

CTB1420 Transport & Planning

Geometrisch ontwerp - alignementen

Paul Wiggeraad, Transport & Planning

30-5-2017

Agenda presentatie

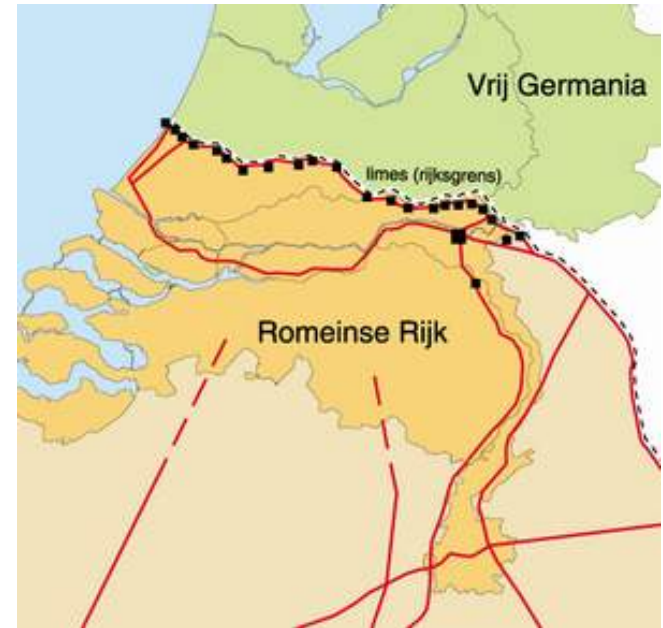
- Historie wegen
- Dwarsprofiel 3.1
- Horizontaal alignement 2.3 + 3.2-3
- Verticaal alignement 2.3 + 3.4-5
- Intensiteit en capaciteit 2.4

1.

Historie wegen

Historie wegontwerp

Romeinen 80.000 km verharde wegen



Napoleon-wegen

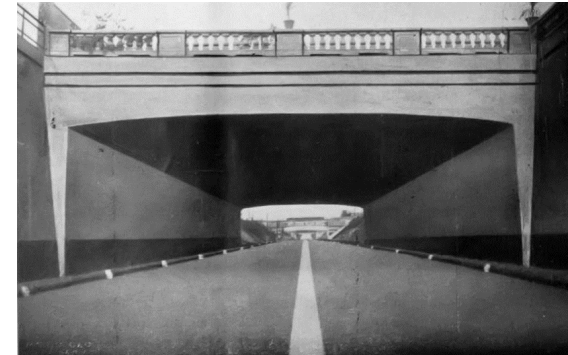
- Rechte wegen
- Enkelbaans
- Door bomen omzoomd



autostrade-Autobahnen-autosnelwegen

Eén rijbaan

- 1913 Lincoln highway NY-SF
- 1924 Milaan-Varese (Mussolini)
- 1929 Keulen-Bonn (Adenauer)
- 1933 Den Haag-Rotterdam



Twee rijbanen

- 1921/1940 AVUS Berlijn
- 1935 Frankfurt-Darmstadt (Hitler)
- 1937 Voorburg-Zoetermeer voor het eerst vluchtstroken

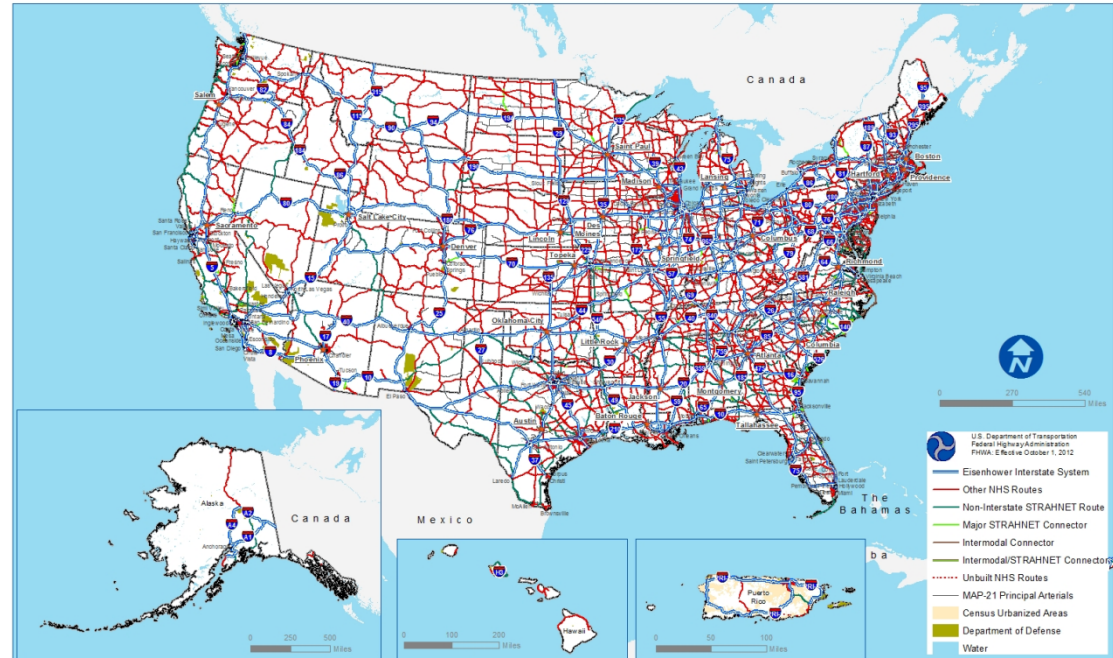


Interstate Highways VS

- VS 77.000 km (NL 2.500 km)
- oost-west even nummers
- noord-zuid oneven nummers

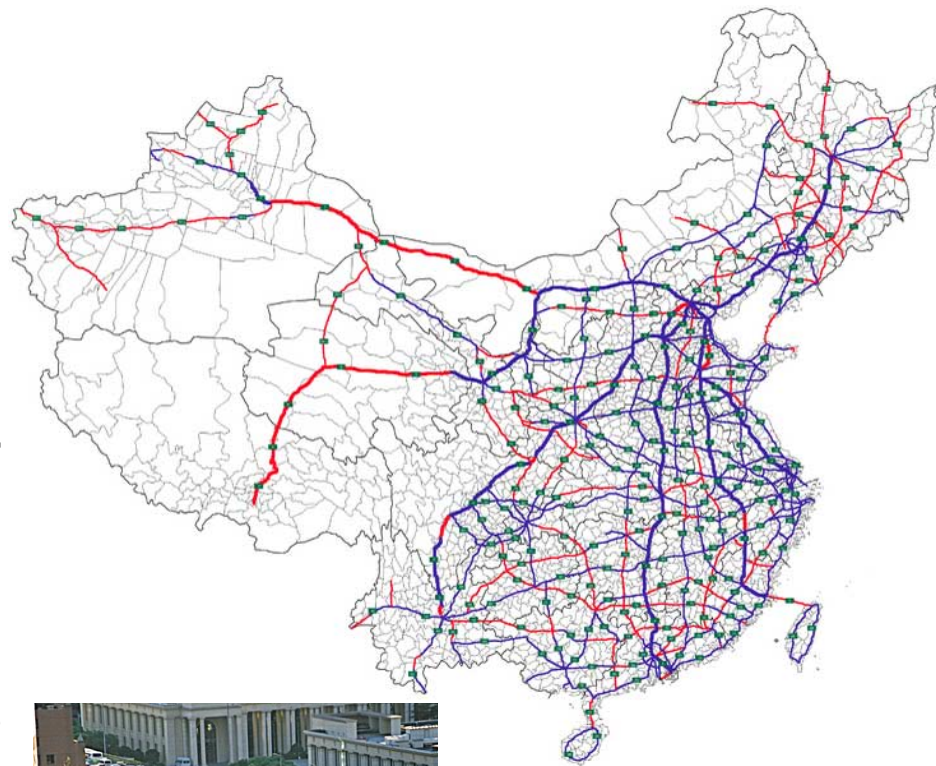


National Highway System



China expressways

- 123.000 km (2016)
- verreweg grootste netwerk ter wereld
- gebouwd sinds 1988
(stand 1999: 10.000 km,
gebouwd in 2015: 11.000 km)
- 7 radiaal uit Beijing
9 expressways noord-zuid
18 expressways oost-west
- allemaal tolwegen

