoegstrook), verplicht gesteld worden. Dit geldt voor situaties waarbij de invoeger in de tunnel gelegen is en situaties waarbij de invoegstrook binnen de minimale afstand van de tunnelingang is gelegen (zie hoofdstuk 4).

Risicoverlagend effect	Hoog ▪ Bij de bepaling van het risicoverlagend effect kan onderscheid worden gemaakt in het effect op de kans en op de gevolgen. ▪ Een Nederlands en een Duits onderzoek naar de ongevalfrequenties in tunnels laten respectievelijk een 3% en 20% lagere frequenties zien, wanneer de tunnel is voorzien van een vluchtstrook. Een ander Duits onderzoek naar het effect van de vluchtstrook op de verkeersveiligheid (niet specifiek tunnels), geeft aan dat het weglaten van de vluchtstrook leidt tot een verhoging van de ongevalfrequentie van 31%. ▪ Uit het Duitse rapport over tunnels kan afgeleid worden dat de letselkans bij ongevallen in tunnels zonder vluchtstrook ca. 40% hoger is dan op rijbanen met vluchtstrook. De ongevallenanalyse van de Bouwdienst geeft aan dat het aandeel letselongevallen 19% hoger is in tunnels zonder vluchtstrook. ▪ Opmerking: bovenstaande cijfers hebben betrekking op het effect van vluchtstroken op rijbanen zonder convergentie- of divergentiepunten.
Randvoorwaarden	Geen
Wegbeeld en begripelijkheid	Een rijbaan met vluchtstrook heeft een ruimer wegbeeld, dan een rijbaan zonder vluchtstrook. Wanneer de vluchtstrook ontbreekt, zal een deel van de weggebruikers (op de rechterrijstrook) geneigd zijn verder naar links in zijn rijstrook te rijden dan gebruikelijk. Dit kan negatieve effecten op de verkeersveiligheid hebben.
Doorstroming	▪ De afwezigheid van een vluchtstrook in een tunnel heeft een licht negatief effect heeft op de capaciteit (ca. -3%). ▪ In het geval van een (licht)ongeval is er meer reestruimte beschikbaar om het verkeer door te laten stromen. ▪ Ongevallocaties zijn makkelijker bereikbaar als er een vluchtstrook aanwezig is, waardoor de rijbaan weer eerder vrij is.
Kosten	Kosten > €1.000.000,- De extra kosten voor een vluchtstrook zullen sterk verschillen per project. Belangrijke factoren zijn de lengte van de tunnel, de ligging van de tunnel (diep of op maaiveld) en de bouwmethode (boortunnel, afgezonken tunnel, etc.). Ter indicatie: ▪ In de Leidsche Rijn tunnel kosten de vluchtstroken ca. €11 miljoen extra (tunnellengte 1650m, 4 tunnelbuizen, tunnel op maaiveld). ▪ In de Roertunnel kosten de vluchtstroken ca. 15 miljoen extra (tunnellengte 2000m, 2 tunnelbuizen).

Scheiden van bestemmingen voor de tunnel

Beschrijving

Wanneer er een uitvoeger of splitsing in de tunnel of vlak na de tunnel is gepland, vinden er rijstrookwisselingen in de tunnel plaats.

Om dit te voorkomen kan het splitsingspunt waar het verkeer zijn bestemming moet kiezen, voor de tunnel worden gelegd. Na dit punt zijn rijstrookwisselingen niet meer toegestaan. Dit betekent dat ook de beslissingswegwijzer voor de tunnel wordt geplaatst.

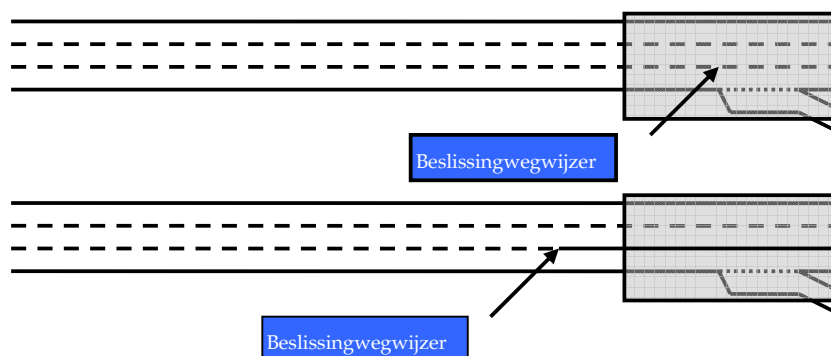
Er zijn een tweetal mogelijkheden om rijstrookwisselingen in de tunnel te voorkomen:

- Doorgetrokken markering (voorkeur)
- Fysieke scheiding

Het nadeel van doorgetrokken markering is, dat rijstrookwisselingen niet uit te sluiten zijn. Het nadeel van een fysieke scheiding, is de kans op aanrijdingen met de voorziening en de bereikbaarheid van eventuele incidenten. De doorgetrokken markering kan eventueel gecombineerd worden met handhaving (op rijstrookwisselingen).

Werkingsprincipe

In onderstaande figuur is het werkingsprincipe weergegeven voor een uitvoeger in een tunnel.



Toepasbaarheid

Uitvoeger/splitsing in of vlak na een tunnel

Risicoverlagend effect

Midden

Rijstrookwisselingen vergroten de kans op ongevallen. Door deze maatregel vinden er geen rijstrookwisselingen meer plaats in de tunnel. Omdat de gevolgen van een ongeval buiten de tunnel minder erg zijn dan de gevolgen in de tunnel, verlaagt deze maatregel het risico.

Randvoorwaarden

Voldoende afstand beschikbaar om het splitsingspunt van de verkeersstromen stroomopwaarts te verschuiven. Het volgende convergentie- of divergentiepunt stroomopwaarts moet zo ver weg liggen dat de bewegwijzering ingepast kan worden. Wanneer dit niet mogelijk is, kan eventueel besloten worden om twee afritten tegelijk aan te kondigen (zoals in Duitsland wel eens gebeurt).

Wegbeeld en begrijpelijkheid

Het wegbeeld en de begrijpelijkheid worden door deze maatregel verbeterd.

- De weggebruiker kan zich in de tunnel concentreren op het rijden in de tunnel.
- Bewegwijzering is buiten de tunnel geplaatst, waar de zichtomstandigheden beter zijn dan in de tunnel.

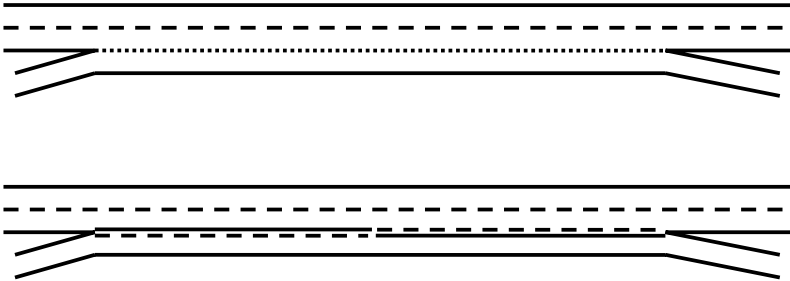
Wanneer een variant wordt toegepast waarbij op de rechterrijstrook ook bestemmingen voor het doorgaande verkeer worden aangegeven, dan kan dit mogelijk verwarring tot

Doorstroming	gevolg hebben (twee mogelijkheden om dezelfde bestemming te bereiken). Het effect op de doorstroming is sterk afhankelijk van de intensiteiten en de verdeling van het verkeer over de verschillende bestemmingen. Wanneer de rechterrijstrook exclusief wordt gereserveerd voor het uitvoegende verkeer, kan de capaciteit voor het doorgaande verkeer te laag zijn, waardoor congestie (voor de tunnel) ontstaat. Als de rechterrijstrook in de tunnel ook door het doorgaande verkeer mag worden gebruikt, is er geen verhoogde kans op congestie. Uiteraard is kans op congestie afhankelijk van de intensiteiten.
Kosten	Kosten < €100.000,- De kosten zijn vrijwel nihil. Wanneer een fysieke scheiding wordt toegepast, zijn de kosten laag.



Voorbeeld bij Antwerpen (alleen scheiding door bewegwijzering)

In- en uitgaande stromen weefvak scheiden

Beschrijving	Een weefvak is een wegvak van beperkte lengte tussen een convergentiepunt en een divergentiepunt. Weefvakken zijn dus segmenten waarop twee of meer verkeersstromen elkaar in lengterichting van de weg kunnen kruisen. Het weefproces is redelijk complex. Door een vereenvoudiging van het proces kan de verkeersveiligheid verbeterd worden. Een mogelijkheid is om het invoegen en het uitvoegen te scheiden.
Werkingsprincipe	Het verkeer van de toerit voegt eerst in, verder stroomafwaarts voegt het verkeer naar de afrit uit. In onderstaande figuur is het principe weergegeven. 
Toepasbaarheid	Omdat de gevolgen van een ongeval in een tunnel ernstiger zijn dan wanneer het ongeval plaatsvindt in de open lucht, komt deze vormgeving vooral in aanmerking voor weefvakken in de tunnel.
Risicoverlagend effect	Laag Deze vormgeving is nog nergens toegepast in Nederland. Er zijn dan ook geen ervaringscijfers beschikbaar. Het verwachte effect op de verkeersveiligheid is beperkt.
Randvoorwaarden	Geen
Wegbeeld en begrijpelijkheid	De belijning wijkt af van die op reguliere weefvakken. Twee verschillende typen belijning naast elkaar zal naar verwachting niet voor alle weggebruikers begrijpelijk zijn.
Doorstroming	Het effect op de doorstroming zal sterk afhangen van de verdeling van het verkeer op het weefvak. Bij een ongunstige verdeling kan de capaciteit ook verlaagd worden.
Kosten	Kosten < € 100.000,-- Alleen beperkte extra kosten voor de belijning.

DVM MAATREGELEN***Homogeniseren verkeersstromen*****Beschrijving**

Door het homogeniseren van verkeersstromen worden de snelheidsverschillen tussen voertuigen verkleind. Het homogeniseren kan door blokrijden of het tonen van verlaagde maximumsnelheden op de signalering. Blokrijden wordt hier verder niet als maatregel meegenomen.

