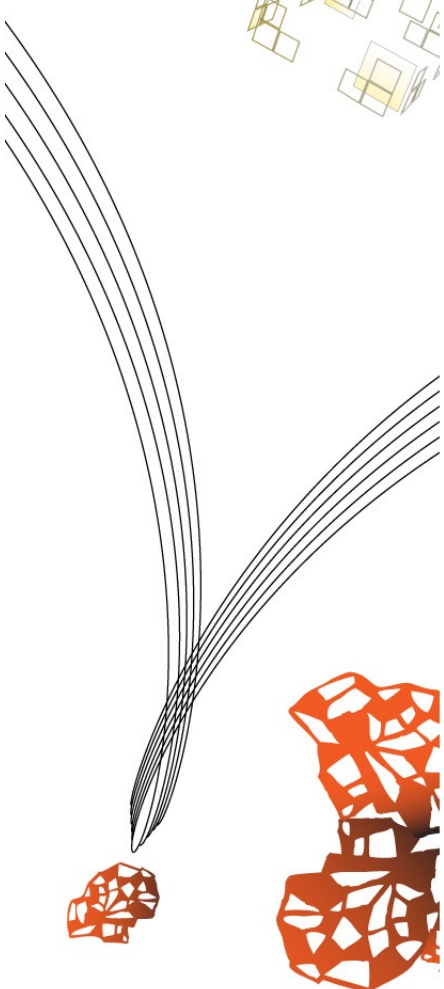




BACHELOROPDRACHT



CROWD MODELLING  
“DE MENIGTE GEMODELLEERD”



RUBEN HEERSINK - s1121146  
FEMIA VAN STIPHOUT - s1004840  
MARTIN WEVERS - s0204714

17 JUNI 2013

BEGELEIDER: GJERRIT MEINSMa

UNIVERSITEIT TWENTE.

# Voorwoord

Dit verslag is geschreven voor de bacheloropdracht van de studie Technische Wiskunde aan de Universiteit Twente. In de afsluitende fase van de bachelor Technische Wiskunde wordt er in groepjes van drie tot vier personen gewerkt aan een (bachelor)opdracht. Zo ook dit jaar door ons: Ruben, Martin en Femia. Het onderwerp van deze bacheloropdracht is ‘Crowd Modelling’. Geïnspireerd door het fraaie gedrag van spreuwen in een zwerm zijn wij aan het rekenen geslagen om ons eigen model te maken en simulaties te kunnen doen van deze spreuwen, maar ook van mensen. Vooral het modelleren van grote groepen mensen in panieksituaties is interessant omdat dat kan bijdragen aan het voorkomen van desastreuze gevolgen bij situaties waarin grote groepen mensen zich in een beperkte ruimte bevinden. Vol goede moed en met het voornemen om de wereld te verbeteren zijn we aan de slag gegaan. Na veel rekenen, frustrerende uren, korte en lange overleggen, liters koffie en veel thee ligt hier voor u het resultaat. Het was wat ons betreft de moeite waard om dit onderzoek te doen en daarnaast was het ook erg leuk!

Graag willen wij daarnaast onze begeleider, Gjerrit Meinsma, hartelijk bedanken voor al zijn inspirerende ideeën, wiskundige kennis en vele uren overleg. Ook bedanken wij Dirk Helbing, Illés Farkas en Tamás Vicsek voor de extra informatie.

# Samenvatting

‘Crowd modelling: de menigte gemodelleerd’, is in essentie de samenvatting van dit verslag. Het doel van het onderzoek is het dynamische gedrag van groepen mensen in een ruimte te modelleren met het oog op de doorstroomsnelheid. Om dit te bereiken modelleren we alle personen in de groep als individuen die zich aan drie regels houden; kom niet te dicht bij muren en objecten, kom niet te dicht bij burens en loop met de gewenste snelheid naar de uitgang. Deze regels worden vertaald naar krachten die op de personen werken. Al deze krachten gesommeerd geeft volgens de tweede wet van Newton de versnelling van de persoon weer. Wanneer de beginposities en beginsnelheden bekend zijn, wordt het gedrag van de personen geheel beschreven door differentiaalvergelijkingen. Na het discretiseren van deze differentiaalvergelijkingen is het model geïmplementeerd in Matlab en is geprobeerd een realistische simulatie te krijgen van een groep personen.