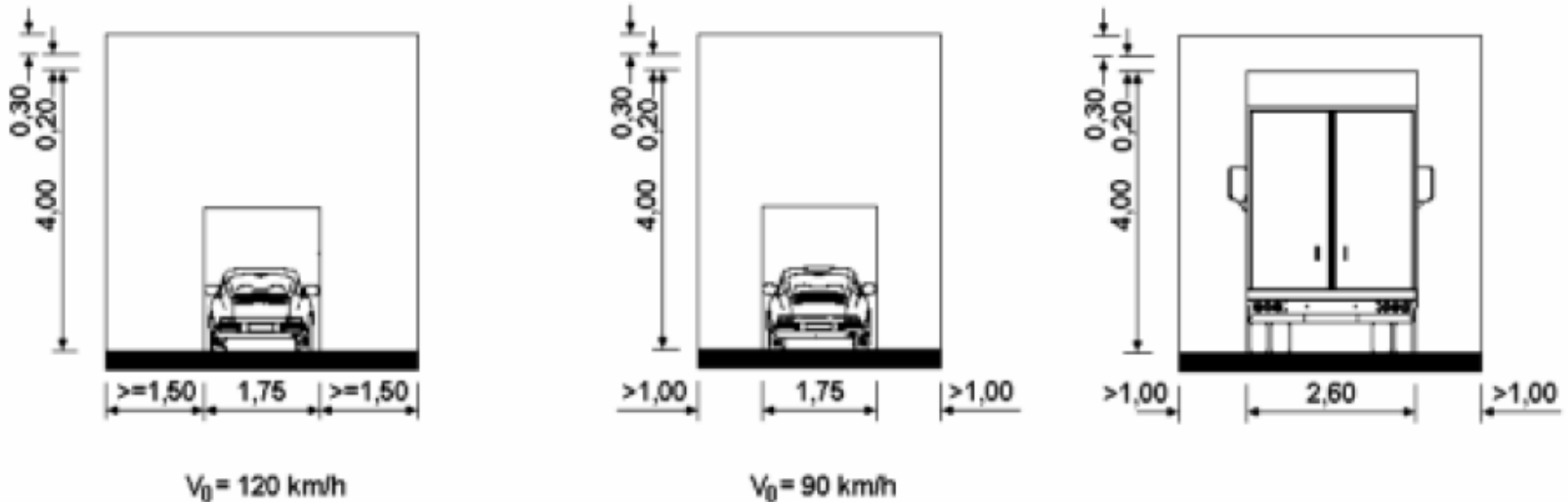


2.

Dwarsprofiel

Profiel van vrije ruimte

breedte ontwerpvoertuig + objectafstandsmarge
wettelijke maximum-hoogte + vering + plafondvrees + extra asfaltlaag
= 4,60 m



Dwarsprofiel autosnelweg

A: zijberm

B: ventweg

C: tussenberm

D/J: vluchtstrook/spitsstrook,
uitvoegstrook/invoegstrook

E: rijstrook

F: plusstrook

D+E+E+F+G: rijbaan

G: redresseerstrook

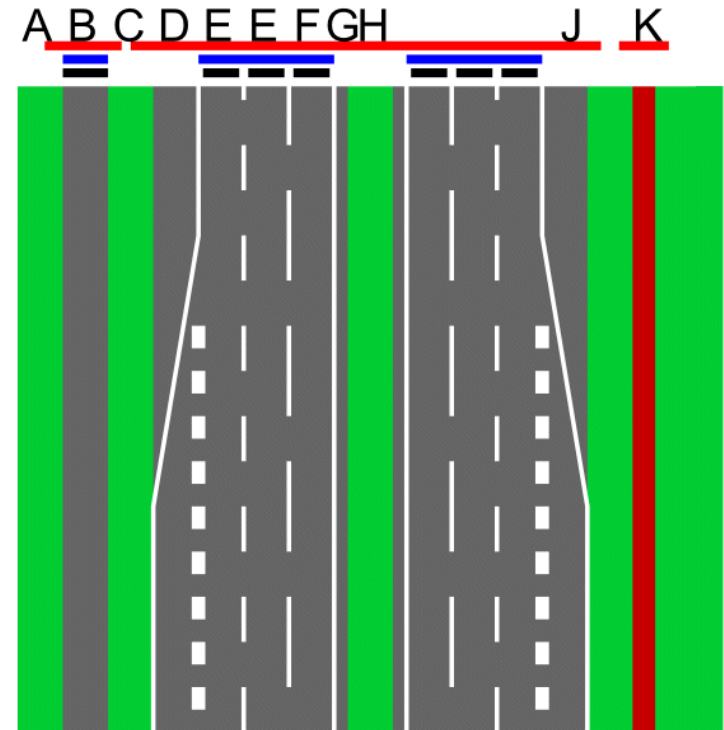
H: middenberm

K: fietspad

obstakelvrije zone

verkanting (afschot) 2,5% (afvoer
regenwater)

B, C en K geen onderdeel autosnelweg



3.

Horizontaal alignement

Horizontaal alignement

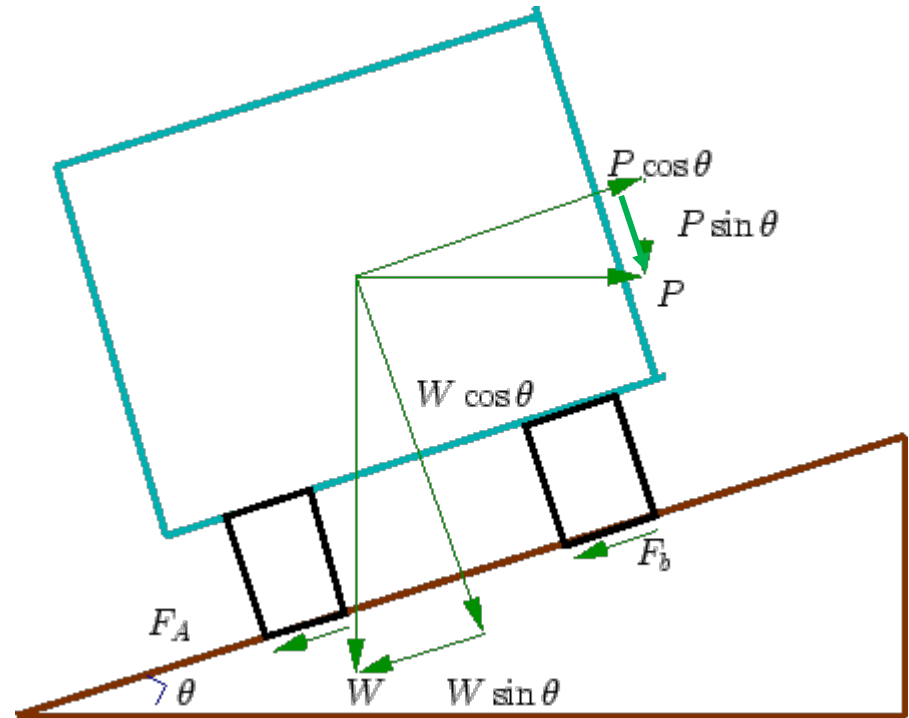
- Rechtstanden
 - weg aaneenschakeling van grote bogen i.p.v. lange rechtstand
- Bochten
 - dimensioneren op
 - voorkomen slippen en kantelen/scharen
 - comfort
 - bepaling boogstralen in samenhang met snelheid en verkanting
 - bochtverbreding
- Overgangsbogen