In de praktijk komen verschillende maximumsnelheden voor: 100, 90, 80, 70.

Om naleving van de verlaagde snelheidslimieten te bevorderen, kan de maatregel met trajectcontrole worden gecombineerd.

**Werkingsprincipe**

*Verkleinen kans op ongevallen
Beperken van de ernst van de afloop*

Toepasbaarheid

Bij alle configuraties (er is geen direct verband tussen deze maatregel en de aanwezigheid van een bepaald type configuratie). Omdat de meeste ongevallen plaatsvinden rond de tunnelingang, is het wenselijk om het traject met snelheidsbeperking ruim voor de tunnelingang te beginnen en door te zetten tot voorbij de tunnel.

Risicoverlagend effect**Hoog**

Bij de trajectcontroles op de A2 (tussen Utrecht en Amsterdam en tussen Utrecht en Eindhoven) is de ongevalfrequentie het eerste jaar met 5% gedaald, de letselongevalfrequentie met 23%. In verschillende onderzoeken wordt een reductie van het aantal slachtoffers met 20% genoemd.

Randvoorwaarden

Geen

Wegbeeld en begripelijkheid

Wanneer de snelheidsverlaging niet samengaat met een lagere ontwerpsnelheid, sluit het wegbeeld niet aan bij de beleving van de weggebruiker. De weggebruiker zal dan eerder geneigd zijn de maximumsnelheid te overschrijden.

Doorstroming	Om milieutechnische redenen zijn op diverse wegvakken van autosnelwegen verlaagde maximumsnelheden ingesteld: onder andere op de A13 bij Overschie en op de A12 bij Utrecht. Omdat het bestaande situaties betreft, zijn de ontwerpsnelheden hoger dan de maximumsnelheden (de wegvakken zijn niet op 80 km/h ontworpen). De effecten op de doorstroming zijn wisselend: in het ene geval neemt de capaciteit toe, in het andere geval af. Bottleneck in de doorstroming is de overgang van het hogere snelheidsregime naar het wegvak met een maximumsnelheid van 80 km/h. Om geen negatief effect op de capaciteit te krijgen, dient de weggebruiker geleidelijk zijn snelheid te verlagen (waardoor schokgolven worden voorkomen). Vanzelfsprekend leidt een lagere maximumsnelheid tot langere reistijden.
Kosten	Kosten < € 100.000,-- De signalering is al aanwezig, de kosten zijn beperkt.

Voorkomen overschrijdingen maximumsnelheid

Beschrijving	Naarmate er harder gereden wordt, neemt de kans op een ongeval toe, evenals de kans op ernstig letsel. Bij hogere rijsnelheden is er bovendien minder tijd om informatie te verwerken en daarop te reageren en is de remweg langer. In diepgelegen tunnels zal door de helling het verkeer bij het inrijden van de tunnel de neiging hebben harder te gaan rijden. Oostenrijks onderzoek heeft uitgewezen dat snelheidsoverschrijdingen ook in een tunnel voor een belangrijk deel de oorzaak zijn voor ongevallen. Er zijn verschillende instrumenten om het snelheidsgedrag van weggebruikers te beïnvloeden. Gedacht kan worden aan: ▪ Trajectcontrole. ▪ Terugkoppeling van individuele snelheden (bij snelheidsoverschrijding).
--------------	---



Weringsprincipe	<i>Verkleinen kans op ongevallen.</i> <i>Beperken van de ernst van de afloop.</i>
Toepasbaarheid	Bij alle configuraties (er is geen direct verband tussen deze maatregel en de aanwezigheid van een bepaald type configuratie).
Risicoverlagend effect	Hoog.
Randvoorwaarden	Trajectcontrole moet afgestemd worden met de KLPD.
Wegbeeld en begripelijkheid	Geen relatie.
Doorstroming	Een betere naleving van de maximumsnelheid kan een (licht) positief effect hebben op de doorstroming: de snelheidsverschillen worden kleiner, waardoor de capaciteit iets toeneemt.
Kosten	Trajectcontrole: € 100.000,-- < Kosten € 250.000,-- Terugkoppeling individuele snelheden: Kosten < € 100.000,--

Keep your lane

Beschrijving	Door middel van het 'keep your lane' principe worden rijstrookwisselingen voorkomen en daarmee de verkeersveiligheid bevordert. Het keep your lane principe kan worden toegepast door: ▪ Het toepassen van doorgetrokken markering. ▪ Het toepassen van een inhaalverbod (voor alle verkeer). Het principe wordt (nog) niet toegepast op Nederlandse autosnelwegen. Alleen bij het begin en einde van werkvakken komen varianten voor met inhaalverboden bij slingers.
Werkingsprincipe	<i>Verkleinen kans op ongevallen.</i> Het voorkomen van rijstrookwisselingen.
Toepasbaarheid	Invoeger, samenvoeger (over de gehele lengte). Uitvoeger, splitsing (na het divergentiepunt). Afstreping (na het convergentiepunt).
Risicoverlagend effect	Midden Er zijn geen studies voorhanden die het effect van het 'keep your lane' principe (op Nederlandse autosnelwegen) op de verkeersveiligheid beschrijven. Het veiligheidseffect wordt als middel hoog ingeschat.
Randvoorwaarden	Geen.
Wegbeeld en begripelijkheid	Omdat een deel van de weggebruikers waarschijnlijk geneigd zal zijn zich niet aan het 'keep your lane' principe te houden, is handhaving noodzakelijk.
Doorstroming	Bij maximumsnelheden van 120 of 100 km/h of steile hellingen, zullen er hiaten in de verkeersstroom ontstaan door snelheidsverschillen met langzamere voertuigen. Wanneer het keep your lane principe geldt, mogen weggebruikers niet inhalen, waardoor de ruimte niet optimaal benut wordt. Dit gaat ten koste van de capaciteit.
Kosten	Kosten < € 100.000,--

Beschrijving	<i>Inhaalverbod vrachtverkeer</i> Door de massa en de lengte van het vrachtverkeer zijn rijstrookwisselingen van vrachtverkeer risicovoller dan rijstrookwisselingen van het personenautoverkeer. Zeker wanneer het vrachtverkeer bij een ongeval in de tunnel betrokken raakt, kunnen de gevolgen ernstig zijn. Het inhaalverbod kan statisch worden ingesteld (met venstertijden), of dynamisch (afhankelijk van het verkeersaanbod).
 	<i>Verkleinen kans op ongevallen</i> Een inhaalverbod voor vrachtverkeer leidt tot een rustiger verkeersbeeld.
Werking	Werkingsprincipe Een inhaalverbod voor vrachtverkeer leidt tot een rustiger verkeersbeeld. Toepasbaarheid ▪ Bij alle configuraties, met uitzondering van de splitsing. ▪ Omdat de meeste ongevallen plaatsvinden rond de tunnelingang, is het wenselijk om het traject met het inhaalverbod van vrachtverkeer ruim voor de tunnelingang te beginnen en door te zetten tot voorbij de tunnel. ▪ Als het aandeel vrachtverkeer erg hoog is, kan er colonnevorming op de rechterrijstrook optreden, waardoor het invoegen- en uitvoegen lastiger wordt. ▪ Bij hellingen zijn de snelheidverschillen groter, waardoor de maatregel juist in deze situaties aan te bevelen is.
Risicoverlagend effect	Laag Evaluatiestudies van inhaalverboden laten zien dat de kwaliteit van de verkeersafwikkeling verbeterd, maar uit de analyses blijkt dat er per saldo geen duidelijk effect is waar te nemen op de verkeersveiligheid. In een evaluatie van RWS Noord-Brabant is een afname van het aantal ongevallen aan het begin en einde van het traject gevonden, op het tussenliggende deel een toename. Er is geen toe- of afname van het aantal kritische volgsituaties. Verder zijn er meer inhaalbewegingen bij personenauto's geconstateerd (m.u.v. congestie), minder bij het vrachtverkeer. Het aantal gevaarlijke inhaalbewegingen is afgenomen (vooral bij hogere intensiteiten).
Randvoorwaarden	Geen.
Wegbeeld en begrip	Niet van toepassing.
Doorstroming	Een inhaalverbod voor vrachtverkeer verhoogt de capaciteit met ca. 0-4%.
Kosten	Kosten < € 100.000,-- Statische variant: de investeringskosten worden geschat op € 1400,-- per km, de jaarlijkse onderhoudskosten op € 220,-- per km. Dynamische variant: de investeringskosten worden geschat op € 9000,-- per km, de jaarlijkse onderhoudskosten zijn niet bekend.

Veilige volgfstanden

Beschrijving

Te weinig afstand houden in het verkeer (ook wel bumperkleven genoemd) is een groot probleem. Zo'n 40% van de ongevallen op het hoofdwegennet bestaat uit kop-staart botsingen, waarvan ongeveer 90% door beter afstand te houden kan worden voorkomen. Ook in de tunnels blijken kop-staart ongevallen een veel voorkomend type ongeval te zijn. Er zijn diverse mogelijkheden om de veilige volgfstanden van weggebruikers te beïnvloeden:

- Individuele actuele informatie.
- Markeringspunten op wegdek/tunnelwand.
- Handhaving.
- Elektronische gidsen.



Werkingsprincipe

Zorgen dat weggebruikers een minimale volgtijd (van 1,5-2 seconden) niet onderschrijden.

Toepasbaarheid

- Bij alle configuraties (er is geen direct verband tussen deze maatregel en de aanwezigheid van een bepaald type configuratie).
- Bij een invoeger in een tunnel specifiek: te korte volgfstanden kunnen het invoegen lastig maken, wat zeker in de een tunnel niet wenselijk is.

Risicoverlagend effect

Midden

Het risicoverlagend effect hangt samen met de effectiviteit van het instrument. Een combinatie van maatregelen (individuele actuele informatie in combinatie met handhaving), zal waarschijnlijk het grootste effect hebben.

Randvoorwaarden

Geen (wellicht juridisch).

Wegbeeld en begrijpelijkheid Doorstroming

Geen relatie.

