



CT2710 Transport & Planning

Verkeerstroomtheorie en Verkeersmanagement

Hans van Lint & Prof Serge Hoogendoorn Transport & Planning
11-5-2012

TU Delft
Delft University of Technology

Challenge the future

Overzicht komende 6 colleges

- Maandag (6/12, Van Lint)
 - Waarom verkeersmanagement zo vreselijk belangrijk is
 - Basisbegrippen: intensiteit, snelheid, dichtheid en het fundamenteel diagram
- Dinsdag (7/12, Van Lint)
 - Onstaan en oplossen van files
 - Schokgolftheorie
- Donderdag (9/12)
 - PS Symposium OS 2028 !!!

Overzicht komende 6 colleges

- Maandag (13/12, Van Lint)
 - EXPERIMENT !!!
 - Regelen van verkeer (I): toeritdosereren
- Dinsdag (14/12, Van Lint)
 - Regelen van Verkeer (II): verkeerslichten, de 80 km/u zones en TomTom HD
- Donderdag (16/12, Hoogendoorn)
 - Regelen van Verkeer (III): netwerkmanagement en resume
- Maandag (3/1, Van Nes, Van Lint)
 - Tentamenvragen

Resume vorige keer

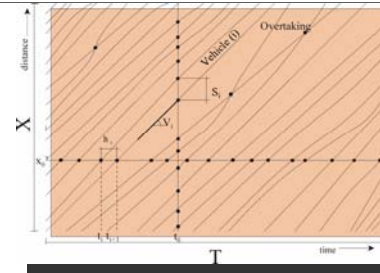
De variabelen

Lokaal (dus op een locatie $x=x_0$)

- Volgtijd h = aantal seconden tussen twee passerende voertuigen
- Intensiteit $q = 1 / \langle h \rangle |_{x=x_0}$
- Tijdgemiddelde snelheid $u_L = \langle v \rangle |_{x=x_0}$

Instantantaan (dus op een tijdstip $t=t_0$)

- Volgafstand s = aantal meter tussen twee voertuigen
- Dichtheid $k = 1 / \langle s \rangle |_{t=t_0}$
- Ruimtelijk gemiddelde snelheid $u_M = \langle v \rangle |_{t=t_0}$



$$q = ku$$

maar alleen als

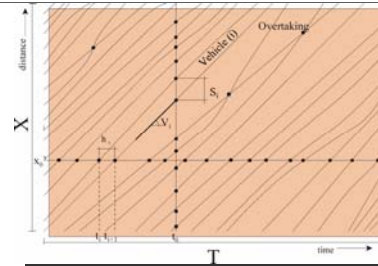
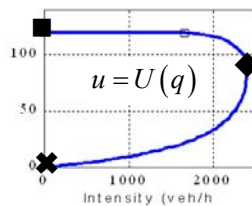
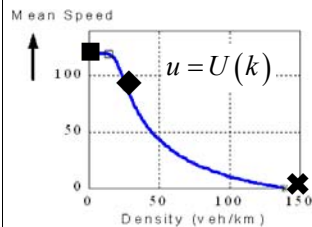
$$u = u_M$$

Benadering: harmonisch
gemiddelde snelheid (exact
als homogene / stationaire
toestand)

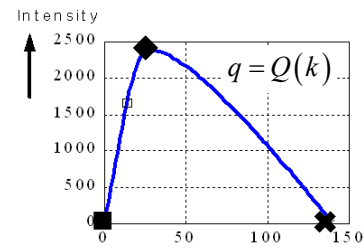
Resume vorige keer Het fundamenteel diagram

Gemiddelde relatie intensiteit & dichtheid (volgtijd & volgafstand)

- : Dichtheid 0 $\rightarrow$ free flow ($u=u_0, q=0$)
- ◆ : Kritische dichtheid & snelheid (k_c en u_c) $\rightarrow$ Maximum flow: capaciteit q_c
- ✕ : Dichtheid k_{jam} $\rightarrow$ parkeerplaats ($q=u=0$)



$$q = ku$$



Fund diagram bevat **stationaire toestanden**

4.

Hoe files ontstaan

Oorzaken van files?

Welke hoort in het rijtje niet thuis ?

1. Oudere weggebruikers
2. Jongeren die net hun rijbewijs hebben gehaald
3. Bumberklevers en linksrijders
4. 80-km zones
5. Snelheidscontroles
6. Mensen die (te laat of te hard) op de rem gaan staan
7. Inhalende vrachtwagens
8. Op- en afritten
9. Weefvakken
10. Wegwerkzaamheden en/of ongevallen
11. Matrixborden boven de weg (50,70,90 km/h)
12. Slecht weer of laagstaande zon
13. Te weinig rijstroken
14. Slecht openbaar vervoer

Bord:

>10

>5

<5

(strict genomen is 1 onjuist!)

Wie of wat veroorzaakt files?

- Eigenlijk zijn alle “oorzaken” onder bepaalde omstandigheden wel te vertalen naar:

“Er ontstaat file als er op een bepaalde tijd en plaats meer voertuigen (**verkeersvraag**) arriveren dan een stuk weg kan verwerken (**capaciteit of aanbod**)”

- Let op:
 - Zowel vraag als capaciteit = resultante collectief menselijk gedrag en afhankelijk van weer, verkeersmix, omstandigheden, etc, etc
 - Ook andere fundamenteel diagram parameters spelen een rol bij de dynamica van files – vrije snelheid, kritische snelheid, kritische dichtheid, stremmingsdichtheid

even een fundamenteel diagrammetje tekenen op bord

Wie of wat veroorzaakt files?

De file top 10 van drukste spitsen aller tijden

Uitgegeven: 25 maart 2008 09:49
Laatst gewijzigd: 25 maart 2008 09:51

AMSTERDAM - De ANWB komt met een top 10 van langste files.