Een belangrijk aspect van het modelleren van groepen mensen is paniek. In ons model wordt een hogere mate van paniek vertaald naar een grotere kracht op de personen richting de uitgang. De oorzaak van paniek kan op verschillende manieren worden beschreven, in het model wordt gebruik gemaakt van een lineaire combinatie van twee factoren. De eerste factor is in welke mate de persoon zijn gewenste snelheid haalt, de tweede is hoeveel fysieke kracht hij ervaart.

Het belangrijkste resultaat uit dit onderzoek is dat paniek lang niet altijd resulteert in een slechte doorstroming. Pas bij grote aantallen mensen ( $\geq 100$ ) zien we dat er een dusdanige opstopping ontstaat dat maximale paniek niet meer de beste ‘strategie’ is om iedereen zo snel mogelijk uit de ruimte te krijgen.

# Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Voetgangersmodel</b>	<b>7</b>
2.1	Modelomschrijving . . . . .	7
2.1.1	Demping . . . . .	10
2.1.2	Randomkracht . . . . .	13
2.1.3	Snelheidsbegrenzing . . . . .	13
2.1.4	Obstakels . . . . .	13
2.1.5	Verdrukking . . . . .	14
2.2	Bewegingsmodel . . . . .	15
2.2.1	Botsing . . . . .	15
2.3	Paniek . . . . .	18
2.3.1	Verhoogde gewenste snelheid . . . . .	18
2.3.2	Paniekparameter . . . . .	18
2.3.3	Paniekfactoren . . . . .	18
2.4	Statisch model . . . . .	19
<b>3</b>	<b>Resultaten</b>	<b>22</b>
3.1	Validatie . . . . .	22
3.2	Verificatie . . . . .	23
3.3	Gevoeligheidsanalyse . . . . .	24
3.3.1	Variatie in $n$ en $v_0$ . . . . .	24
3.3.2	Variatie in $\Delta_t$ . . . . .	25
3.3.3	Variatie in deurpostgrootte . . . . .	28
3.3.4	Variatie in vormgeving . . . . .	28
3.3.5	Variatie in $\mathbf{F}_{\text{random}}$ . . . . .	30
3.3.6	Variatie in constantes . . . . .	31
3.4	Paniek . . . . .	33
3.4.1	Paniekparameter . . . . .	33
3.4.2	Paniekfactoren . . . . .	34
<b>4</b>	<b>Discussie</b>	<b>36</b>
4.1	Analyse model . . . . .	36
4.2	Vergelijking met literatuur . . . . .	38
<b>5</b>	<b>Conclusie</b>	<b>42</b>
<b>6</b>	<b>Aanbevelingen</b>	<b>43</b>

6.1	Demping op personen . . . . .	43
6.2	Selectieve invloed muur- en buurkracht . . . . .	44
6.3	Dode of gewonde personen . . . . .	44
6.4	Intelligentie . . . . .	44
<b>7</b>	<b>Symbolenlijst</b>	<b>46</b>

# Hoofdstuk 1

## Inleiding

De uitdaging van deze bacheloropdracht is het goed modelleren van een menigte. Daarmee is de uitdaging van dit verslag het goed weergeven van dit model. Het onderwerp ‘Crowd Modelling’ is een al veel bediscussieerd en onderzocht onderwerp. Craig Reynolds was in 1987 één van de eerste met zijn model over ‘Boids’, [4]. Hij deed hierin onderzoek naar het gedrag van vogels in een zwerm. Na hem volgden er nog velen en er wordt nog steeds onderzoek gedaan op dit gebied. Hanno Hildenbrandt en collega’s hebben recent het gedrag van spreeuwen onderzocht in een grote zwerm, [3]. Daarbij hebben zij het voor elkaar gekregen om 5000 spreeuwen te modelleren.