- Wanneer de intensiteiten de capaciteit van een wegvak naderen, is het niet goed mogelijk om een volgfstand van 2 rijseconden te hanteren. Ook bij invoegers, uitvoegers en weefvakken zullen weggebruikers tijdelijk een kortere volgfstand aanhouden.
- Overigens wordt bij het beboeten voor bumperkleven een grens van 0,5 seconden gehanteerd.

- Wanneer al het verkeer een volgtijd van 2 seconden zou hanteren, neemt de capaciteit af met ca. 20%.

Kosten

Individuele actuele informatie: kosten < € 100.000,--

Markeringspunten op wegdek/tunnelwand: kosten < € 100.000,--

Handhaving: kosten < € 100.000,--

Elektronische gidsen: € 250.000,-- < kosten < € 500.000,--

Beschrijving	Toeritdosering/rijbaandosering Met toeritdosering kan de toestroom van verkeer op een toerit naar de hoofdrijbaan beheerst worden. Het verkeer op de toerit wordt in een regime van 'bij groen één auto' toegelaten tot de autosnelweg. Minder gebruikelijk, maar ook mogelijk, is een toepassing op rijbanen. Een dergelijke toepassing is mogelijk in knooppunten.
Werkingsprincipe	 <i>Verkleinen kans op ongevallen</i> Het voornaamste doel van toeritdosering is de verkeersafwikkeling op de hoofdrijbaan te verbeteren. Door de toeritdosering ontstaan meer mogelijkheden voor invoegend verkeer om de snelheid aan te passen aan de snelheid op de hoofdrijbaan. Hierdoor kan zorgvuldiger worden ingevoegd. Bovendien verloopt het invoegproces gelijkmatiger. Dit heeft tot gevolg dat er minder ongevallen op de hoofdrijbaan plaatsvinden. Uit onderzoek is er echter gebleken dat de winst op de hoofdrijbaan teniet wordt gedaan door meer aanrijdingen op de toerit. Het werkingsprincipe van rijbaandosering is ongeveer gelijk aan het principe van de toeritdosering.
Toepasbaarheid	Bij invoegers voor, in en na de tunnel. Gezien de grotere gevolgen van een ongeval in een tunnel, is met name toepassing bij een toerit in een tunnel interessant.
Risicoverlagend effect	Laag Er zijn geen kwantitatieve evaluaties van de verkeersveiligheid beschikbaar. Het effect wordt laag ingeschat.
Randvoorwaarden	▪ Geen terugslag op het OWN (voldoende opstelruimte). ▪ Voldoende lengte op de toerit om snelheid te maken voor het invoegen.
Wegbeeld en begripelijkheid	Omdat er geen direct gevaar verbonden is aan het rijden door rood licht, zal een deel van de weggebruikers geneigd zijn om rood licht te negeren. Voor de effectiviteit van een TDI is het noodzakelijk dat er medewerking is van politie en justitie (mogelijk door middel van camera).
Doorstroming	De capaciteit wordt met ca. 0-5% verhoogd.
Kosten	€ 250.000,-- < Kosten < € 500.000,-- Installatie: ca. € 250.000,--(excl. Koppelingen met vri's, asfalt en reconstructie). Onderhoud en exploitatie: ca. € 3000,-- per jaar.

Informatie op (berm)DRIP/GRIP voor de tunnel

Beschrijving

Op informatiepanelen kan informatie over de tunnel, de weg- en de verkeerssituatie weergegeven worden. Hierbij kan gedacht worden aan de lengte van de tunnel, verkeersdruk in de tunnel, informatie over eventuele afritten, configuratie van rijstroken, ongevallen, etc.

Er zijn verschillende typen informatiepanelen:

- Dynamisch Route Informatie Paneel (DRIP).
- Grafisch Route Informatie Paneel (GRIP).

De panelen zijn oorspronkelijk bedoeld voor het weergeven van route alternatieven, maar kunnen dus ook gebruikt worden voor het overbrengen van andere dynamische informatie.



DRIP

Berm-DRIP (GRIP)

Werkingsprincipe

Verkleinen kans op ongevallen

Door het verstrekken van informatie wordt de weggebruiker voorbereid op de passage van de tunnel. Hierdoor zal de onzekerheid over de te verwachten situatie afnemen en daarmee de veiligheid toenemen.

Toepasbaarheid

Elke configuratie.

Risicoverlagend effect

Laag

Het effect is afhankelijk van de complexiteit van de situatie: in complexe situaties zal de maatregel doorgaans meer effect hebben dan bij relatief eenvoudige configuraties.

Randvoorwaarden

Voldoende ruimte om een DRIP te plaatsen (met name in lengterichting).

Wegbeeld en begripelijkheid

De weggebruiker heeft tijd nodig om de informatie op een DRIP/GRIP te kunnen verwerken. Dit betekent dat de DRIP/GRIP bij voorkeur op een wegvak wordt geplaatst zonder convergentie- of divergentiepunten. Verder dienen de boodschappen op de DRIP kort en eenduidig te zijn.

Doorstroming

Het doel van de reguliere toepassing van een DRIP/GRIP is het verkeer beter te verdelen over de verschillende routes in het netwerk. Toepassing bij tunnels is meer gericht op het goed informeren van weggebruikers en zal slechts weinig invloed hebben op de doorstroming.

Kosten

De kosten van een DRIP en een GRIP bedragen ca. € 300.000,-- € 400.000,--.

Verkeersregelininstallatie beïnvloeden

Beschrijving

De toestroom en afstroom van het verkeer naar en van het onderliggend wegennet kan doorstromingsproblemen in en nabij een tunnel veroorzaken:

- Door een te grote instroom op een toerit in of stroomafwaarts van de tunnel, ontstaat er congestie in de tunnel.
- Door een te geringe afvoercapaciteit van een afrit in of stroomafwaarts van de tunnel, slaat de wachtrij terug tot op de hoofdrijbaan in de tunnel.

In het eerste geval kan de verkeersregelininstallatie (VRI) gebruikt worden om het verkeer gedoseerd toe te laten op de hoofdrijbaan: in feite fungeert de VRI als TDI.

In het tweede geval dient de groentijd van de afrit verruimd te worden, zodat het verkeer beter kan afstromen.



Werkingsprincipe

Verkleinen kans op ongevallen

Een file in de tunnel verhoogt het ongevalrisico in sterke mate. Door de instroom te beperken of de uitstroom te vergroten wordt de kans op file verkleind.

Toepasbaarheid

In- en uitvoegers in of na de tunnel

Deze maatregel is alleen noodzakelijk als de intensiteiten op de betreffende toe- of afrit hoog zijn en er de file tot in de tunnel terugslaat.

Risicoverlagend effect

Hoog

Het effect is uiteraard alleen hoog als het probleem zich voordoet.

Randvoorwaarden

Omdat de verkeersstromen op het onderliggende wegennet beïnvloed worden door deze maatregel, is er afstemming noodzakelijk met de beheerder van het onderliggende wegennet.

Wegbeeld en begrijpelijkheid

Niet van toepassing.

Doorstroming

Deze maatregel heeft een positieve invloed op de doorstroming op het hoofdwegennet en de tunnel, congestie wordt immers voorkomen.

Wanneer de uitstroom op de afrit wordt vergroot, heeft dit wel een negatief effect op de doorstroming van kruisende stromen op het onderliggend wegennet: deze stromen krijgen minder groentijd, waardoor hun reistijd toeneemt.

Kosten

Kosten < € 100.000,--

De VRI's is al aanwezig, alleen de regeling moet aangepast worden.

Toerit (dynamisch) afsluiten

Beschrijving	Door het afsluiten van de toerit wordt voorkomen dat de invoeger een bottleneck wordt. Het verkeer dat normaal van de toerit gebruik maakt, moet tijdens de afsluiting over het onderliggend wegennet rijden. Deze maatregel kan zowel statisch als dynamisch worden toegepast: een permanente afsluiting (24 uur per dag), of alleen in de spits als er een file dreigt te ontstaan. In feite is deze maatregel qua effect een extreme vorm van de maatregel verkeersregelinstallatie beïnvloeden.
Werkingsprincipe	<i>Verkleinen kans op ongevallen</i> Een file in de tunnel verhoogt het ongevalrisico in sterke mate. Door de instroom tot nul te beperken, is er geen kans meer op een (reguliere) file.
Toepasbaarheid	Toerit in of na de tunnel De geschiktheid van deze maatregel is afhankelijk van de hoeveelheid verkeer die van de toerit gebruik maakt, de afstand tot de volgende toerit en de omrijmogelijkheden over het onderliggend wegennet.
Risicoverlagend effect	Hoog Het effect is uiteraard alleen hoog als het probleem zich voordoet.
Randvoorwaarden	Het verkeer dat van de toerit gebruik maakte, moet via een andere route zijn bestemming bereiken. Er moet een redelijk alternatief voor handen zijn qua doorstroming, veiligheid en leefbaarheid.
Wegbeeld en begripelijkheid	Indien de maatregel in een dynamische vorm wordt toegepast, dient de weggebruiker tijdig en ruim voor de toerit op de hoogte te worden gesteld van de afsluiting, zodat hij of zij een alternatief kan kiezen.
Doorstroming	Deze maatregel heeft een positieve invloed op de doorstroming op het hoofdwegennet en de tunnel, congestie wordt immers voorkomen. Indien geen gelijkwaardig alternatief voorhanden is, wordt de doorstroming van het verkeer dat van de toerit gebruik maakte, verslechterd.
Kosten	Kosten < € 100.000,-- Met behulp van bebording moet de afsluiting kenbaar worden gemaakt. Naarmate de vorm van uitvoering dynamischer wordt (venstertijden of op basis van het verkeersaanbod), stijgen de kosten.