975 kilometer - 8 februari 1999, sneeuwval en gekantelde vrachtwagens, ochtendspits
888 kilometer - 25 maart 2008, winterweer, ochtendspits
810 kilometer - 25 november 2005, sneeuwval, avondspits
760 kilometer - 26 februari 2004, winterweer, ochtendspits
660 kilometer - 6 maart 2006, sneeuw en einde Krokusvakantie, ochtendspits
594 kilometer - 13 november 2006, regen, ochtendspits
592 kilometer - 16 november 2006, regen, avondspits
571 kilometer - 29 januari 2004, sneeuwval en zware windstoten, ochtendspits
569 kilometer - 15 november 2005, regen, ochtendspits
567 kilometer - 10 februari 1999, winterweer met sneeuwval, ochtendspits

© ANP/ANWB

• Oorzaken files:

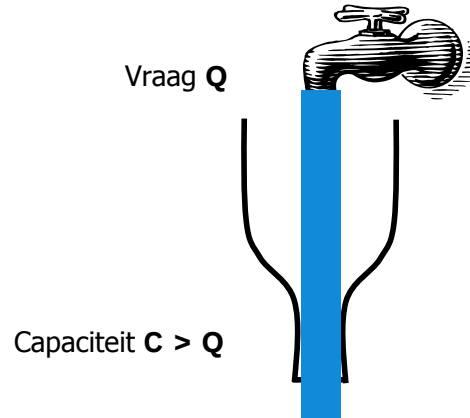
- ca 85% vraag/capaciteit mismatch
- ca 10% ongelukken
- ca 5% wegwerkzaamheden

(maar getallen verschillen van bron tot bron)

Basisprincipe files: mismatch vraag en capaciteit

Analogie met vloeistofdynamica

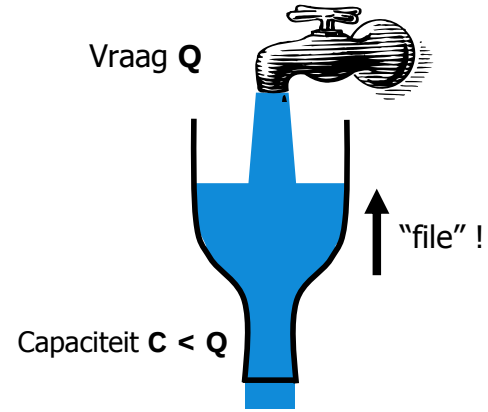
Zolang er maar minder vraag is dan capaciteit: niets aan de hand



Basisprincipe files: mismatch vraag en capaciteit

Analogie met vloeistofdynamica

Zodra $Q > C$, ontstaat er file en dus vertraging



Basisprincipe files: mismatch vraag en capaciteit

NB: Analogie met water gaat maar beperkt op!

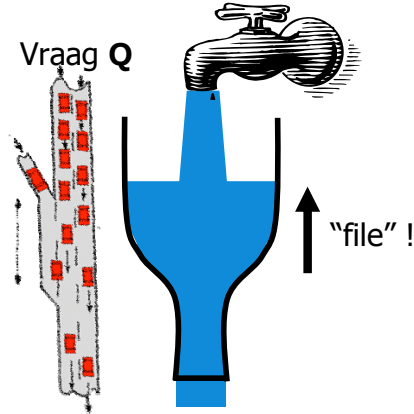
- Voertuigen botsen (liever) niet
- Voertuigen bewegen in dezelfde richting; watermoleculen bewegen alleen netto in een bepaalde richting.
- Verkeer is anisotroop (interactie heeft richting: vooruit)
- Gedrag voertuig veel ingewikkelder dan van molecule
- Voertuigen nemen relatief aan het macroscopische fenomeen (de file) veel ruimte in, watermoleculen zijn verwaarloosbaar klein.
- Er zijn veel, maar dan ook echt heel veel meer watermoleculen in een fles dan voertuigen in een file: betekent dat concepten als dichtheid en gemiddelde snelheid iets heel anders betekenen
- Niet-lineaire fenomenen: instabiliteit, capaciteitsval

Op bord conservation of vehicles uitleggen over stukje weg
verandering dichtheid in tijd = in – uitstroom = verandering in flow over
ruimte $dk/dt = -dq/dx$
Omdat $q = Q(k) \rightarrow dk/dt + c(k)dk/dx = 0$

Basisprincipe files: mismatch vraag en capaciteit

NB: Analogie met water gaat maar beperkt op!

- Op micro niveau gebeurt er dit:
 - Voertuig i voegt in
 - Volger $i+1$ sch(r)ikt – te korte volgafstand naar ingevoegde i
 - Voor $i+1$ geen andere optie dan remmen $\rightarrow$ snelheid omlaag = volgtijd omhoog!
 - Domino effect: $i+2$ remt ook maar nog harder, $i+3$ ook, etc
 - Soms tot volledige stilstand
- Verrassing: de “water” benadering is helemaal niet zo’n slechte macroscopische benadering



Voorbeelden bottlenecks

- invoegingen, weefvakken, etc
- Tunnels, bruggen
- Wegwerkzaamheden, versmallingen
- Ongelukken, incidenten
- Kolonne vrachtwagens / trekkers
- Plaatselijke gladheid/regenbui
- Alle overige zaken die (lokaal) de volgtijd/reactietijd nadelig beïnvloeden