Naast Craig Reynolds en Hanno Hildenbrandt hebben nog veel meer wetenschappers onderzoek gedaan naar het modelleren van spreeuwen, vissen of mensen. De meeste onderzoeken gaan uit van een aantal basisprincipes. Spreeuwen bijvoorbeeld, worden gemodelleerd volgens drie basisregels. Met behulp van deze basisregels is het mogelijk een grote zwerm spreeuwen te simuleren die nagenoeg hetzelfde patroon vertoont als echte spreeuwen. Dit duidt op een redelijke aanname van de drie basisregels. De eerste is dat spreeuwen graag bij elkaar in de buurt blijven, het zijn kuddedieren. Daarnaast willen spreeuwen ook niet botsen, dus houden ze afstand. De laatste regel die wordt aangenomen is de regel dat elke spreeuw het liefst net zo hard vliegt als de rest van de zwerm, [4]. Spreeuwen veranderen van richting door te ‘banken’, dit houdt in dat hun vleugels in één lijn blijven en dat hun snelheid niet verandert bij het maken van een bocht. Uit onderzoek is gebleken dat spreeuwen hun zeven meest nabije burens in de gaten houden om deze regels op toe te passen, [3], [2].

Vogels en mensen zijn zeer verschillende wezens en dus niet goed vergelijkbaar. Toch lijkt het dat mensen in panieksituaties niet zo goed meer nadenken en hun instinct volgen. Hierdoor is het gedrag van mensen in panieksituaties redelijk goed te voorspellen met soortgelijke regels als waar spreeuwen zich aan houden.

Het modelleren van mensen kan op ongeveer dezelfde manier gedaan worden. Er wordt aangenomen dat mensen niet echt samenwerken in een groep, hierdoor hebben ze niet per se de drang om bij elkaar in de buurt te blijven. In sommige situaties is dit wel het geval maar in de meeste gevallen doet een persoon toch wat hemzelf of haarzelf uitkomt. Mensenmassa’s worden dus gezien als een groep individuen. De tweede regel is wel van toepassing op mensen, ook zij proberen botsingen te vermijden. De derde regel is eveneens ongeveer hetzelfde, elke persoon heeft een gewenste snelheid. Naarmate een situatie

onrustiger wordt, zal de gewenste snelheid toenemen. Iedereen wil dan zo snel mogelijk de kamer uit of de gang door. Daarnaast worden mensen gemodelleerd in een ruimte met muren, waarmee botsingen ook voorkomen moeten worden.

Van dit onderwerp is een algemeen model uit de literatuur al redelijk bekend. Toch is er nog veel onderzoek te doen naar het gedrag van een menigte in bepaalde situaties. De onderzoeksvraag van dit verslag is als volgt.

Hoe kan het dynamisch gedrag van een menigte worden gemodelleerd met het oog op de doorstroomtijd?

De bijbehorende deelvragen zijn:

1. Welke vorm van een ruimte kan de doorstroom van een menigte verbeteren?
2. Wat is de invloed van paniek op de doorstroom van een menigte en hoe kan deze paniek gedefinieerd worden?
3. Welke invloed heeft het aantal personen op de optimale doorstroomtijd bij een gegeven vormgeving van een ruimte?

### **Toelichting**

Bij deelvraag 1 zal gekeken worden welke vormgeving van de ruimte de doorstroom van een menigte zal verbeteren. Hierbij wordt gekeken naar bijvoorbeeld het plaatsen van pilaren in een ruimte of naar de grootte van de uitgang en wat de invloed is van deze factoren op de doorstroomtijd van een menigte.

Het antwoord op deelvraag 2 zal meer kennis geven over de invloed van paniek op de doorstroom van een menigte. De vraag is of paniek voor een betere doorstroom zorgt of juist zorgt voor opstoppingen en daarmee voor een slechtere doorstroom, maar ook bij welke ‘mate van paniek’ de doorstroom optimaal is.

# Hoofdstuk 2

## Voetgangersmodel

Op tweedimensionale schaal is het mogelijk om het gedrag van personen op eenvoudige wijze te modelleren en te simuleren. In dit hoofdstuk wordt een mogelijk model hiervoor beschreven.