Verkanting

In de bocht treedt
middelpuntvliedende kracht op:

$$P = mv^2/R$$

Verkanting toepassen om de
dwarsversnelling te verkleinen



Slip criterium:

$$F_b = W f_z > P \cos \theta - W \sin \theta$$

$$\cos \theta \approx 1, \sin \theta \approx p/100$$

$$P - W p/100 - W f_z < 0$$

$$v^2 / R - g (p/100 + f_z) < 0$$

$$R > v^2 / g (p/100 + f_z)$$

p : verkanting [%]

f_z : weerstandscoëfficiënt [-]

Slip criterium

$$R_h \geq \frac{\left(\frac{V_o}{3,6}\right)^2}{\left(fz + \frac{p}{100}\right)g}$$

Slipcriterium

$$R_h \geq \frac{\left(\frac{V_o}{3,6}\right)^2}{\left(fz + \frac{p}{100}\right)g} = \frac{V_o^2}{127\left(fz + \frac{p}{100}\right)}$$

$fz = 0,10$ bij $v = 120$ km/h

$fz = 0,18$ bij $v = 50$ km/h

$$7 * 127 fz = 210 - v$$

$$[7*127*0,1 = 90, 7*127*0,18 = 160]$$

$$7 * 127/100 = 9$$

$$R \geq \frac{7 v^2}{210 - v + 9 p}$$

Let op: R in [m], v in [km/h] en
 p in [%]

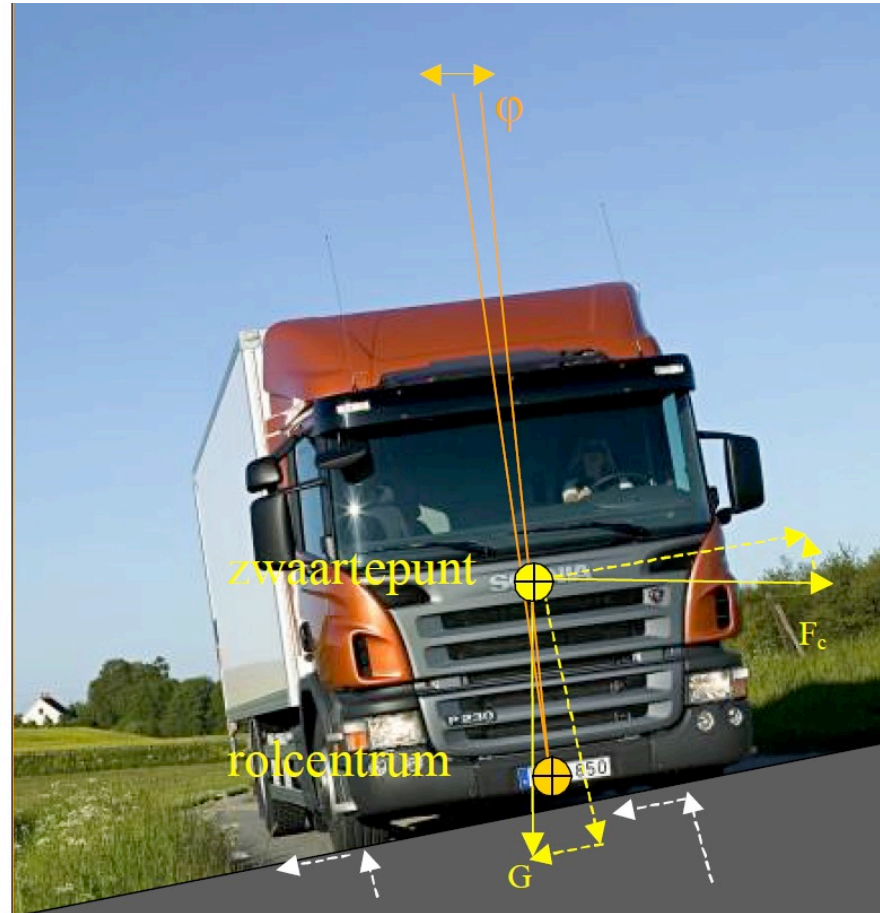
Bij tegenverkanting p negatief

Kantelen

rolmoment

Kantelrisico groter bij:

- Hoog zwaartepunt (volle belading)
- Hoge snelheid door de bocht
- Plotseling uitwijken
- Gelede voertuigen
- Groot aangrijpingsvlak voor dwarswind

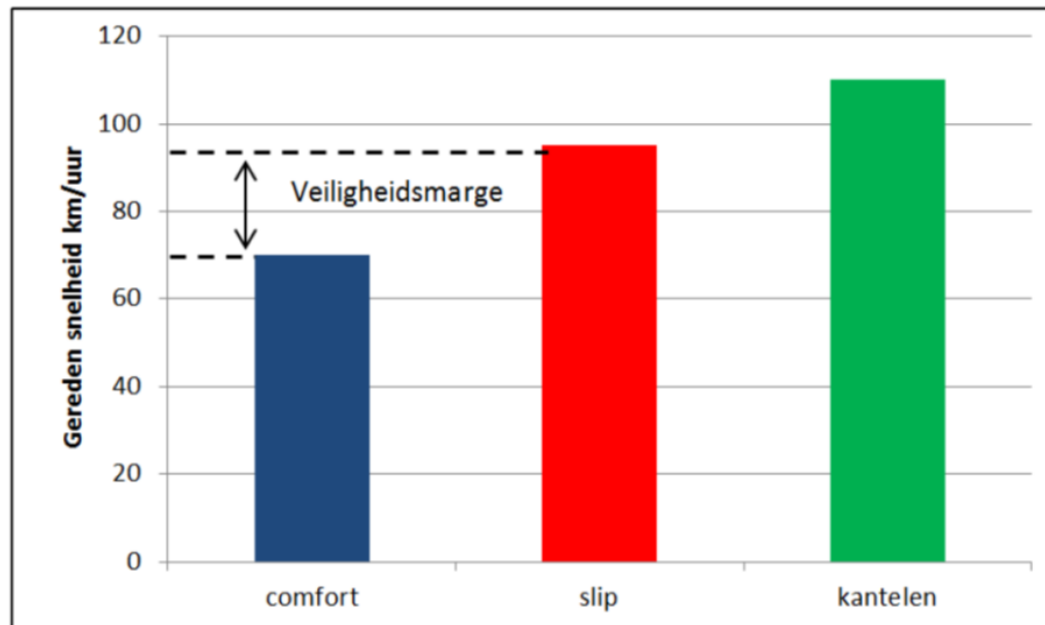


Figuur 9 - Kantelmechanisme vrachtwagen

Scharen



Comfort, slip en kantelen



Figuur 3 – Gereden snelheden waarbij de grenswaarden van de criteria optreden (fictieve waarden) Bron: Broeren et al, CVS 2013

Bocht zonder verkanting

In feite behoudt de weg zijn dakprofiel (verkanting 2,5%) en wordt dus in de buitenboog tegenverkanting toegepast

- bij $v = 90$ km/h en $p = -2,5$:
- slipcriterium $R > 600$ m
- dwarsversnelling $a = v^2 / R = 1$ m/s²

$$R \geq \frac{7 v^2}{210 - v + 9 p}$$

acceptabel 2 m/s²

Rekenvoorbeeld 1

- ontwerpsnelheid 50 km/h
- boogstraal 85 m

- dwarsversnelling?