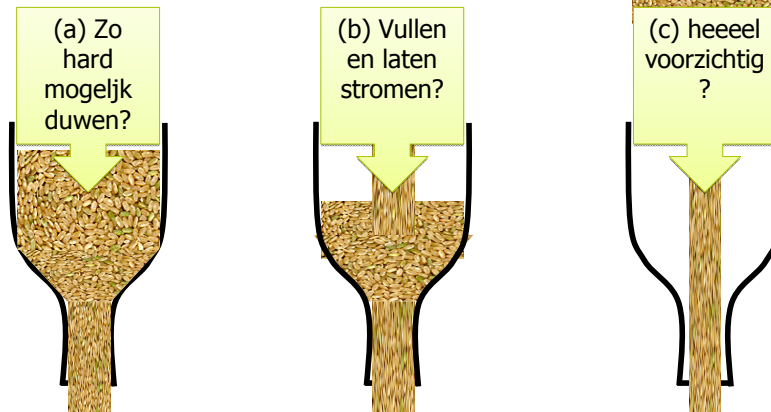


Vraag – op bord

Basisprincipe files: mismatch vraag en capaciteit

Een (iets) betere analogie

- Welke methode zorgt voor maximale doorstroom?



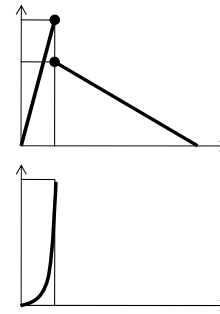
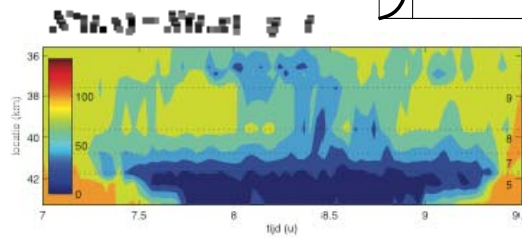
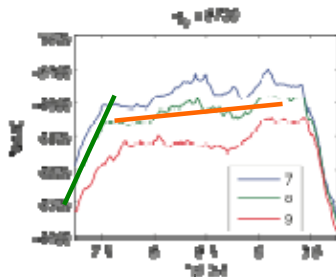
Op bord a, b, c turven

Dan drie vrijwilligers voor (b) en (c) en klokken maar

Van kwaad tot erger

De capaciteitsval & instabiliteit

- Vrije capaciteit > Afrij capaciteit
- Zodra file: capaciteit omlaag
(het gaat van kwaad tot erger)
- Uit data blijkt: afname van 5-25% afhankelijk van omstandigheden



Capacity drops from approximately 4200 to 3750 (approx), which is a drop of 450 veh/h!

Instabiliteit en start-stop (file)golven

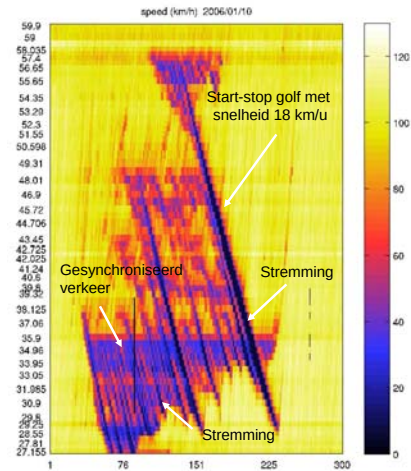
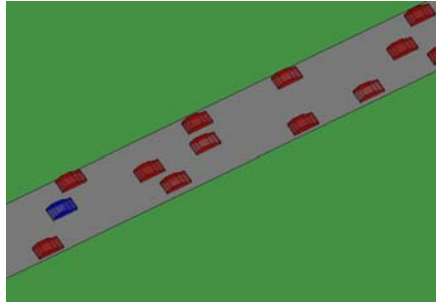
files uit het niets?

- Voorbij een bepaalde dichtheid wordt verkeer instabiel
- Spontane vorming van zogenoemde start-stop golven (frequentie van 1-3 minuten) in zulke hoge dichtheidsgebieden



Instabiliteit en start-stop (file)golven files uit het niets?

- De resulterende files kunnen soms uren bestaan en vele kms afleggen!
- Dichtheid in die start-stop golven is hoog, snelheid laag of zelfs nul



Resume: hoe ontstaan files?

Ingrediënten voor congestie

1. Er moet voldoende verkeersvraag (Q) zijn in dezelfde ordegrootte als de (rest)capaciteit C van een bottleneck (in de breedste zin van het woord)
2. Er treed een verstoring in de stroom op zodat tijdelijk en plaatselijk $Q > C$

Gedragmatig: iemand ervaart tijdelijk een onacceptabele combinatie volgafstand-snelheid (denk aan fundamenteel diagram) en reageert door de snelheid te verlagen (= bij gelijke volgafstand hetzelfde als “zijn volgtijd vergroten”)