### 2.1 Modelomschrijving

Personen worden in ons model gemodelleerd als een cirkel met straal  $r$ . Het aantal personen wordt weergegeven met  $n$ . De beweging van een persoon is te beschrijven met de tweede wet van Newton;  $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ . Hierbij is  $\mathbf{F}$  de totale kracht uitgeoefend op één persoon,  $m$  de massa en  $\mathbf{a}$  de versnelling. In het model ziet deze formule eruit zoals formule (2.1).

$$\mathbf{F} = \sum \mathbf{F}_{\text{muur}} + \sum \mathbf{F}_{\text{buur}} + \mathbf{F}_{\tau} = m\mathbf{a}. \quad (2.1)$$

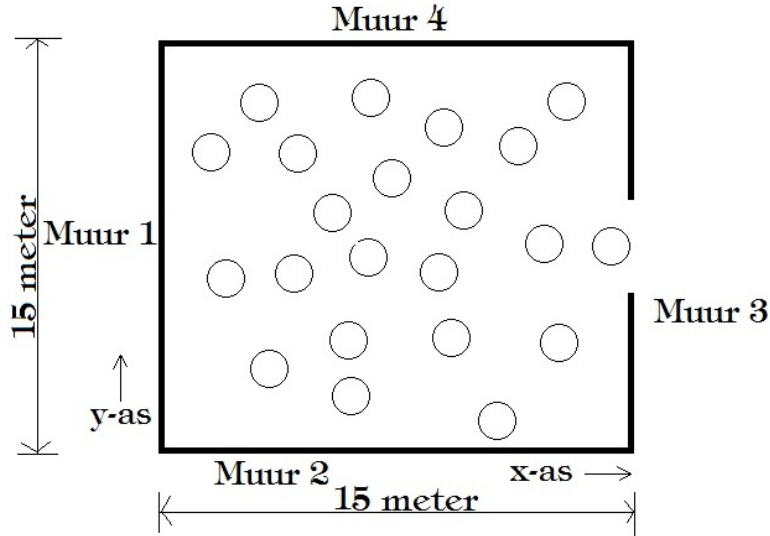
De kracht  $\mathbf{F}$  is opgebouwd uit verschillende krachten, dit zijn de krachten die werken op een persoon. De aanname is dat een gemodelleerd persoon zich maar aan drie regels houdt. De eerste regel is dat men liever niet tegen de muur aanloopt. Daarnaast wil de persoon niet te dicht bij andere personen lopen en ten derde wil hij met de gewenste snelheid naar de uitgang. Alle drie deze regels laten zich vertalen in krachten die zijn uit te drukken in formules. In figuur 2.1 is te zien hoe de kamer eruit ziet in het model.

De eerste formule is de wens van de persoon om niet tegen de muur aan te lopen, deze heet de ‘muurkracht’. In [1] wordt deze kracht als volgt gedefinieerd,

$$\mathbf{F}_{\text{muur}}(i, w) = (Ae^{\frac{r_i - d_{i,w}}{B}} + KG(\rho))\mathbf{n}_w - \kappa G(\rho)(\mathbf{v}_i \cdot \mathbf{T}_{i,w})\mathbf{T}_{i,w}. \quad (2.2)$$

In (2.2) zijn  $A$ ,  $B$ ,  $K$  en  $\kappa$  constantes. De straal van persoon  $i$  wordt weergegeven met  $r_i$ . De afstand van het middelpunt van persoon  $i$  naar de muur met het nummer  $w$  is  $d_{i,w}$ . In de formule staat  $\mathbf{v}_i$  voor de snelheidsvector van persoon  $i$ . Daarnaast staat in de formule de factor  $(\mathbf{v}_i \cdot \mathbf{T}_{i,w})\mathbf{T}_{i,w}$ , dit is de wrijvingskracht die tussen de muur en persoon  $i$  werkt. Daarbij is  $\mathbf{T}_{i,w}$  de genormaliseerde vector loodrecht op de normaal  $\mathbf{n}_w$ . Deze kracht is alleen werkzaam als persoon  $i$  tegen de muur aanloopt. De constante  $\kappa$  is de wrijvingsconstante. Verder is  $\mathbf{n}_w$  de normaalvector die uit muur  $w$  de ruimte inwijst. Als persoon  $i$  daadwerkelijk de muur raakt wil hij erg graag van de muur weg. De kracht die daarbij komt kijken is dan groot, dit wordt gemodelleerd door de functie  $G$  en constante