INCIDENT MANAGEMENT

Kenteken volgsysteem

Beschrijving	In tunnels is het belangrijk om snel incidenten te kunnen detecteren. Daartoe is het zogenaamde SOS-systeem geïmplementeerd (snelheidonderschrijdingsysteem). Dit systeem bestaat uit op korte afstand gelegen detectielussen die gekoppeld zijn aan een verkeerscentrale. Zodra een voertuig een detectielus passeert met een lagere snelheid dan een ingestelde waarde (bijvoorbeeld 30 km/h), dan wordt een signaal aan de verkeerscentrale doorgegeven. Aanvullend op het SOS-systeem kan een kenteken volgsysteem worden toegepast. Het systeem registreert de voertuigen zodra ze de tunnel ingaan en wanneer ze de tunnel weer uitkomen. Op basis van deze informatie kunnen de reistijden bepaald worden. In het geval van incidenten kan er bepaald worden hoe ernstig het effect op de doorstroming is en welke (typen) voertuigen betrokken zijn bij het incident.
Werkingsprincipe	<i>Beperken van de ernst van de afloop</i> Door snel en adequaat ingrijpen na een incident, wordt de periode waarin de doorstroming wordt verstoord, geminimaliseerd. Daarmee wordt tevens de kans op vervolgongevallen beperkt.
Toepasbaarheid	Deze maatregel is bij elke configuratie toepasbaar. Er is geen direct verband tussen de aanwezigheid van convergentie- of divergentiepunten en deze maatregel.
Risicoverlagend effect	Laag Het SOS-systeem zorgt al voor een snelle detectie van incidenten. Een kenteken volgsysteem heeft daar nog een beperkte toegevoegde waarde op.
Randvoorwaarden	Geen.
Wegbeeld en begripelijkheid	Geen relatie.
Doorstroming	Geen relatie.
Kosten	Kosten < € 100.000,--

Detectiesysteem gevaarlijke stoffen

Beschrijving	In het geval van een incident in een tunnel waarbij vrachtverkeer is betrokken, is het belangrijk om te weten welke lading de vrachtauto vervoert: geen gevaarlijke lading, explosiegevaarlijke, brandgevaarlijke of giftige stoffen. De incidentbestrijding dient afgestemd te zijn op het type lading. Om snel in te kunnen spelen op het type lading, kan een automatisch detectiesysteem worden toegepast, dat real time bijhoudt welke vrachtauto met welke lading zich in de tunnel bevindt. Het systeem bestaat uit camera's plus een herkenningssysteem dat de verschillende typen (gevaarlijke) lading kan onderscheiden.
	
Werkingsprincipe	<i>Beperken van de ernst van de afloop</i> Het doel van de maatregel is de aanpak van incidenten zo snel mogelijk te kunnen starten, waarbij direct de juiste informatie beschikbaar is om de goede vervolgstappen te kunnen zetten.
Toepasbaarheid	Bij alle configuraties Er is geen direct verband tussen de aanwezigheid van convergentie- of divergentiepunten en deze maatregel.
Risicoverlagend effect	Laag Er worden al tal van maatregelen genomen om incidenten te beheersen (onder andere het SOS-systeem en camerabewaking). Deze maatregel kan gezien worden als nog een extra middel om het risico te verlagen.
Randvoorwaarden	Geen.
Wegbeeld en begrijpelijkheid	Geen relatie.
Doorstroming	Een snelle en adequate respons op een incident zorgt voor een sneller herstel van de vrije doorstroming.
Kosten	Kosten < € 100.000,-- De kosten van een videodetectiesysteem (kentekenherkenning) bedragen ca. € 45.000,-- € 50.000,-- per twee meetpunten. De kosten van een systeem voor herkenning van het vervoer van gevaarlijke stoffen zullen in dezelfde orde van grootte liggen.

Berger standby**Beschrijving**

Wanneer door pech of een ongeval een voertuig niet meer op eigen kracht de autosnelweg kan verlaten, zal een berger ingeschakeld moeten worden. De bergingsvoertuigen zijn normaal gesproken op het terrein van de berger gestald. Dit resulteert in een bepaalde aanrijtijd van het terrein van de berger naar de incidentlocatie. De (maximale) aanrijtijden zijn vastgelegd.

Door een (of meerdere) bergingsvoertuigen bij de tunnel te stationeren, kan de aanrijtijd aanzienlijk verkort worden.

**Werkingsprincipe**

Verkleinen kans op ongevallen

Een bijkomend voordeel van het snel herstellen van de normale verkeersafwikkeling is, dat daarmee de kans op secundaire ongevallen wordt verkleind.

Toepasbaarheid

Bij alle configuraties

Er is geen direct verband tussen de aanwezigheid van convergentie- of divergentiepunten en deze maatregel.

Risicoverlagend effect

Laag.

Randvoorwaarden

Geen.

**Wegbeeld en
begrijpelijkheid**

Geen relatie.

Doorstroming

Bij incidenten wordt de vrije doorstroming sneller hersteld: er zal minder vertraging optreden. De winst zal verschillen per tunnel en is onder andere afhankelijk van de intensiteiten, de capaciteit en de oorspronkelijke aanrijtijd.

Kosten

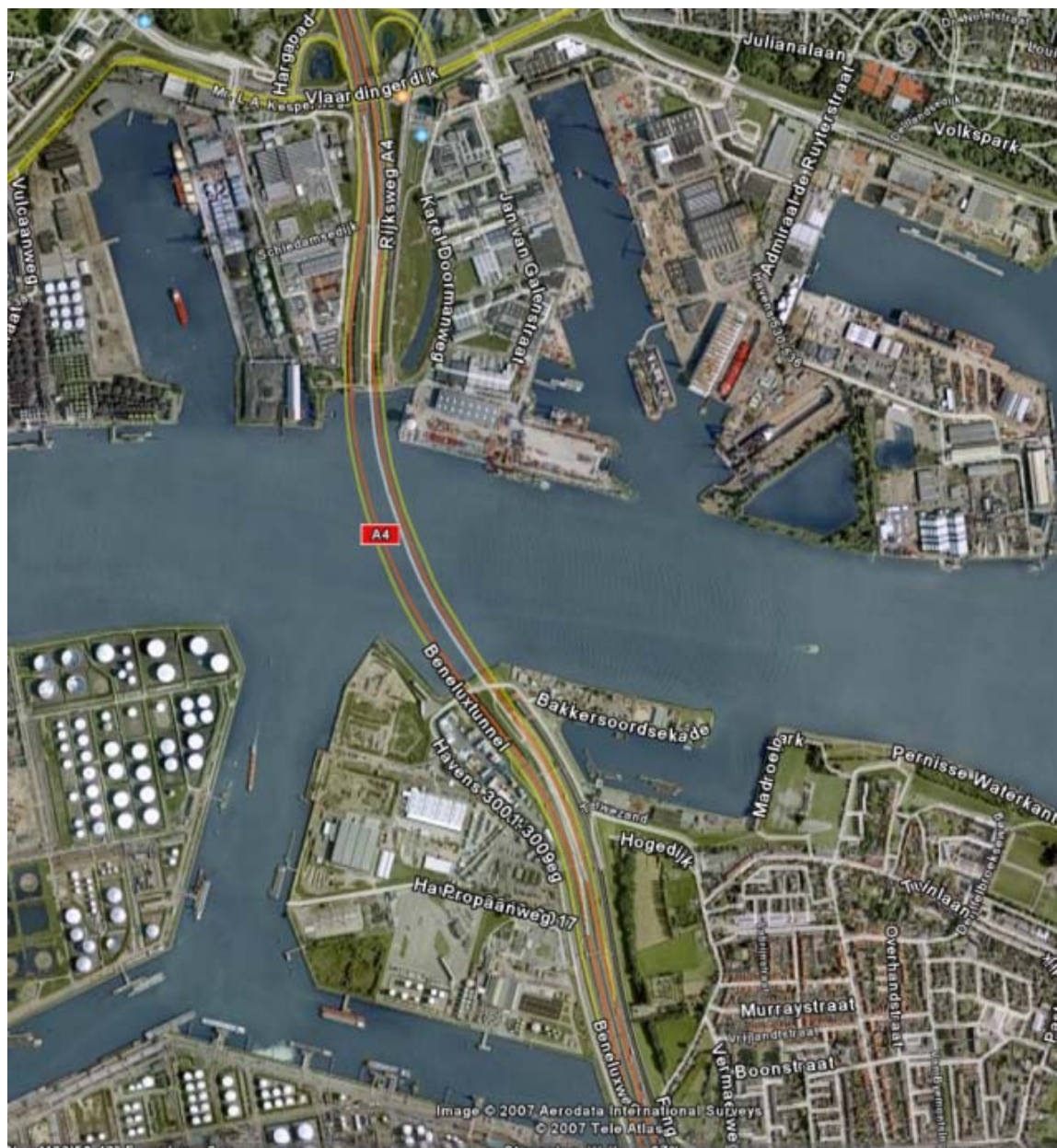
De kosten voor het standby houden van een bergingsvoertuig bij de tunnel bedragen enkele duizenden euro's per dag.

Afhandelingassistentie incidenten

Beschrijving	Bij een ongeval of pechgeval is het zaak dat de weg zo snel mogelijk weer vrij wordt gemaakt. In het geval van lichte incidenten, wordt van de weggebruiker verwacht dat hij/zij eventuele schadeafhandeling op de eerst volgende verzorgingsplaats afhandelt. Om de afhandeling van incidenten zo soepel mogelijk te laten verlopen, kan de informatie en de ondersteuning van de weggebruiker verbeterd worden. De zogenaamde afhandelingassistentie kan bestaan uit: ▪ Informatie via de intercom in de tunnel. ▪ Assistentie door een wegininspecteur.
	
Werkingsprincipe	<i>Verkleinen kans op ongevallen</i> Door het beter begeleiden van de weggebruiker na een incident, wordt de normale verkeerssituatie sneller hersteld en daarmee de kans op secundaire ongevallen wordt verkleind.
Toepasbaarheid	Bij alle configuraties Er is geen direct verband tussen de aanwezigheid van convergentie- of divergentiepunten en deze maatregel.
Risicoverlagend effect	Laag.
Randvoorwaarden	Geen.
Wegbeeld en begripelijkheid	Geen relatie.
Doorstroming	Bij incidenten wordt de vrije doorstroming sneller hersteld: er zal minder vertraging optreden. De winst zal verschillen per tunnel en is onder andere afhankelijk van de intensiteiten en de capaciteit.
Kosten	Kosten < € 100.000,-- De kosten voor deze maatregel zijn laag: alle voorzieningen zijn standaard al aanwezig.