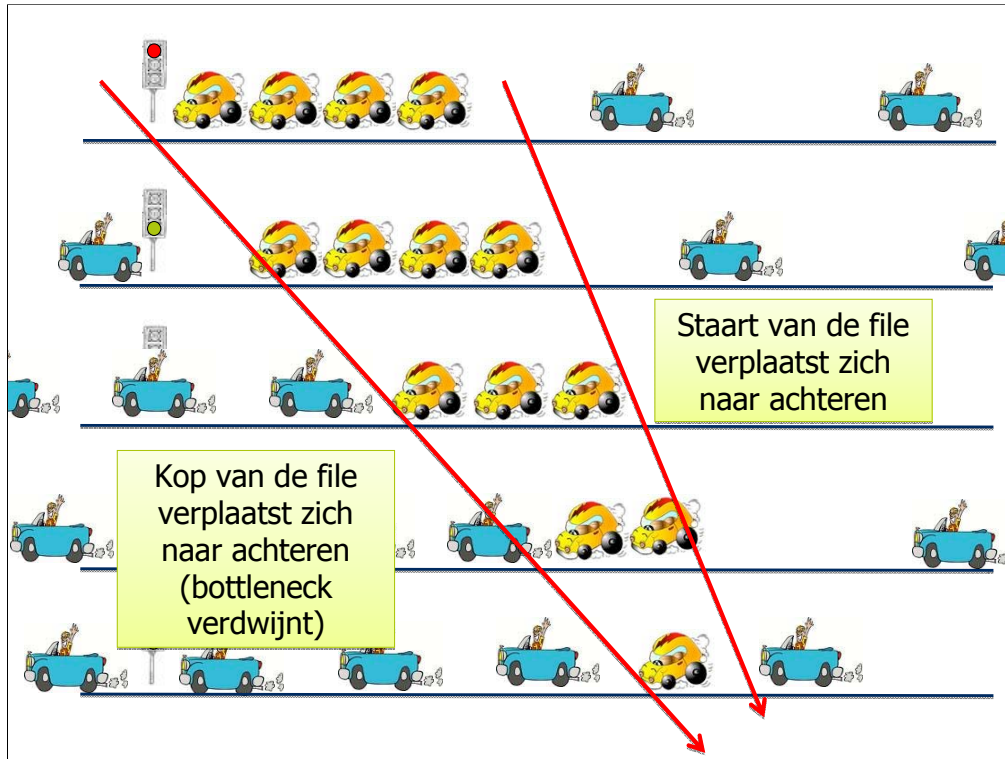
De eerste file!

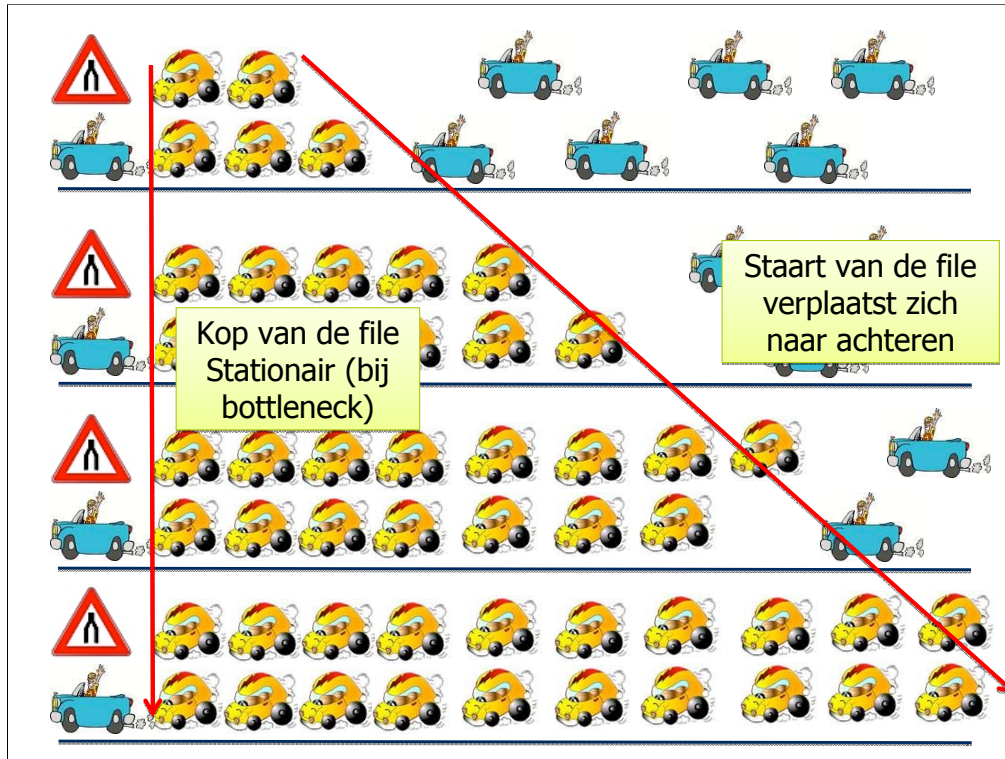
29 mei 1955, 1e Pinksterdag – een dagje uit!

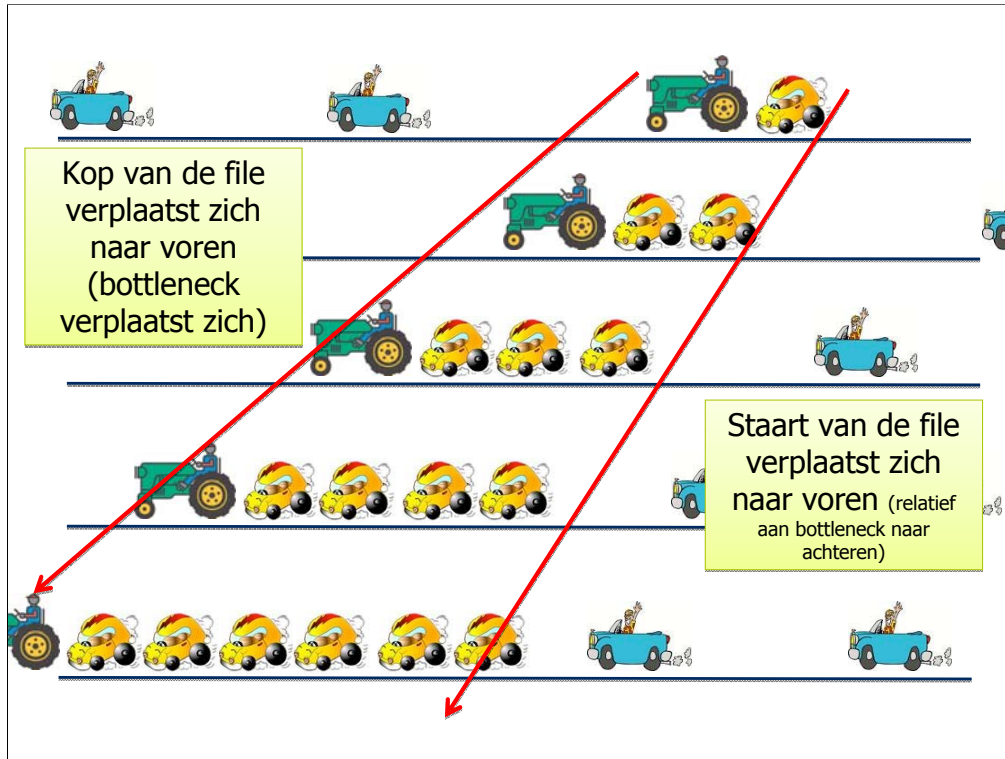


5.