$(50/3,6)^2 / 85 = 2,3 \text{ m/s}^2$ grote waarde + slipgevaar

- welke verkanting minimaal?

sliprisico: $85 \geq 7 \cdot 50^2 / (210 - 50 + 9p)$

$$R \geq \frac{7 v^2}{210 - v + 9 p}$$

$p \geq 5\%$

- dwarsversnelling?

$2,3 - 0,05 \cdot 9,81 = 1,8 \text{ m/s}^2$ acceptabel + bij 5% geen slipgevaar

Overgangsboog tussen rechtstand en bocht

- Comfortabel bocht insturen
- Opbouwen dwarsversnelling v^2 / r
- Opbouwen verkanting
- Opbouwen bochtverbreding
- Lineaire toename dwarsversnelling van 0 tot (v^2 / R) bij constante v :

$1 / r = cx$, dus $rx = 1 / c$ is constant, met als $r = R$, dan $x = L$

R : straal boog [m] en L : lengte overgangsboog [m]

- dus $rx = RL = \text{constant} = A^2$ A : parameter [m]
- Dat is de formule van een dubbelspiraal (centraal symmetrische)

Vorm overgangsboog: dubbelspiraal ofwel clothoïde

$$A^2 = R L$$

A: parameter van de clothoïde [m]
gegeven R, kies A, L resulteert

optische eis:

$R/3 < A < R$ (voldoende draaiing en boog
zichtbaar)

comforteis:

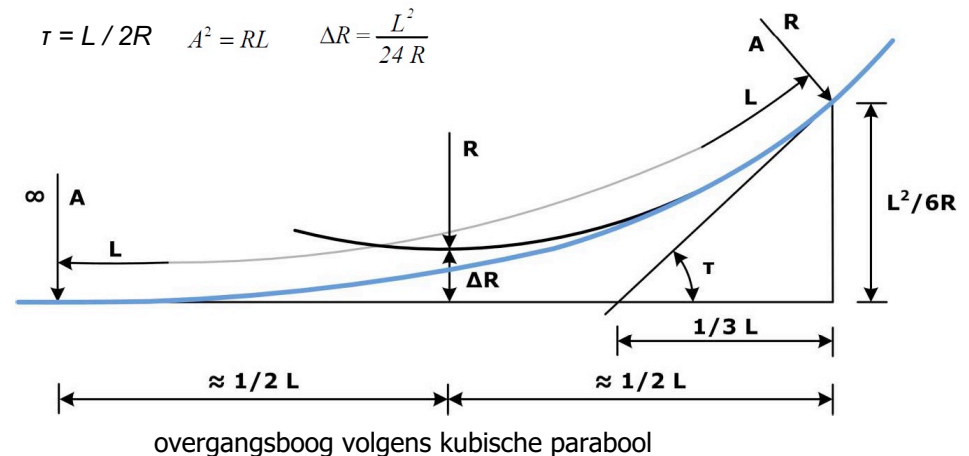
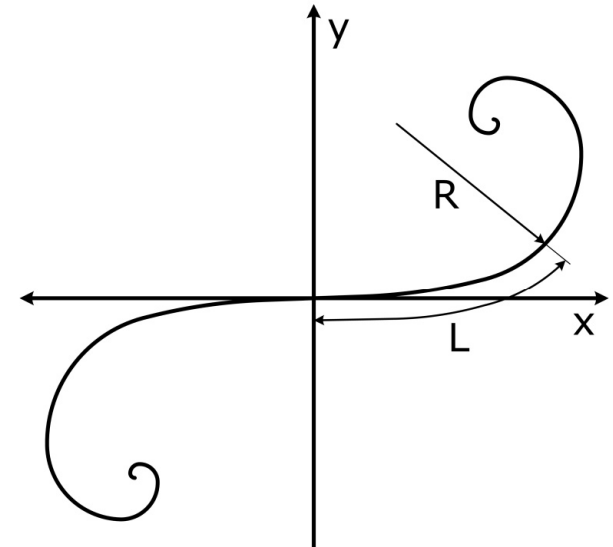
toename dwarsversnelling
(ruk) niet te groot

$c = f(v) < 0,5$ of $< 0,8 \text{ m/s}^3$

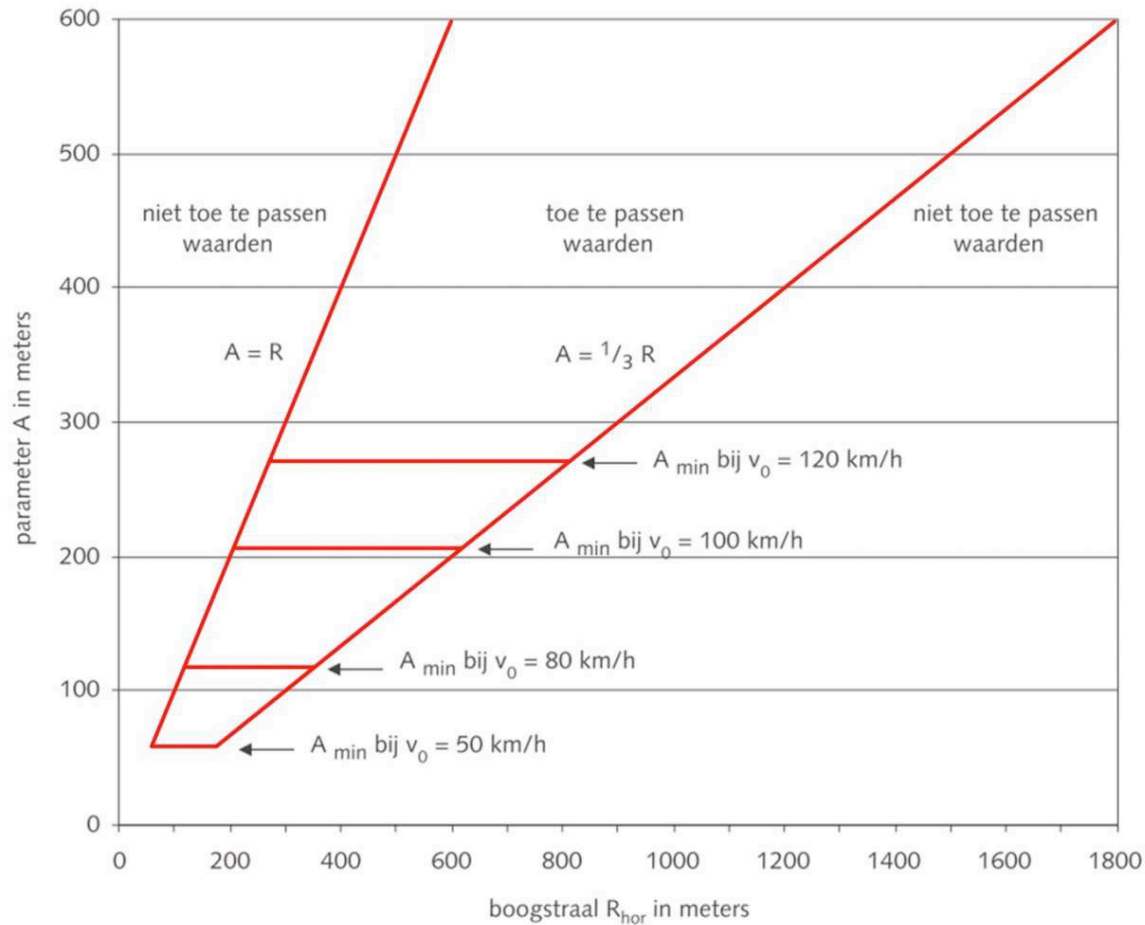
shift en hoekverdraaiing

ΔR : shift [m]

τ : hoekverdraaiing [rad]