Beschrijvingen Nederlandse tunnels

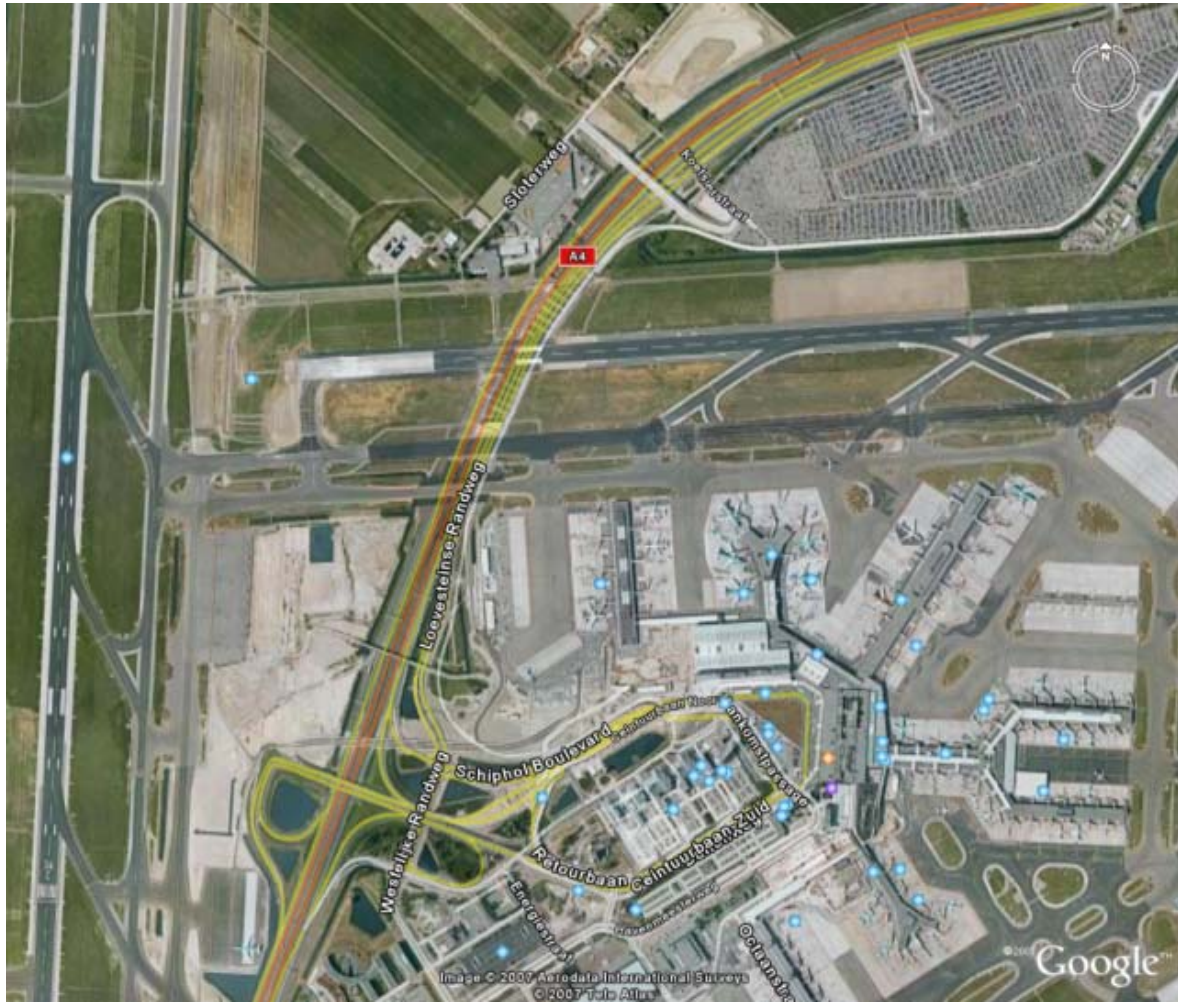
Beneluxtunnel



Botlektunnel**Coentunnel**

Drechtunnel

Heinenoordtunnel*Noordtunnel*

Schipholtunnel*Thomassentunnel*

Velsertunnel/Wijkertunnel

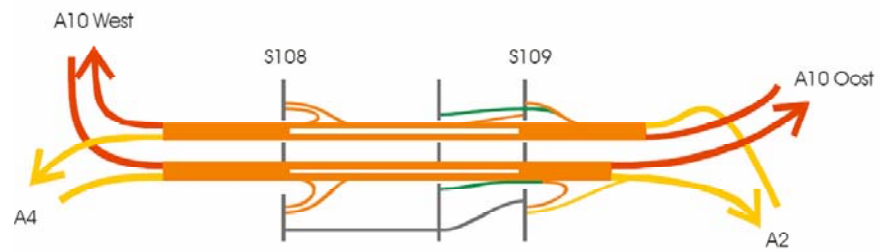


Vlaketunnel*Zeeburgertunnel*

Gaasperdammertunnel



Let op: Aangepast ten behoeve van de leesbaarheid

Tunnel Zuidas***Roertunnel***

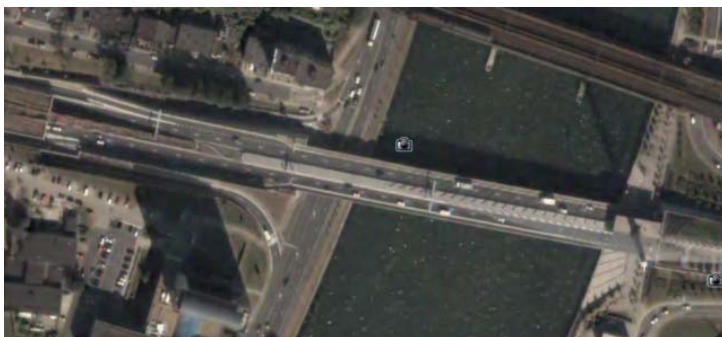
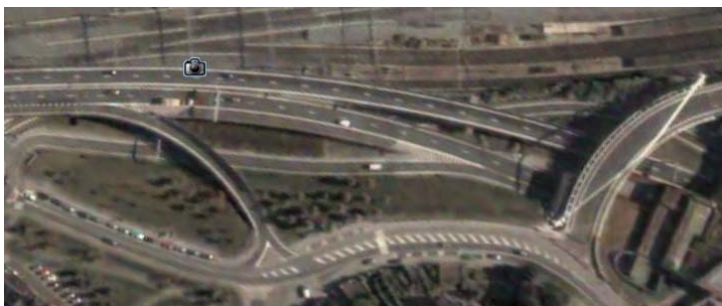
BIJLAGE

3

Beschrijvingen buitenlandse tunnels

Luik

Rondweg E25



Antwerpen

Kennedytunnel (R1)



Craeybeckxtunnel (E19)



Parijs



Stockholm
Södra Länken (7)



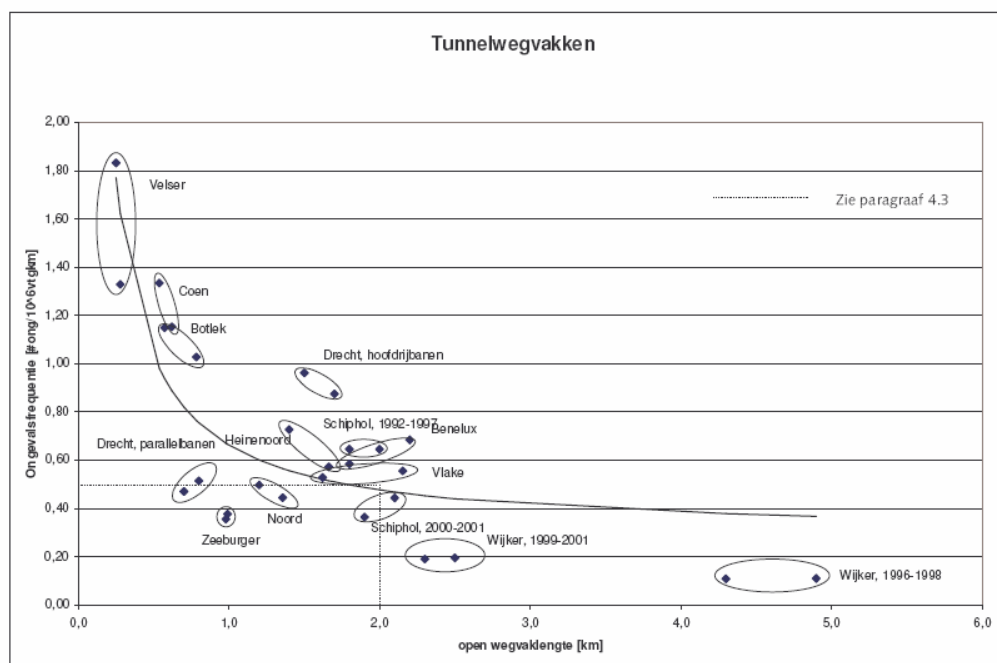
BIJLAGE

4

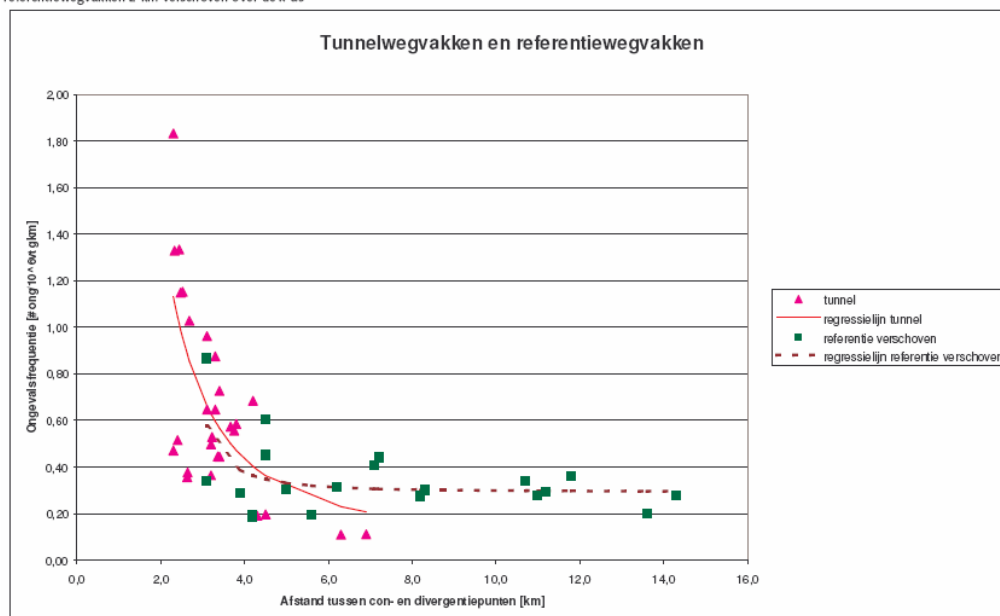
Onderzoeksresultaten ondersteunende studies

“Is in- en uitvoegen bij tunnels veilig?”