Hoe je de dynamica van files (en de consequenties) kunt beschrijven met
schokgolftheorie







Kop van de file
verplaatst zich
naar voren
(bottleneck
verplaatst zich)

Beide gevallen: snelheid de
"schokgolf" afhankelijk van:

- intensiteit/ toestand in de file
- en daarnaast van
- inflow/toestand bij staart *of*
 - uitflow (capaciteit)/toestand bij kop

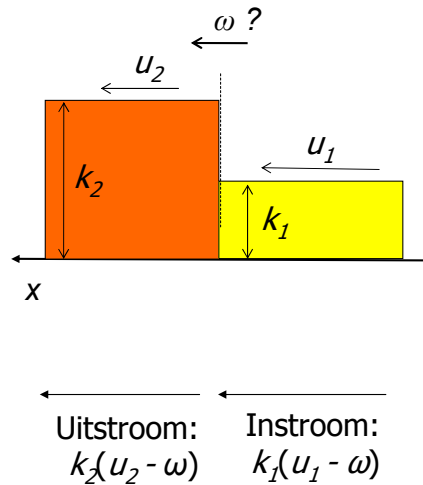
Staart van de file
verplaatst zich
naar voren (relatief
aan bottleneck naar
achteren)

Snelheid schokgolf tussen twee verkeerstoestanden

$$k_2(u_2 - \omega) = k_1(u_1 - \omega).$$

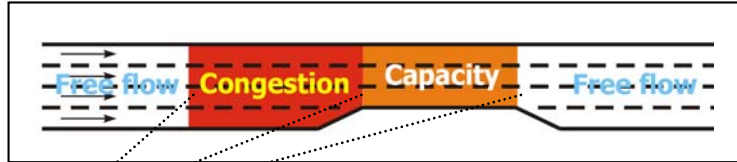
$$\rightarrow \omega = (q_1 - q_2) / (k_1 - k_2)$$

**Schokgolsnelheid =
verschil in intensiteit
/ verschil in dichtheid**



Bottlenecks en schokgolven

- Stel je de situatie voor als een bottleneck (flessehals)



- De grens tussen verschillende condities noem je dus een schokgolf
- Die kunnen heel mild zijn (vb. platoon snelle voertuigen die voorbij een colonnen vrachtwagens rijdt)
- Maar ook erg dramatisch (voertuig die op volle snelheid een stilstaande file "inrijdt" – die moet vol op de rem, de volgende ook, etc)

Shokgolven – grafische interpretatie

Diagram illustrating shockwaves in traffic flow, showing the relationship between space (ruimte) and time (tijd).

The diagram is divided into four regions (1, 2, 3, 4) representing different traffic states:

- 1 (Congestie):** Congestion state, colored red.
- 2 (Capaciteits toestand):** Capacity state, colored orange.
- 3 (Vrije toestand):** Free state, colored green.
- 4 (Vrije toestand):** Free state, colored green.

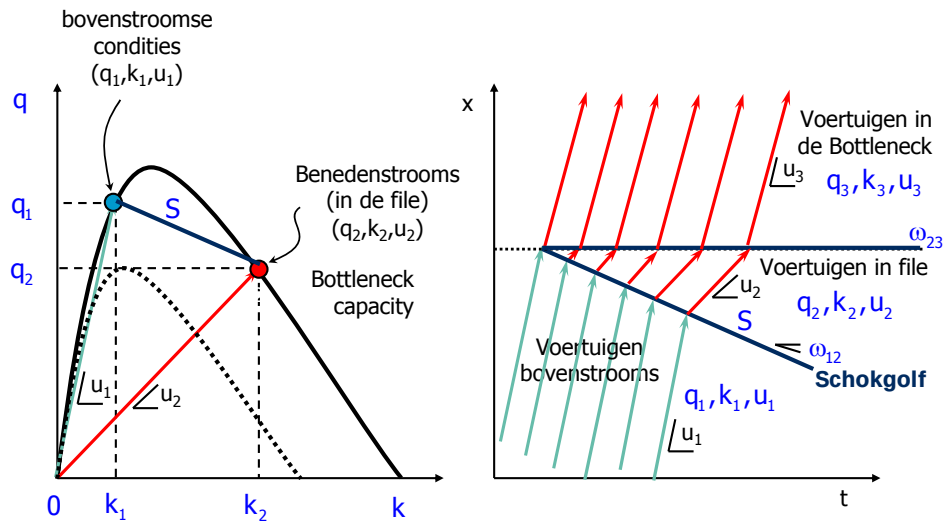
Key features and labels:

- Stationaire schokgolf tussen capaciteits en file (congestie) condities:** Stationary shockwave between capacity and congestion conditions (indicated by line 2).
- Stationaire schokgolf tussen capaciteits en file (congestie) condities:** Stationary shockwave between capacity and congestion conditions (indicated by line 3).
- terugslag schokgolf tussen file (congestie) condities en vrije afwikkeling:** Backward shockwave between congestion conditions and free flow (indicated by line 1).
- Bottleneck locatie:** Location of the bottleneck.
- Einde bottleneck:** End of the bottleneck.
- Free flow:** Free flow state (top and bottom).
- Capacity:** Capacity state (middle).
- Congestion:** Congestion state (bottom).