Parameterwaarde A van de clothoïde



Rekenvoorbeeld 2

$$A^2 = RL$$

$$T = L / 2R$$

- hoek 45 °
- boogstraal 250 m
- overgangsbogen L = 80 m

- lengte bocht zonder overgangsbogen: $45/360 \cdot 2\pi \cdot 250 = 196$ m
- hoekverdraaiing: $L / 2R = 80/500 = 0,16$ rad = 9,2 °
- voor de bocht resteert: $45 - 2 \times 9,2 = 26,6$ °
- lengte bocht met overgangsbogen: $26,6/360 \cdot 2\pi \cdot 250 + 2 \times 80 = 276$ m
- dat is $276 - 196 = 80$ m langer

- NB parameterwaarde $A = \sqrt{(250 \times 80)} = 141,4$ m
voldoet aan eisen voor $v \leq 80$ km/h

Rekenvoorbeeld 3

$$A^2 = RL$$

$$\tau = L / 2R$$

- hoek $18^\circ = 0,31$ rad
- boogstraal 200 m
- $V_{\text{ontw}} = 50$ km/h

- parameter clothoïde $A_{\text{max}} = 200$ m
- lengte overgangsboog $L = 200^2 / 200 = 200$ m
- hoekverdraaiing $\tau = L / 2R = 0,5$ rad, groter dan de hoek

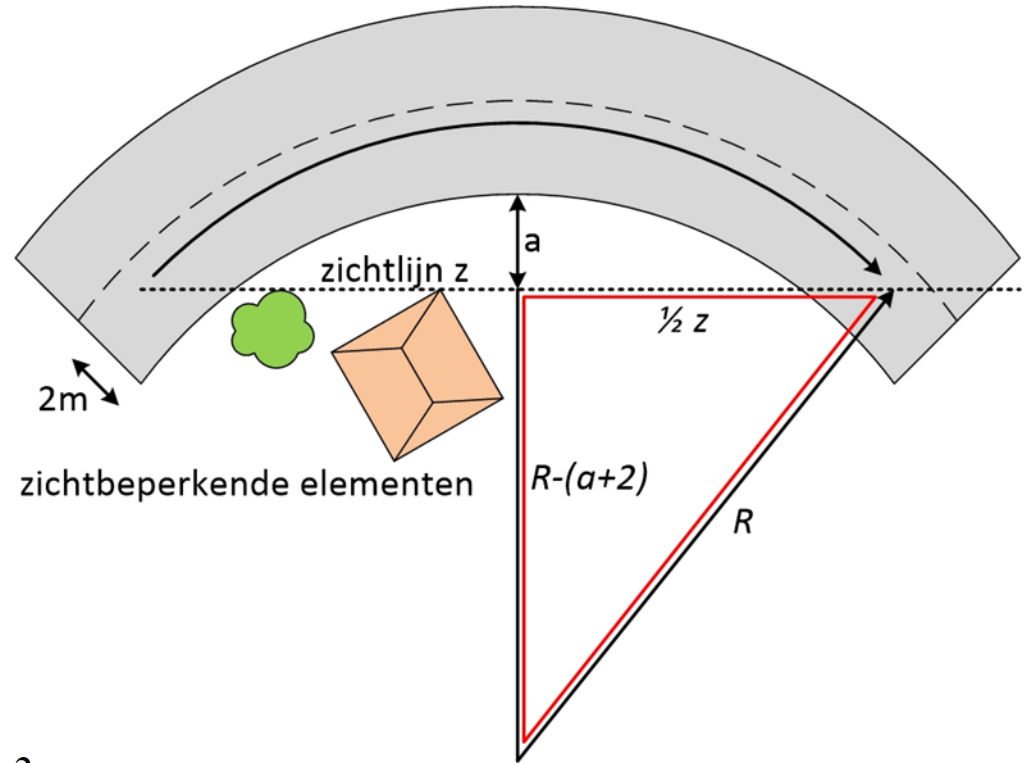
- parameter clothoïde $A_{\text{min}} = 200 / 3 = 67$ m (comforteis $A > 60$ m)
- lengte overgangsboog $L = 67^2 / 200 = 22,5$ m
- hoekverdraaiing $\tau = L / 2R = 0,056$ rad
- voor de bocht resteert: $0,31 - 2 \times 0,056 = 0,20$ rad
- lengte bocht: $0,20 \times 200 = 40$ m $\approx 2,9$ s bij 50 km/h, iets minder dan de gewenste 3 rijseconden

Zichtafstanden

Snelheid	Perceptie-reactietijd en -weg		Remtijd en -weg		Totale stopzichtafstand
	v_{ontw} [km/h]	[s]	[m]	[s]	
120	2,5	83	11	177	260
100	2.25	63	8	107	170
80	2	44	6	61	105
50	1,5	20	3	20	40

- wegverloopzicht: loopt de weg rechtdoor of komt er een bocht?
- stopzicht: staat er een auto stil (file)?
- uitwijkzicht: ligt er iets op het wegdek?
- inhaalzicht: komt er een tegenligger aan?

Horizontale bocht



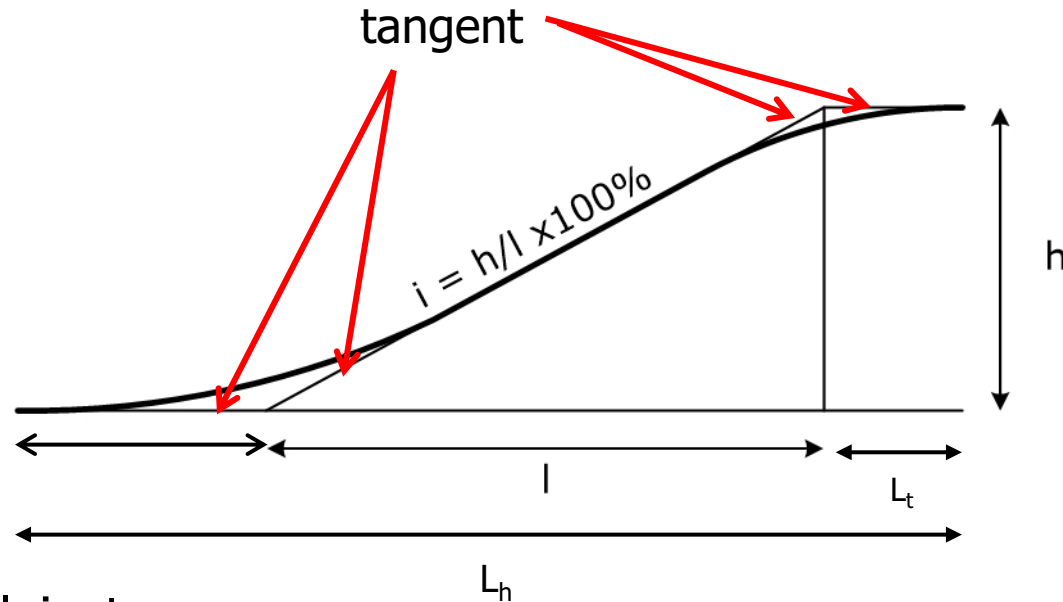
$$R_h = \frac{z^2}{8(a + 2)}$$

4.

Verticaal alignement

Verticaal alignement

helling bestaat uit topboog, rechte helling en voetboog



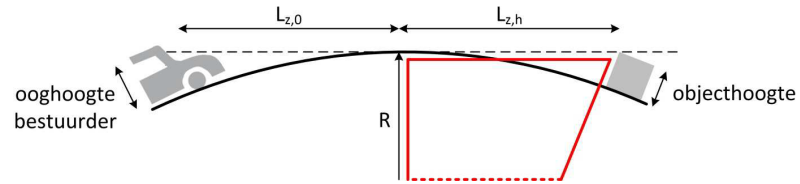
lengte helling kleinst zonder rechte helling

Dus die toepassen, tenzij helling in raakpunt te steil is

lengte tangent $L_t = iR/2$

mits i klein!