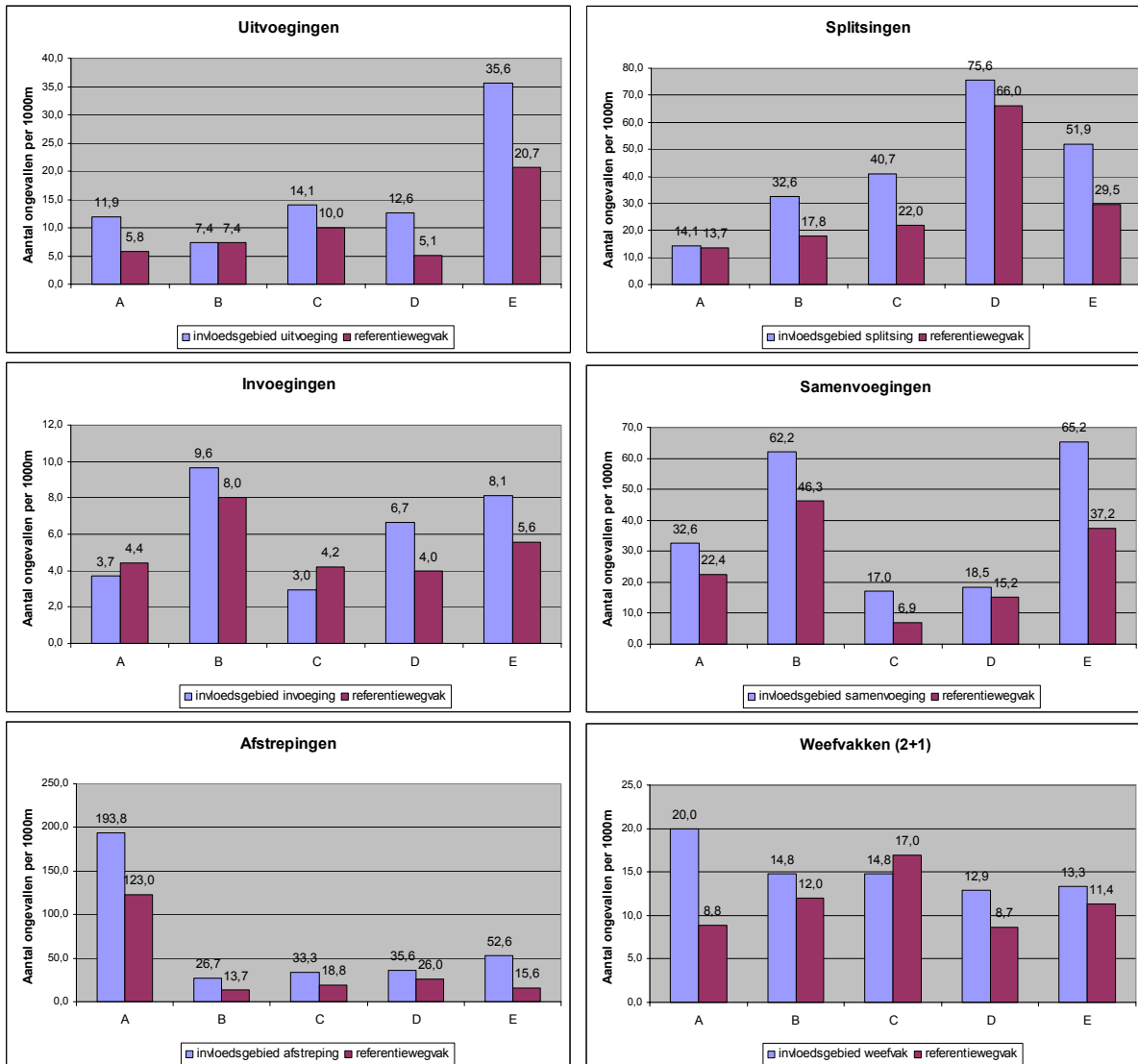
Bijlage 2. Ongevalsfrequenties van de tunnelwegvakken, uitgezet tegen de open wegwadengte



Bijlage 5. Ongevalse frequenties van de tunnelwegvakken en referentiewegvakken, uitgezet tegen de afstand tussen de con- en divergentiepunten. Gegevens referentiewegvakken 2 km verschoven over de x-as



Onderzoek naar de verhouding tussen het aantal ongevallen in het invloedsgebied van het convergentie- of divergentiepunt en het aantal ongevallen op het aangrenzende wegvak (uitgevoerd binnen het kader van dit onderzoek).



BIJLAGE

5 Oogadaptatie

De teksten in deze bijlage zijn overgenomen uit de Aanbeveling 'Verlichting van tunnels en onderdoorgangen' van het NSVV [14].

Wanneer een weggebruiker overdag een tunnel nadert en inrijdt is er eerst een vrij geleidelijke afname van het licht dat het oog van de waarnemer bereikt. Vlak voor en tijdens het binnenrijden van de tunnel is er een vrij plotselinge sterke afname van het lichtniveau.

De ogen van de waarnemer moeten wennen aan het lagere lichtniveau. Wanneer de door het oog waargenomen luminantie verandert, past het visuele systeem zich aan: men noemt dit oogadaptatie.

Als de afname van het lichtniveau te snel is, ziet de waarnemer tijdelijk weinig of niets. De snelheid van lichtafname moet derhalve zijn afgestemd op de gemiddelde oogadaptatie van weggebruikers. Oogadaptatie kost dus tijd. Het is derhalve evident dat naarmate de ontwerpsnelheid groter is, de lichtafname over een langere zone moet geschieden.

De oogadaptatie is tijdsafhankelijk en betreft drie processen:

- Verandering in de pupildiameter.
- Gevoeligheidsaanpassing van de receptoren op het netvlies.
- In- of uitschakeling van receptoren op het netvlies.

De bijdrage van de verandering van de pupildiameter speelt een ondergeschikte rol omdat de grootste aanpassing door de receptoren op het netvlies wordt geleverd. In alle gevallen gaat de aanpassing van laag naar hoog veel sneller dan van hoog naar laag. Voor tunnels betekent dit dat men nauwelijks problemen ervaart bij het verlaten van een tunnel (van laag naar hoog), maar dat de grootste problemen zullen optreden bij het binnenrijden van een tunnel (van hoog naar laag).

Door Schreuder zijn rond 1960 experimenten uitgevoerd teneinde dit fenomeen te beschrijven. Bij de eerste serie experimenten werd de aanvangswaarde L_1 van 8000 cd/m² plotseling verlaagd met een factor tussen 3 en 40. Hieruit werd geconcludeerd dat het voor 75% van de waarnemers acceptabel was wanneer het lichtniveau plotseling met een factor van maximaal 5,5 werd verlaagd.

Ook werd een serie experimenten uitgevoerd waarbij de achtergrondluminantie L_1 plotseling verlaagd werd van 8000 naar 13 cd/m². Daarbij werd aan de waarnemers gevraagd hoeveel tijd zij nodig hadden om het object weer te kunnen onderscheiden. Hieruit bleek dat na 15 seconden 75% van de waarnemers het object weer kon onderscheiden.

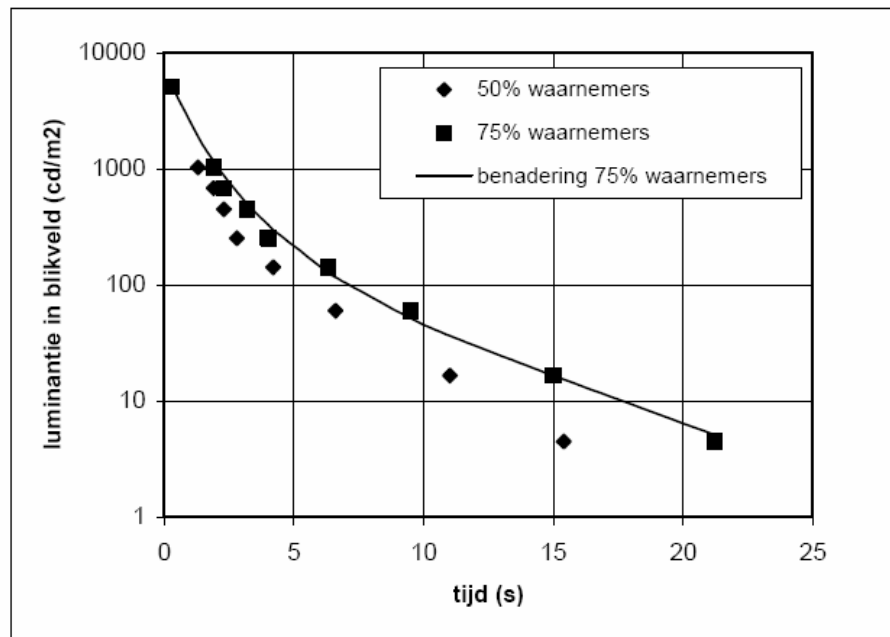
In een volgende serie experimenten waren de waarnemers geadapteerd aan een achtergrond van 8000 cd/m² en werd de luminantie plotseling met een factor 5 verlaagd. Deze factor was gebaseerd op de eerder gevonden maximum factor van 5,5. Nadat het luminantieniveau plotseling was verlaagd konden de waarnemers zelf het luminantieniveau verder verlagen tot circa 4 cd/m². De waarnemers werd gevraagd het luminantieniveau zo snel mogelijk te verlagen, zodanig dat ze het object nog comfortabel konden zien.