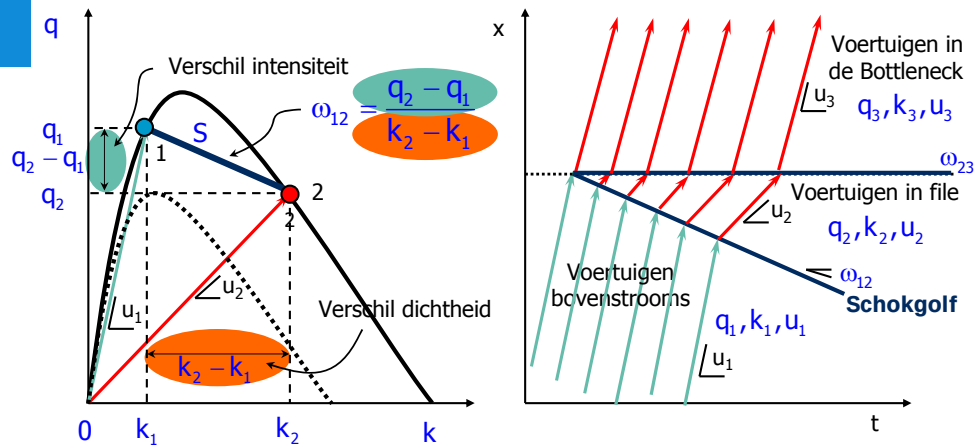
A graph on the right shows the flow $Q(k)$ versus density k , illustrating the relationship between flow and density, with points 1, 2, 3, and 4 marked on the curve.

Vraag: stel dat de staart van de file nou echt op die lokatie blijft hangen wat is dan de intensiteit bovenstrooms????

Schokgolven – grafische interpretatie



Schokgolven – grafische interpretatie



De formules

- De snelheid w_{12} van de schokgolf is

- En dat is dus de ratio tussen

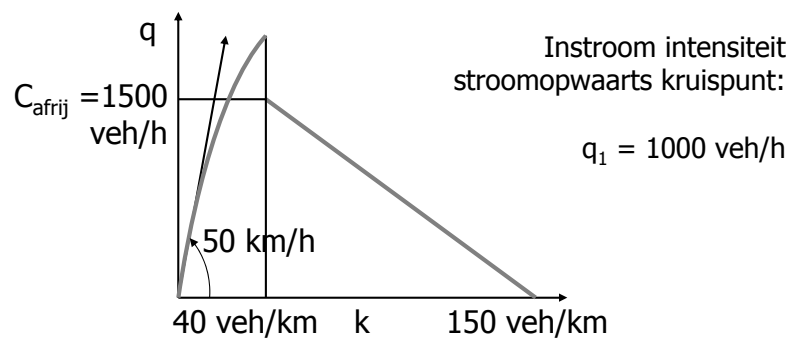
$$\frac{\text{Het verschil in intensiteit over de schokgolf } S}{\text{Het verschil in dichtheid over de schokgolf } S}$$

Dus ...

- Als $k_2 > k_1$ en $q_1 > q_2$ dan gaat de schokgolf tegen het verkeer in (file terugslag)
- Als $k_2 > k_1$ en $q_1 < q_2$ dan lost de file op
- Als $k_2 > k_1$ en $q_1 = q_2$ dan blijft de staart van de file precies waar ie is

Voorbeeldtoepassing

- Beschouw een geregeld kruispunt met groentijd t_g en roodtijd t_r
- Veronderstel dat onderstaand fundamenteel diagram geldt:

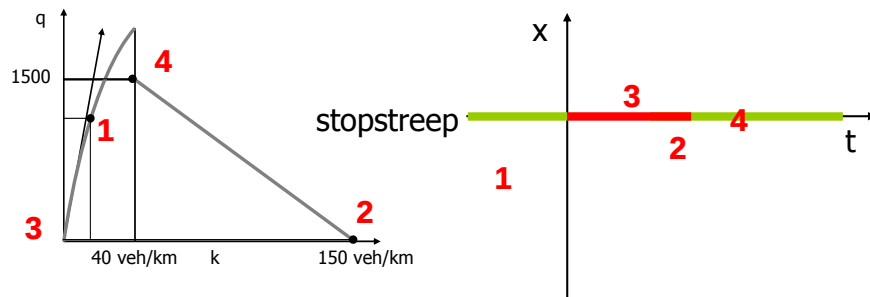


teken even op bord

Voorbeeldtoepassing

Nr.	k	q
1	18	1000
2	150	0
3	0	0
4	40	1500

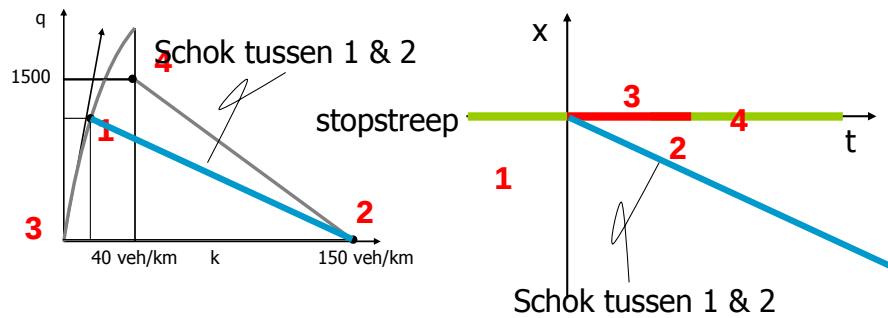
1. Definieer toestanden die ontstaan



Voorbeeldtoepassing

Nr.	k	q
1	18	1000
2	150	0
3	0	0
4	40	1500

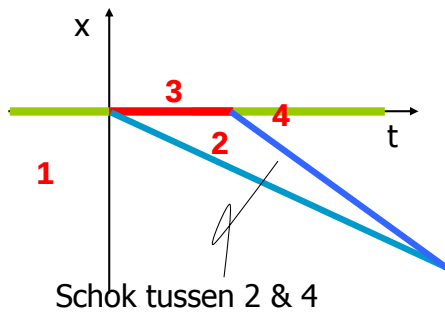
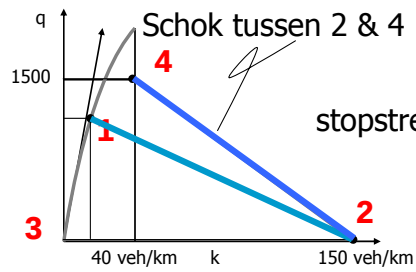
1. Definieer toestanden die ontstaan
2. Bepaal schokgolven / snelheden



Voorbeeldtoepassing

Nr.	k	q
1	18	1000
2	150	0
3	0	0
4	40	1500

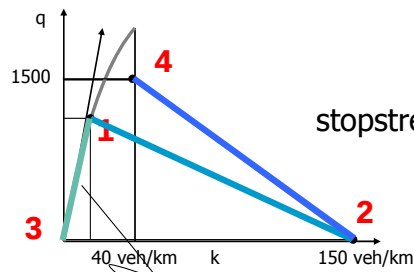
1. Definieer toestanden die ontstaan
2. Bepaal schokgolven / snelheden



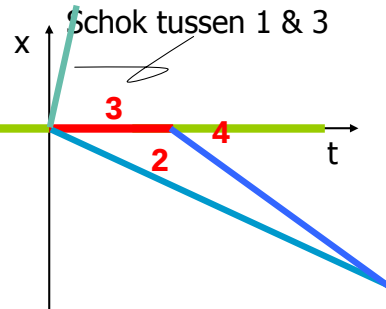
Voorbeeldtoepassing

Nr.	k	q
1	18	1000
2	150	0
3	0	0
4	40	1500

1. Definieer toestanden die ontstaan
2. Bepaal schokgolven / snelheden



Schok tussen 1 & 3

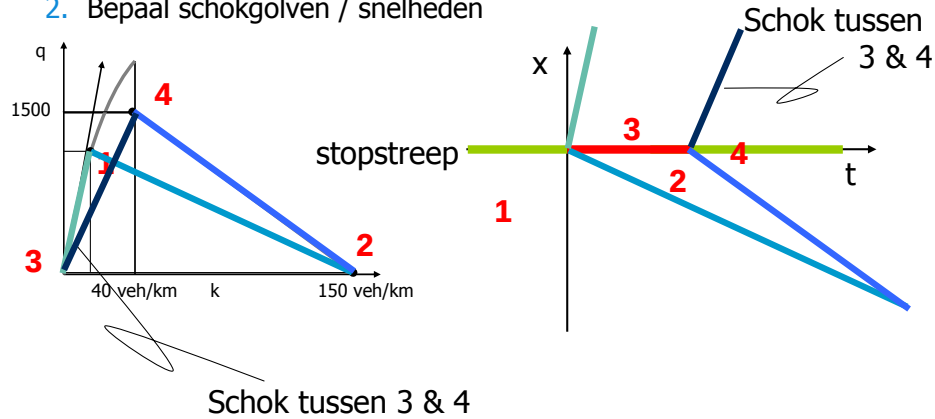


Schok tussen 1 & 3

Voorbeeldtoepassing

Nr.	k	q
1	18	1000
2	150	0
3	0	0
4	40	1500

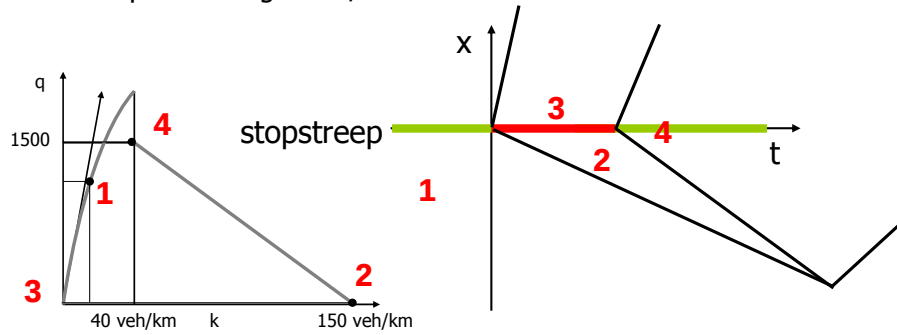
1. Definieer toestanden die ontstaan
2. Bepaal schokgolven / snelheden



Voorbeeldtoepassing

Nr.	k	q
1	18	1000
2	150	0
3	0	0
4	40	1500

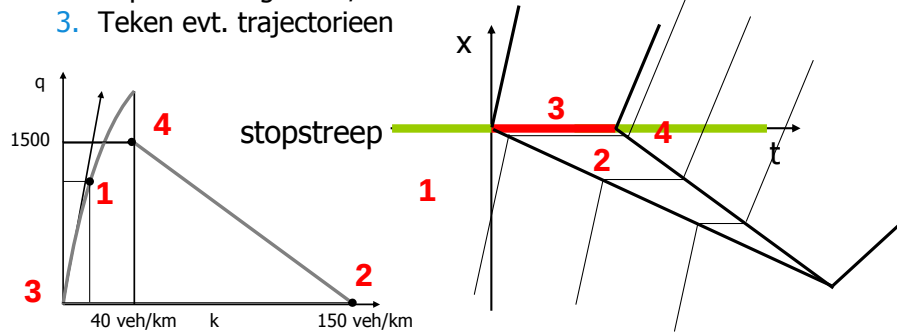
1. Definieer toestanden die ontstaan
2. Bepaal schokgolven / snelheden