Topboog (bolle boog)



maatgevend voor bepaling straal
topboog is beschikbare zichtlengte L_z
vanaf de bestuurdersstoel

- wegverloopzicht
- stopzicht
- uitwijkzicht
- inhaalzicht

hoogte boven wegdek

- 1,1 m
- 0 cm (belijning)
- 50 cm (remlicht)
- 20 cm (pakje op wegdek)
- 1,1 m (ogen tegenligger)

topboog:

$$R_{\text{vmin}} = \frac{L_z^2}{2(\sqrt{h_0} + \sqrt{h_h})^2}$$

Voetboog (holle boog)

maatgevend voor bepaling straal voetboog is het visuele effect (esthetica genoemd): je ziet anders een knik in het wegbeeld

secundair: rijcomfort (toelaatbare verticale versnelling $a = v^2 / R$ met $a \leq 1 \text{ m/s}^2$)

Let op:

Bij tunnel is de voetboog wellicht niet zichtbaar.

Dan geldt niet de esthetica, maar de zichtlengte vanaf de bestuurdersstoel van een vrachtauto (2,5 m)!

Lengte helling

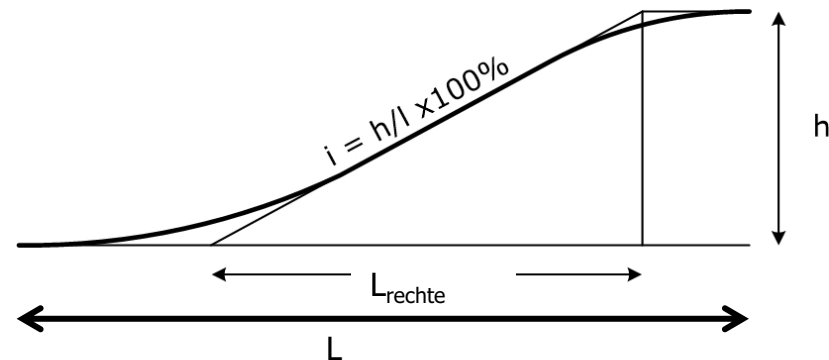
Voetboog gaat direct over in topboog:

$$L = \sqrt{2H \Sigma R} \quad (\text{geeft kortste helling})$$

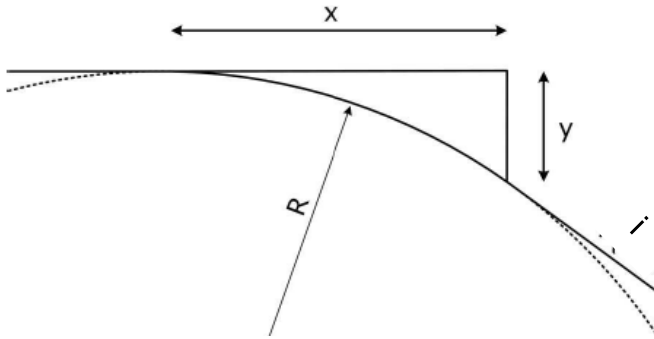
$$i = \frac{H}{\frac{1}{2}L} = \frac{2H}{L} \quad (\text{controle of helling in raakpunt niet te steil is})$$

Rechte helling tussen voetboog en topboog:

$$L = L_{\text{voet}} + L_{\text{top}} + L_{\text{rechte}} = \frac{i \Sigma R}{2} + \frac{H}{i}$$



Topboog tussen opgaande en neergaande helling



$$y = \frac{x^2}{2R}$$

parabool
i.p.v. cirkel

$$i = x / R$$

i [-]

Rekenvoorbeeld 4

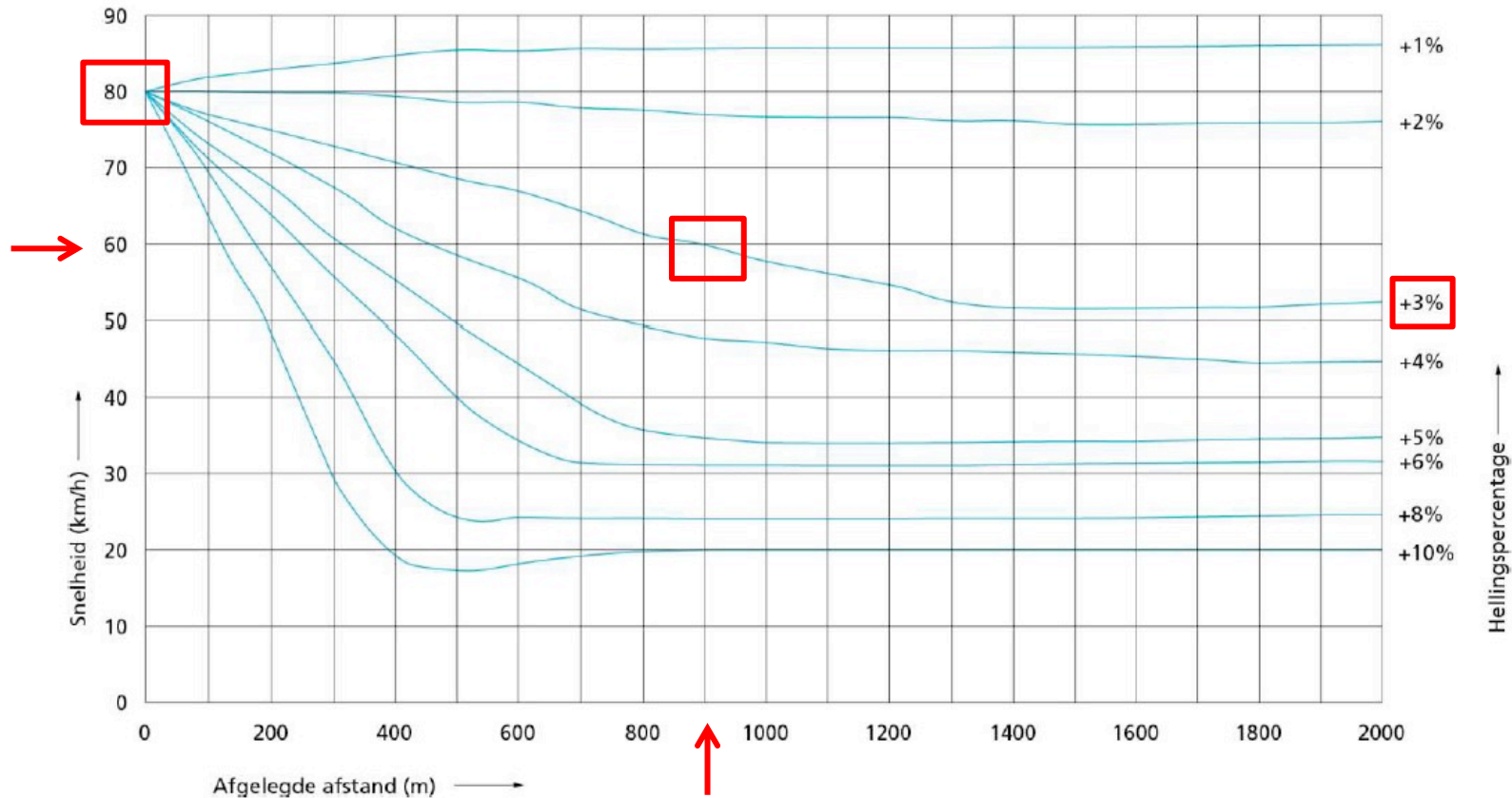
$$R_{vmin} = \frac{L_z^2}{2(\sqrt{h_0} + \sqrt{h_h})^2}$$

$$y = \frac{x^2}{2R}$$

- enkelbaansweg
- $v_{ontw} = 100$ km/h
- opgaande helling 1,4 %, neergaande helling 0,6 %
- afrondingsboog, veilig inhalen