Door Schreuder zijn de resultaten vergeleken met experimenten uitgevoerd door Kabayama. In die laatstgenoemde experimenten werden andere aanvangsniveaus voor de achtergrondluminantie gebruikt dan door Schreuder, doch de resultaten bleken onafhankelijk van het aanvangsniveau steeds dezelfde adaptatietijd op te leveren.

De resultaten van Schreuder zijn in figuur 18-14 opgenomen. Hierin is tevens een grafiek van de benaderingsformule voor de resultaten van 75% van de waarnemers weergegeven. Voor de benaderingsformule is hier de volgende vorm voorgesteld:

$$\frac{L(t)}{L(t=0)} = -0,0014 + 0,00033 * \exp^{50/(t+6,3)}$$

De formule geldt voor $t = 1$ s tot $t = 20$ s. In de experimenten van Schreuder zijn waarnemingen tussen circa 1 s en 20 seconden na daling van het lichtniveau gedaan. Voor $t = 0$ worden kleine afwijkingen van de uitgangswaarde gevonden. Dit is echter van ondergeschikt belang. Voor $t = 0$ kan men van de werkelijke uitgangswaarde uitgaan.



Tijdsafhankelijke adaptatie

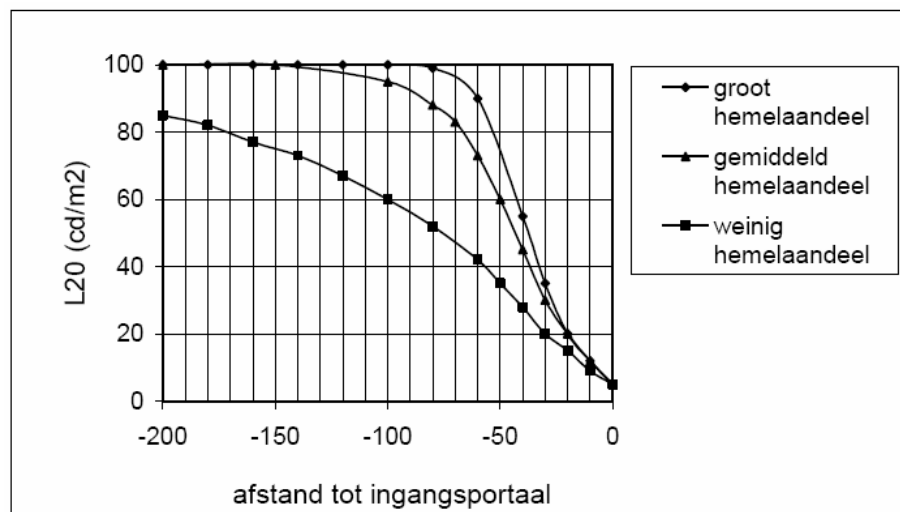
Hierbij wordt opgemerkt dat de formule een benadering is van resultaten van subjectieve waarnemingen. Bij de waarnemingen is gevraagd naar comfortabel waarnemen, niet naar ondergrenzen voor net niet meer kunnen waarnemen. En voorts is uitgegaan van 75% van de waarnemers, hetgeen een redelijke waarde lijkt om te bereiken dat een groot deel van waarnemers voldoende ziet. Genoemde formule is dus een goed bruikbare praktijkformule.

Toepassing van deze formule bij tunnelingenangen doet de vraag rijzen op welke plaats $t = 0$ moet worden gekozen. Hiervoor gelden de volgende overwegingen:

- In de eerste zone van de stopafstand tot aan het tunnelportaal is tijdens het naderen van de tunnel de lichtafname veel langzamer dan door de formule wordt beschreven. Hier speelt oogadaptatie dus geen rol.
- In de laatste tientallen meters voor het ingangsportaal dekt het dak van de auto vrij abrupt de hemel boven het tunnelportaal af. Ook zullen dak en zijstijlen lichte delen rondom het tunnelportaal af schermen. Hierdoor daalt de luminantie binnen het blikveld, opgevat als de L_{20} -waarde vrij snel.
- Hoewel de ogen zich ook al in het eerste deel van de nadering adapteren, kan worden gesteld dat het werkelijke adaptatieproces begint nadat de luminantie in het blikveld plotseling afneemt.
- Bij het binnenrijden van de tunnel neemt de totale hoeveelheid waargenomen licht nog verder af. Dit kan niet als de start van de adaptatiekromme worden gekozen omdat het werkelijke adaptatieproces al even daarvoor is begonnen.

De lichtafname in de ingangzone moet dus ten minste een verloop hebben volgens een kromme waarvan het tijdstip $t = 0$ overeenkomt met een positie waarbij de hoeveelheid waargenomen licht in het blikveld vrij plotseling afneemt.

Uit metingen aan tunnels zowel in Nederland als in het buitenland (uitgevoerd in de jaren 1960 - 1970) blijkt dat de afname van de luminantie L_{20} in het blikveld van de weggebruiker bij benadering kan worden beschreven zoals weergegeven in onderstaande figuur.



Verloop L_{20} bij nadering tunnel

Hieruit blijkt dat bij een gering hemelaandeel er nauwelijks adaptatieproblemen zullen optreden. Bij een groter hemelaandeel in het blikveld op stopafstand voor de tunnel moet wel gelet worden op oogadaptatie. Uit de metingen blijkt dat het proces van oogadaptatie begint op circa 50 m voor de tunnel. Men zou in principe de plaats van $t = 0$ van de grafiek voor oogadaptatie kunnen leggen op 50 m voor de tunnelingang.

In CIE 88 wordt de CIE-kromme gegeven, waarvan het gedeelte in de overgangszone eveneens mede is gebaseerd op oogadaptatie. Voor $t = 0$ is daarbij het einde van de drempelzone en de aanvang van de overgangszone gekozen.

Op basis van de eerder genoemde proeven door Schreuder is in eerste instantie een grafiek samengesteld, waarbij de drempelzone de lengte van de stopafstand heeft en het lichtniveau constant is, en waarbij in de overgangszone het lichtniveau volgens een aannemelijke en getekende grafiek afneemt. De luminantie in de drempelzone werd daarbij gesteld op 10% van de waarde van L_{20} op stopafstand. De grafiek voor de overgangszone werd gebaseerd op de maximaal toelaatbare lichtafname voor 75% van de waarnemers. De aanvang $t = 0$ was gesteld op de aanvang van de overgangszone en het aanvangsniveau was gesteld op het lichtniveau in de drempelzone (10% van de L_{20} -waarde op stopafstand).

Al snel bleek uit de praktijk dat het niet noodzakelijk was het lichtniveau over de hele drempelzone constant te houden. Zonder bezwaar kon aan het einde van de drempelzone het lichtniveau reeds verlaagd worden. Er is toen gekozen voor een oplossing waarbij de drempelzone in twee gelijke delen werd verdeeld: in het tweede deel neemt het lichtniveau af van 100% tot 40% aan het einde van de drempelzone. Ook bleek dat de waarde van 10% van L_{20} voor de drempelzone vrij hoog was. In de loop van de tijd zijn deze waarden verlaagd naar 3 - 6 %. Daardoor sloot de grafiek van de oogadaptatie niet meer goed aan op het verloop van het lichtniveau in de drempelzone, aangezien de grafiek voor oogadaptatie nog steeds op 10% van de L_{20} -waarde begint. Het tijdsverschil tussen het einde van de drempelzone en 40% volgens de empirische adaptatieformule is echter minder dan 0,5 s, hetgeen overeenkomt met circa 10 - 15 m. De grafieken zijn daarom aan elkaar gekoppeld door de adaptatiegrafiek iets te verschuiven, zodanig dat de 40%-waarde van de drempelzone aansloot op een punt in de adaptatiegrafiek.

Vervolgens is de benaderingsformule opgesteld voor het verloop van de CIE-kromme in de overgangszone. In dat gebied wordt de lichtafname dan beschreven door:

$$L_{\text{overgangszone}} / L_{\text{drempelzone}} = 100 \% * (1,9 + t)^{-1,4}$$

Daarbij is voor $L_{\text{drempelzone}}$ niet meer 10% van L_{20} op stopafstand genomen, maar de werkelijke waarde van de luminantie in de drempelzone. Het tijdstip $t = 0$ wordt genomen bij aanvang van de overgangszone.

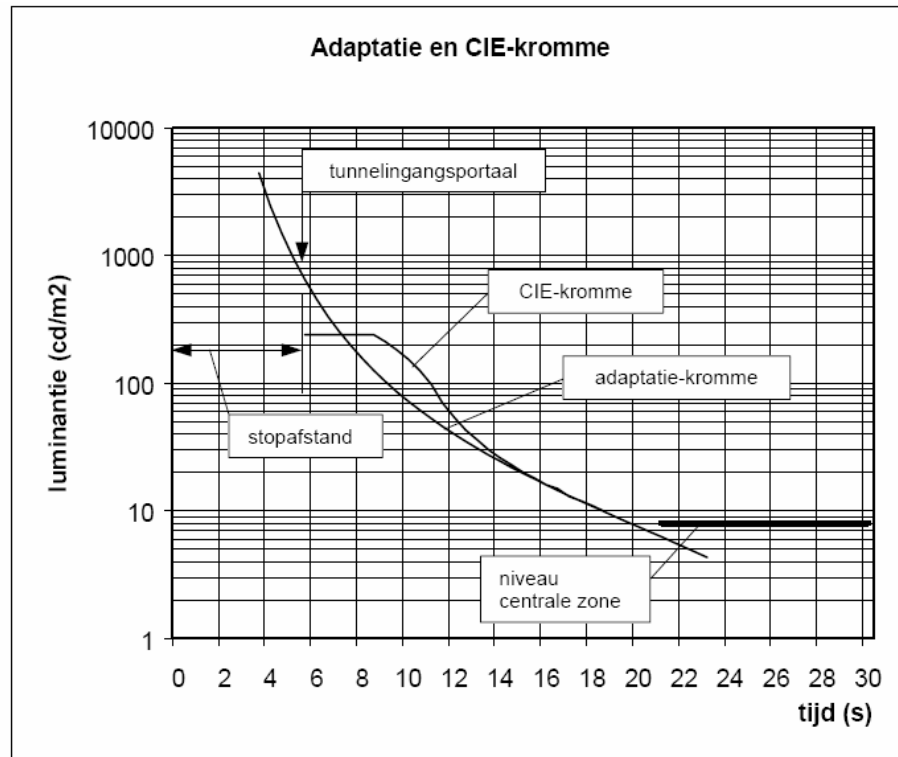
Samenvattend kan dus worden gesteld dat de formule behorend bij de CIE-kromme slechts een benadering is van een via overleg en steeds aan de praktijk aangepaste grafiek. De formule zoals opgenomen in de CIE-kromme wijkt dus af van de door experimenten onderbouwde grafiek zoals opgenomen in figuur 18-13.