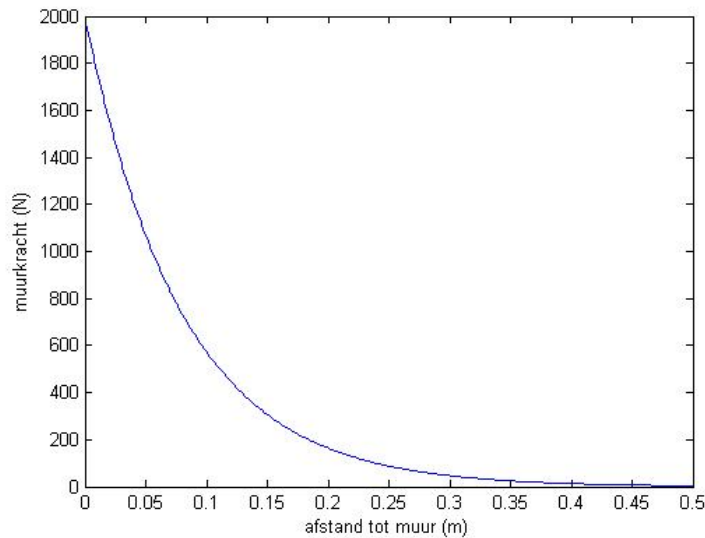


Figuur 2.1: De gemodelleerde kamer, met een grootte van 15 m bij 15 m. De y-as is muur 1, de x-as is muur 2. De deur zit in het midden van muur 3 en is 1 m breed.

$K$ . Daarbij is  $G$  gelijk aan functie (2.3) en  $\rho$  gelijk aan  $r_i - d_{i,w}$ , [1].

$$G(\rho) = \begin{cases} 0 & \rho < 0 \\ \rho & \rho \geq 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

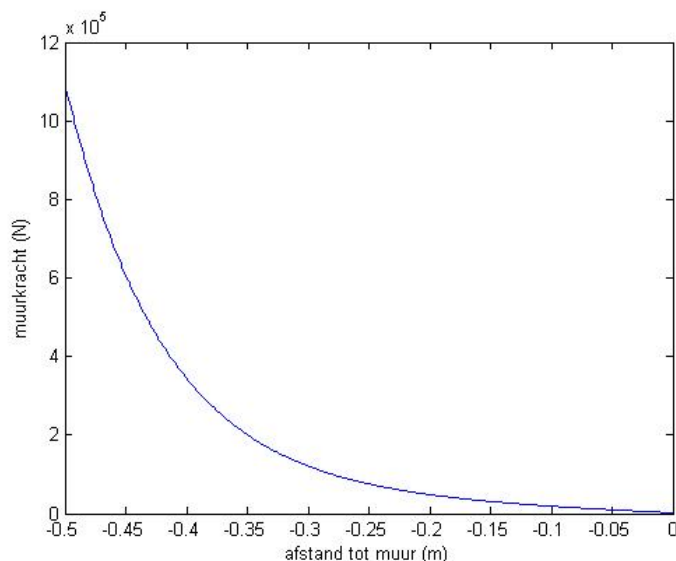
In figuur 2.2 is te zien hoe de muurkracht zich gedraagt naarmate een persoon dichterbij een muur komt. Hierbij zijn de overige krachten niet meegenomen.



Figuur 2.2: De muurkracht uitgezet tegen de afstand tot de muur, voor één persoon. Hierbij hebben de constantes de volgende waarden  $A = 2.0 \cdot 10^3$ ,  $B = 0.08$ ,  $K = 1.2 \cdot 10^5$ ,  $\kappa = 2.4 \cdot 10^5$ ,  $G(\rho) = 0$ ,  $v_0 = 1$ ,  $\mathbf{F}_{\text{muur}}(i, w)$  staat op de y-as en  $r_i - d_{i,w}$  staat op de x-as.