- inhaalzichtafstand $L_z = 700$ m (tabelwaarde)
- topboog $R = 700^2 / 2 (\sqrt{1,1} + \sqrt{1,1})^2 = 55.681 \approx 56.000$ m
- lengte topboog $(0,014 + 0,006) 56.000 = 1120$ m (tangenten!)
- van opgaande helling tot top $0,014 56.000 = 784$ m
- hoogteverschil begin topboog – top $784^2 / (2 \times 56.000) = 5,5$ m

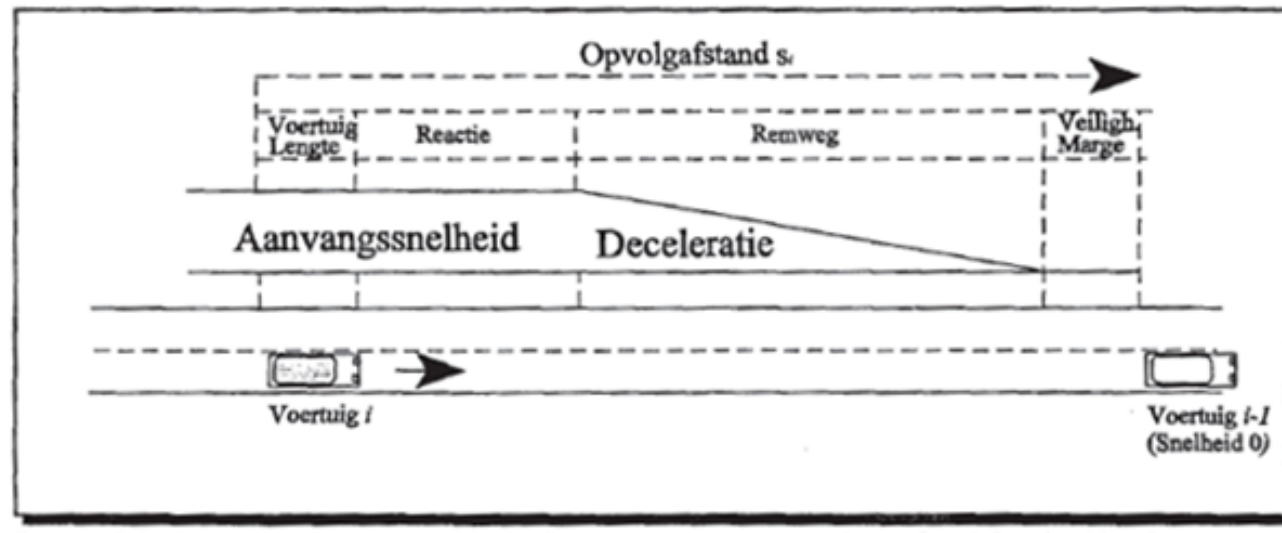
Snelheidsafname vrachtauto's helling opwaarts



5.

Capaciteit en intensiteit

Volgafstand



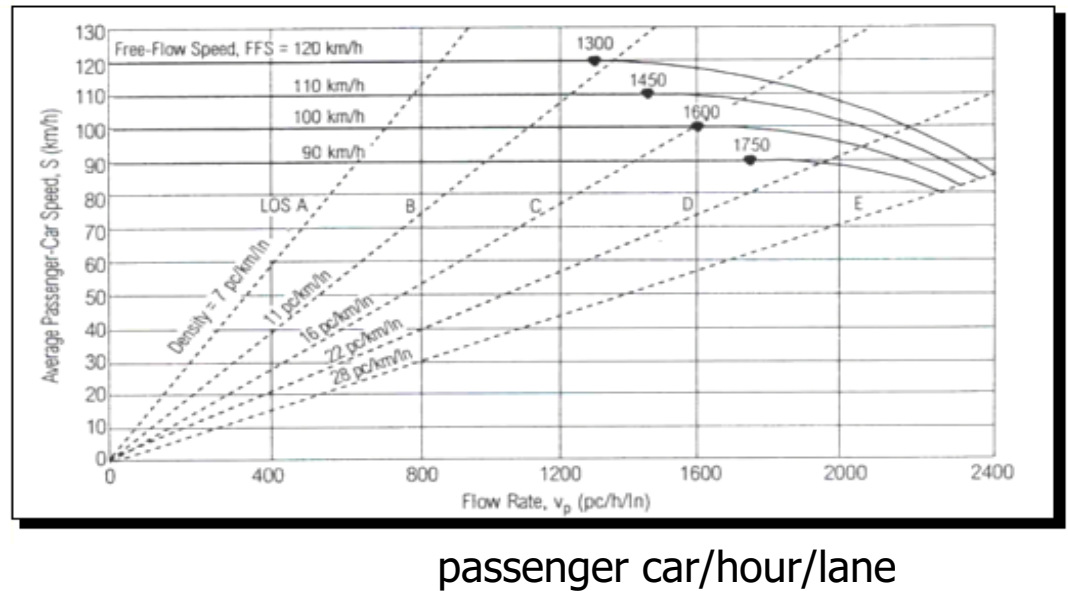
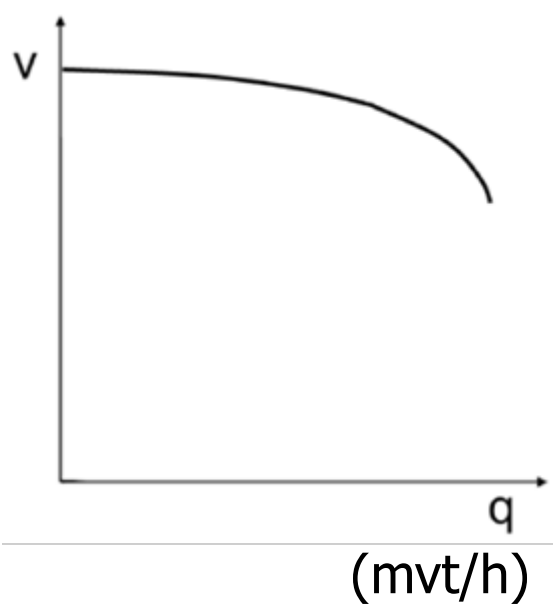
rijden niet op absolute, maar op relatieve remafstand
(verschil met spoorwegen!)