Voorbeeldtoepassing

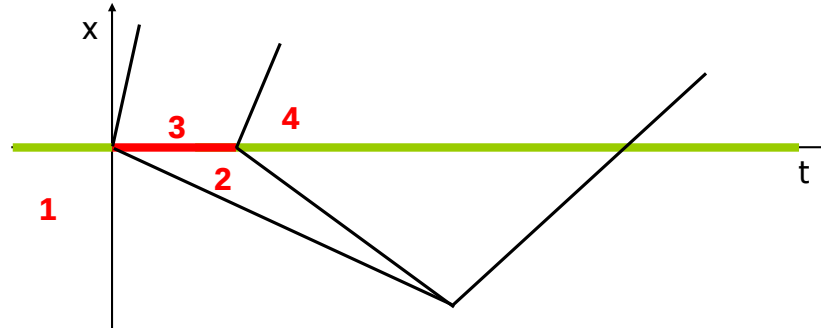
Nr.	k	q
1	18	1000
2	150	0
3	0	0
4	40	1500

1. Definieer toestanden die ontstaan
2. Bepaal schokgolven / snelheden
3. Teken evt. trajectorieën



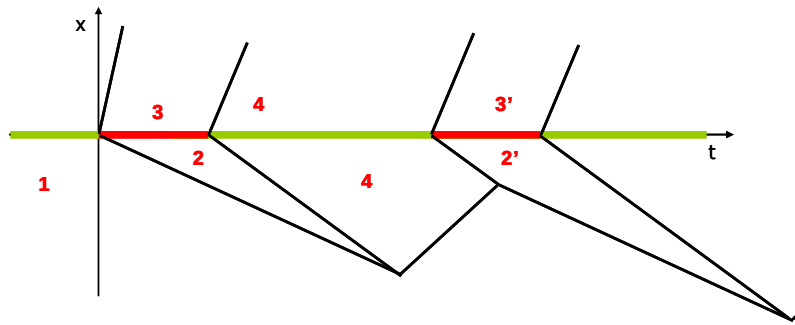
Voorbeeldtoepassing

- Hoe lang moet de groenfase zijn om ervoor te zorgen dat de wachtrij niet iedere cyclus langer wordt?



Voorbeeldtoepassing

- Stel: opnieuw rood voordat al het verkeer fase 4 over stopstreep
- 2e wachtrij (gebied 2') langer dan 1e



Resume: hoe lossen files (niet) op?

Dynamica van congestie

1. Beweging van kop en staart van de file kun je heel redelijk voorspellen met schokgolf theorie
 - Verschil in intensiteit gedeeld door verschil in dichtheid bepaalt schokgolf snelheid zowel aan kop als staart
 - Verschillende typen bottlenecks: verschillende dynamica maar methode idem

(gedragmatig: er wordt geaccelleerd en gedecelereerd en dat is erg afhankelijk van de soort bottleneck, voertuig en bestuurder en de verkeersomstandigheden)

2. Allerlei niet-lineaire zaken in de file zelf: ingewikkelder modellen en theorieën (komt in Msc voorbij)

In een tweestrooksrijbaan van een autosnelweg bevindt zich een brug met smallere rijstroken en kleinere capaciteit dan op het baanlichaam. In de tabel staan de verkeersstroomgegevens van de weg.

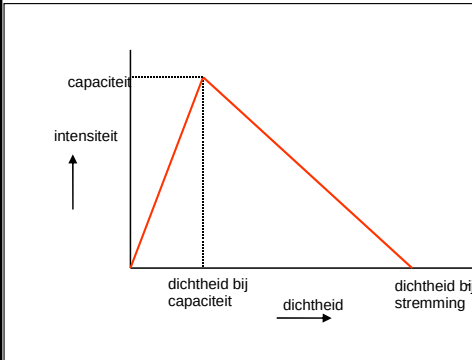
Het fundamentele diagram volgens figuur 2 is van toepassing.

Relevante formules:

$$\omega = (q_1 - q_2) / (k_1 - k_2) \text{ en } k = q / v,$$

waarin q : intensiteit, k : dichtheid en v , ω : snelheid

	capaciteit	dichtheid bij capaciteit	dichtheid bij stremming
rijbaan met twee stroken	4800 vtg/h	40 vtg/km	200 vtg/km
brug	3600 vtg/h	36 vtg/km	200 vtg/km



Figuur 2 Fundamenteel diagram

Vraag a

Wat is de snelheid op de rijbaan en op de brug in wanneer de intensiteit lager is dan de capaciteit?

Vraag b

De intensiteit in de spits bedraagt 4200 vtg/h. Bereken de dichtheid voor en in de file.

Vraag c

Teken in het fundamentele diagram de toestand van het verkeer op de autosnelweg in de spits. Vermeld langs beide assen relevante waarden. Waar ontstaat een file, op de brug, op de weg of op beide?

Vraag d

Wat is de snelheid in de file en met welke snelheid loopt de achterkant van de file terug?

Men overweegt in de spitsuren de vluchtstrook als spitsstrook te gebruiken. Op de brug ontbreekt de vluchtstrook. Voor de rijbaan met spitsstrook geldt:

$$q_{cap} = 6000 \text{ vtg/h},$$

$$k_{cap} = 60 \text{ vtg/km en}$$

$$k_{stremming} = 300 \text{ vtg/km}.$$

Vraag e

Beredeneer, zonder berekening, wat het effect is van het openstellen van de spitsstrook. Zal de file eerder zijn verdwenen na afloop van de spits?