De twee benaderingsmethoden worden in het volgende voorbeeld met elkaar vergeleken. Er is uitgegaan van de volgende gegevens:

- Ontwerpsnelheid 100 km/h, waarmee de stopafstand 150 meter is. Deze afstand kan bij 100 km/h in 5,5 s worden afgelegd.
- $L_{20} = 6000 \text{ cd/m}^2$.
- k-factor 0,04, waarmee $L_{\text{drempel}} = 0,04 * L_{20} = 240 \text{ cd/m}^2$.

- Aanvang van oogadaptatie op 50 m van stopafstand voor het ingangsportaal, oftewel op $t = 3,5$ s. Als luminantieniveau is daarbij circa 80% van L_{20} op stopafstand genomen oftewel 4800 cd/m².
- Luminantie in de centrale zone 8 cd/m².

Op basis van deze gegevens kan de grafiek worden samengesteld, zoals opgenomen in onderstaande figuur.



Adaptatie en CIE-kromme

Opgemerkt kan worden dat, voor andere snelheden, andere waarden van L_{20} en kleine variaties in de uitgangspunten voor de adaptatiegrafiek, deze figuur er vrijwel identiek uitziet.

Uit een beschouwing van de grafiek blijkt dat de CIE-kromme in de overgangszone nauwelijks afwijkt van de adaptatiekromme. Aangezien in praktijk de verlichting in de overgangszone meestal in een aantal stappen wordt verlaagd maakt het dus niet veel uit of men de CIE-kromme of de beter gefundeerde adaptatiekromme volgt.

Aangezien bij berekeningen het benodigde lichtniveau bepaald volgens de adaptatiekromme éénduidiger is dan de CIE-kromme, wordt aanbevolen voor het maken van berekeningen de adaptatiekromme te gebruiken. Echter, voor eerste schattingen kan de CIE-kromme goede dienst bewijzen.

Bij de waarnemingen door Schreuder werd geconstateerd dat de meeste waarnemers een plotselinge lichtafname met een factor 5,5 nog net acceptabel vonden. Daaruit kan worden afgeleid dat de maximaal toelaatbare lichtafname een factor 5 mag bedragen. Aan de hand van praktijkervaring houdt men in het algemeen een factor 3 aan.

BIJLAGE

6 Literatuurlijst

1. *Verkeersveiligheid van tunnels in autosnelwegen*
SWOV-factsheet, Leidschendam, november 2006.
2. *Richtlijnen voor het ontwerpen van autosnelwegen (ROA)*
Rijkswaterstaat, Adviesdienst Verkeer en Vervoer, Hoofdstuk IV Knooppunten en aansluitingen, Rotterdam, maart 1993.
3. *Verkeersafwikkeling bij discontinuïteiten*
H. Schuurman en R. Vermijs, TU Delft, Faculteit der Civiele Techniek, Vakgroep Infrastructuur, i.o.v. Rijkswaterstaat Adviesdienst Verkeer en Vervoer, juni 1993.
4. *Richtlijnen voor het ontwerpen van autosnelwegen (ROA)*
Rijkswaterstaat, Adviesdienst Verkeer en Vervoer, Hoofdstuk I Basiscriteria, Rotterdam, november 1992.
5. *Nieuwe Ontwerprichtlijn Autosnelwegen*
Nieuwe Ontwerprichtlijn Autosnelwegen, Rijkswaterstaat Adviesdienst Verkeer en Vervoer, versie 1 januari 2007.
6. *European Agreement on Main International Traffic Arteries (AGR)*
United Nations, Economic and Social Council, Economic Commission for Europe, Working Party on Road Transport, GE.02.21331, 5 april 2002.
7. *Specifieke Aspecten Tunnel Ontwerp (SATO)*
Bouwdienst Rijkswaterstaat, versie 2005.
8. *Wet Aanvullende Regels Veiligheid Wegtunnels (WARVW)*
Staatsblad 2006 134, 2 februari 2006.
9. *Besluit Aanvullende Regels Veiligheid Wegtunnels*
Staatsblad 2006 248, 11 mei 2006.
10. *Richtlijn 2004/54/EG van het Europees Parlement en de Raad van 29 april 2004 inzake minimumveiligheidseisen voor tunnels in het trans-Europese wegennet*
Publicatieblad van de Europese Unie L 167 van 20 april 2004.
11. *Safety Dossier Objectives*
Centre d'Etudes des Tunnels, Ministry of Infrastructures, Transport, Housing, Tourism, the Sea, Republique Francaise, maart 2003.
12. *Is in- en uitvoegen bij tunnels veilig? Een verkeersveiligheidsonderzoek naar de ligging van in- en uitvoegstroken nabij tunnels.*
M.D. van den Bos, Bouwdienst Rijkswaterstaat, afdeling Wegontwerp, 12 januari 2004.

13. *VRC-Bijlagen, basismaatregelen*
Steunpunt Tunnelveiligheid, Bouwdienst Rijkswaterstaat, versie 1.0, januari 2004.
14. *Aanbeveling Verlichting van tunnels en onderdoorgangen*
NSVV Werkgroep Tunnelverlichting, i.o.v. Commissie Openbare Verlichting, januari 2003.
15. *Nederlandse aanbeveling tunnelverlichting 2003, het ontwerp van ingangsverlichting met de contrastmethode*
J.W. Huijben, Bouwdienst Rijkswaterstaat, 2004.
16. *Sicherheitsvergleich von Tunnels, Verkehrssicherheitsvergleich von Tunnels mit Gegenverkehr und Tunnels mit Richtungsverkehr mit anderen Strassenarten*
K. Robatsch, C. Nussbaumer, Kuratorium für Verkehrssicherheit, i.o.v. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Oostenrijk, april 2005.
17. *Effects of emergency lanes and exits and entries in tunnels on driving behaviour: driving simulator studies*
M.H. Martens en N.A. Kaptein, TNO Human Factors Research Institute, onderzoek in kader van het Europese SAFESTAR-project, 5 oktober 1998.
18. *Effects of tunnel design characteristics on driving behaviour and traffic safety: a literature review*
M.H. Martens en N.A. Kaptein, TNO Human Factors Research Institute, onderzoek in kader van het Europese SAFESTAR-project, 25 september 1998.
19. *Guidelines and standards for tunnels on motorways*
M.H. Martens en N.A. Kaptein, TNO Human Factors Research Institute, onderzoek in kader van het Europese SAFESTAR-project, 25 september 1998.
20. *Files in tunnels, maatregelen ter verlaging van het risico bij files in tunnels*
P. Broeren en M. van den Bos, Bouwdienst Rijkswaterstaat, Afdeling Wegontwerp, i.o.v. Steunpunt Tunnelveiligheid, 2 maart 2005.
21. *Leidraads scenarioanalyse ongevallen in tunnels, deel 1 Wegtunnels*
COB en Bouwdienst Rijkswaterstaat, mei 2004.
22. *De relatie tussen snelheid en ongevallen*
SWOV-factsheet, Leidschendam, januari 2007.
23. *Files in tunnels, maatregelen ter verlaging van het risico bij files in tunnels*
P.T.W. Broeren, M.D. van den Bos, Bouwdienst Rijkswaterstaat, i.o.v. Steunpunt Tunnelveiligheid, 2 maart 2005.
24. *Effecten en kosten van verkeersveiligheidsmaatregelen*
Grontmij, i.o.v. Adviesdienst Verkeer en Vervoer (AVV), 1 december 2002.
25. *Effecten en kosten van bereikbaarheidsmaatregelen*
Goudappel Coffeng en ARCADIS, i.o.v. Adviesdienst Verkeer en Vervoer (AVV), 31 oktober 2002.

COLOFON

WEGONTWERP IN TUNNELS

CONVERGENTIE- EN DIVERGENTIEPUNTEN IN EN NABIJ
TUNNELS**OPDRACHTGEVER:**

RIJKSWATERSTAAT BOUWDIENST
STEUNPUNT TUNNELVEILIGHEID

STATUS:

Vrijgegeven

AUTEUR:

ir. P.T.W. Broeren

ARCADIS Nederland BV

GECONTROLEERD DOOR:

ir. C.J.L. Cluitmans

ARCADIS Nederland BV, Teammanager
Team Regionale en Stedelijke
Bereikbaarheid

GEACCORDEERD:

drs. ing. M.B.A.G. Raessen

ARCADIS Nederland BV, Hoofd
Adviesgroep Strategie en Beleid

VRIJGEGEVEN DOOR:

R. Mante

Hoofd Steunpunt Tunnelveiligheid

WERKGROEP:

H. Hennink	Rijkswaterstaat Bouwdienst
J. Hoeksma	Rijkswaterstaat Bouwdienst
B. van den Horn	Rijkswaterstaat Bouwdienst
W. Jansen	Rijkswaterstaat Bouwdienst
H. Kwint	Rijkswaterstaat Dienst Verkeer en Scheepvaart
P. Noomen	Rijkswaterstaat Bouwdienst

Versie 1.1

Informatie:

e-mail: sttv@rws.nl

internet: www.tunnelsafety.nl

©ARCADIS. Alle rechten voorbehouden. Behoudens uitzonderingen door de wet gesteld, mag zonder schriftelijke toestemming van de rechthebbenden niets uit dit document worden verveelvoudigd en/of openbaar worden gemaakt door middel van druk, fotokopie, digitale reproductie of anderszins.