volgtijd autosnelweg minder dan 2 s

bij 2 s is de capaciteit $3600 / 2 = 1800$ mvt/h

werkelijke capaciteit ligt bij 2300 mvt/h

Relatie snelheid - intensiteit

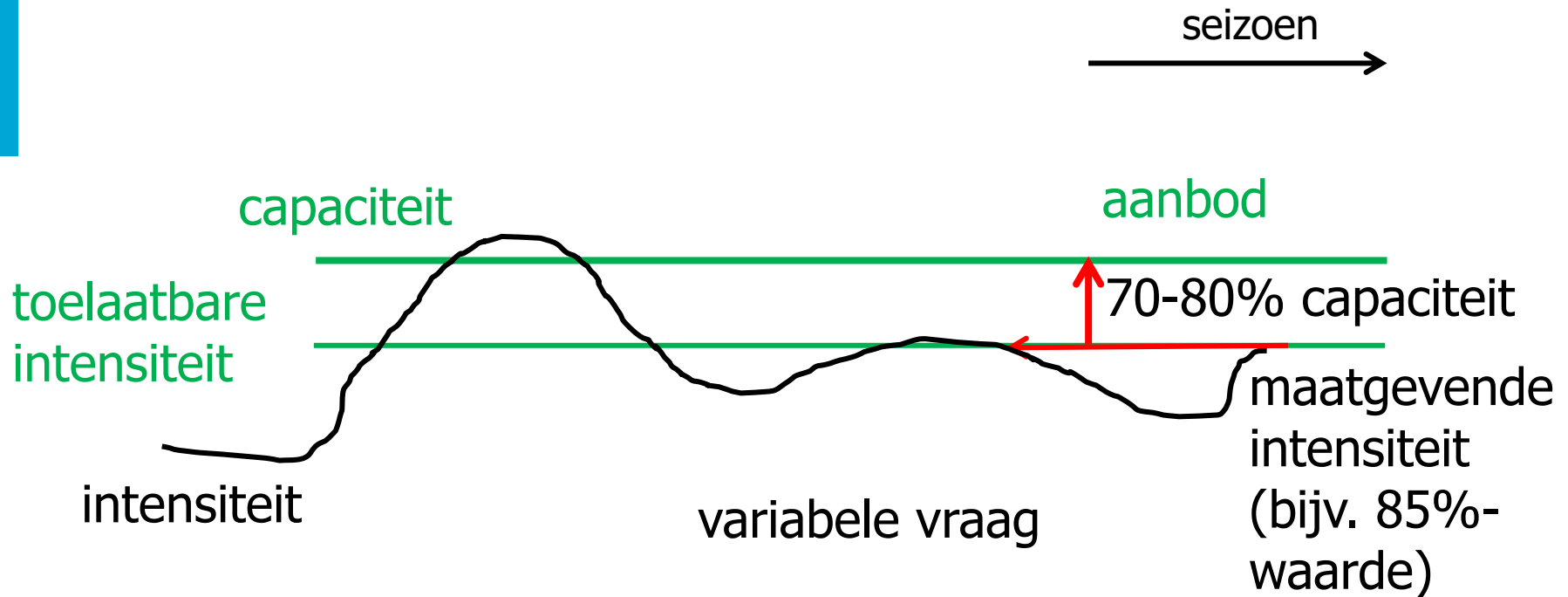


afwikkelingsniveau/level of service A t/m F
 A vrij rijden, F congestie, C of D ontwerpnorm)

Ontwerprichtlijnen

- autosnelwegen
 - Amerika: Highway Capacity Manual (HCM)
 - Nederland: Richtlijn Ontwerp Autosnelwegen (ROA 2014)
- niet-autosnelwegen
 - Handboek Wegontwerp 2013

Capaciteit en intensiteit



- Vrachtauto slokt meer capaciteit op dan personenauto > werken met pae (personenautoequivalent)
- Vrachtauto is 1,5 à 2 pae (2 pae bij hoogteverschillen)

Dimensionering

Verkeersvraag

- Maatgevende intensiteit (vtg/h) per richting bepalen met verkeersprognose (verkeersmodel)
- Treedt meestal op in ochtendspits of avondspits;
- Intensiteit m.b.v. percentage vrachtverkeer omrekenen naar pae/h

Aanbod infrastructuur

- Rijbaan bevat aantal rijstroken; elke rijstrook heeft een capaciteit van ongeveer 2300 pae/h
- Toelaatbare intensiteit is 70% (niveau C) of 80% (niveau D) daarvan

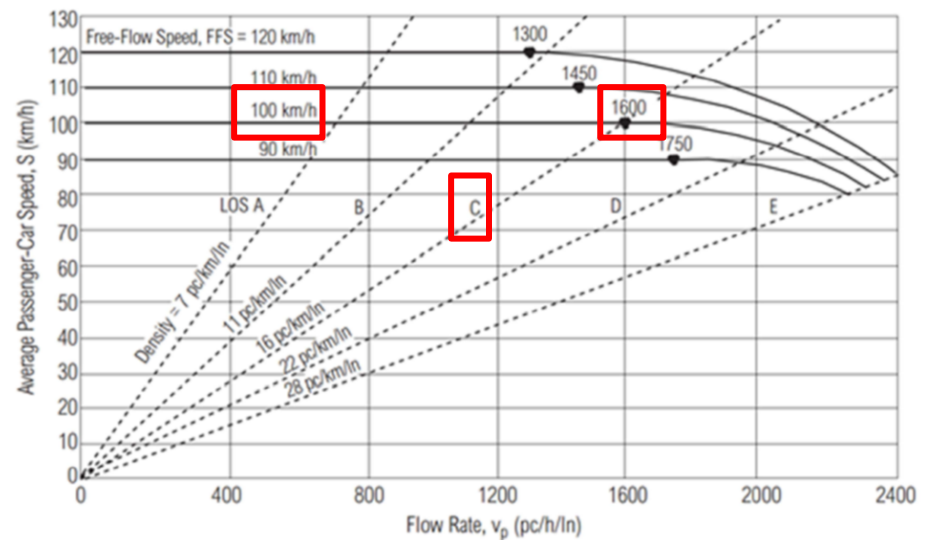
Vraag en aanbod confronteren

- Maatgevende intensiteit delen door toelaatbare intensiteit per rijstrook geeft aantal rijstroken
- Beide rijrichtingen krijgen meestal zelfde aantal rijstroken (ochtendspits omgekeerde van avondspits)

Rekenvoorbeeld 5 (volgens HCM)

- intensiteit maatgevend spitsuur drukste richting 5000 mvt/h
- 10 % vrachtauto's, vrachtauto 2 pae
- intensiteit maatgevend spitsuur drukste richting in pae/h:
 $500 \times 2 + 4500 = 5500$ pae/h
- gewenst afwikkelniveau C, free flow speed 100 km/h

- maximum flow rate
1600 pae/h/strook
- aantal rijstroken
 $5500/1600 = 3,44$
dus 4 rijstroken



Rekenvoorbeeld 5 (volgens ROA)

- intensiteit maatgevende spitsuur 5000 mvt/h
- bij afwikkelingsniveau C is de toelaatbare intensiteit 70% van de capaciteit
- dus capaciteit moet groter zijn dan $5000/70\% = 7142$ mvt/h
- uit tabel bij 10% vrachtverkeer: 4 rijstroken

Aandeel vrachtverkeer	Aantal rijstroken				
	2	3	4	5	6
0%	4650	7250	9700	12150	14450
1%	4627	7214	9652	12090	14378
2%	4604	7178	9604	12030	14307
3%	4581	7143	9557	11970	14236
4%	4559	7108	9510	11912	14167
5%	4537	7073	9463	11854	14098
6%	4515	7039	9417	11796	14029
7%	4493	7005	9372	11739	13961
8%	4471	6971	9327	11683	13894
9%	4450	6938	9282	11627	13828
10%	4429	6905	9238	11571	13762
11%	4408	6872	9194	11517	13703
12%	4387	6840	9151	11462	13632
13%	4366	6808	9108	11408	13568
14%	4346	6776	9065	11355	13505
15%	4326	6744	9023	11302	13442
16%	4306	6713	8981	11250	13380
17%	4286	6682	8940	11198	13318
18%	4266	6651	8899	11147	13257
19%	4247	6621	8858	11096	13196
20%	4227	6591	8818	11045	13136
21%	4208	6561	8778	10995	13077
22%	4189	6532	8739	10946	13018
23%	4170	6502	8700	10897	12960
24%	4152	6473	8661	10848	12902
25%	4133	6444	8622	10800	12844

Kantttekeningen bij dimensionering

- Binnen maatgevende uur-intensiteit drukste kwartier: wordt verdisconteerd met *drukste-kwartier-factor*
- Maatgevende uur-intensiteit is geen vaste waarde, maar fluctueert over het jaar (afhankelijk van weer, vakanties...): meestal wordt 15e of 30e drukste uur in het jaar gebruikt