De functie in figuur 2.2 houdt op zodra de persoon de muur raakt (afstand tot de muur

is dan 0). In figuur 2.3 is te zien wat er gebeurt als de persoon de muur raakt en tegen de muur aangedrukt wordt. Zodra de persoon de muur raakt wordt de muurkracht zeer groot.



Figuur 2.3: De muurkracht uitgezet tegen de afstand tot de muur, voor één persoon. Hierbij hebben de constantes de volgende waarden  $A = 2.0 \cdot 10^3$ ,  $B = 0.08$ ,  $K = 1.2 \cdot 10^5$ ,  $\kappa = 2.4 \cdot 10^5$ ,  $G(\rho) = r_i - d_{i,w}$ ,  $v_0 = 1$ ,  $\mathbf{F}_{\text{muur}}(i, w)$  staat op de y-as en  $r_i - d_{i,w}$  staat op de x-as.

De tweede wens van een persoon is om niet te dicht bij andere personen te komen. Iedereen heeft zo zijn eigen ‘comfortzone’, een ruimte om een persoon heen waarin het niet meer fijn is als daar iemand in staat. Deze wens is net als de muurkracht uitgedrukt in een kracht. Deze kracht heet de ‘buurkracht’. De formule voor de buurkracht is erg vergelijkbaar met de formule voor de muurkracht, [1],

$$\mathbf{F}_{\text{buur}}(i, j) \stackrel{i \neq j}{=} \left( A e^{\frac{(r_i + r_j) - d_{i,j}}{B}} + K G(\rho) \right) \mathbf{n}_{i,j} + \kappa G(\rho) \Delta_{v_j, i} \mathbf{T}_{i,j}, \quad (2.4)$$

$$\mathbf{F}_{\text{buur}}(i, i) = 0. \quad (2.5)$$

De constanten uit deze formule zijn respectievelijk  $A$ ,  $B$ ,  $K$  en  $\kappa$  en hebben dezelfde waarden als in de formule voor muurkracht, formule (2.2). In formule (2.4) geeft  $d_{i,j}$  de afstand tussen het middelpunt van persoon  $i$  en het middelpunt van persoon  $j$  weer. De normaalvector die wijst vanuit persoon  $i$  naar persoon  $j$  heet  $\mathbf{n}_{i,j}$ . Ook in formule (2.4), zorgt de functie  $G(\rho)$  ervoor dat, wanneer twee personen elkaar raken, de kracht om van elkaar weg te lopen erg groot wordt. Dus  $G(\rho)$  is gelijk aan 0 als de personen elkaar niet raken en  $G(\rho)$  is gelijk aan  $\{(r_i + r_j) - d_{i,j}\}$  als de personen elkaar wel raken. Als personen elkaar raken zal de term  $\kappa G(\rho) \Delta_{v_j, i} \mathbf{T}_{i,j}$  zorgen voor een wrijvingskracht, de personen ‘schuren’ alswaare. Er geldt  $\Delta_{v_j, i} = (\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i) \cdot \mathbf{T}_{i,j}$ , dit is het snelheidsverschil geprojecteerd op de vector loodrecht op de normaal van persoon  $i$  naar  $j$ . De grafiek die bij deze formule hoort is nagenoeg gelijk aan de grafiek die hoort bij de formule (2.2).

De derde wens van de personen is om naar de uitgang van de kamer of naar het einde van de gang te lopen. Daarbij hebben personen een gewenste snelheid. (Iedereen heeft immers

een soort van standaard snelheid waarop hij/zij loopt). De kracht die dit modelleert heet  $\mathbf{F}_\tau$  en is in [1] gedefinieerd als,

$$\mathbf{F}_\tau(i) = \frac{m}{\tau} \left( v_0 \frac{\mathbf{e}_0 - \mathbf{p}_i}{\|\mathbf{e}_0 - \mathbf{p}_i\|} - \mathbf{v}_i \right). \quad (2.6)$$

In formule (2.6) is  $m$  de massa en  $\tau$  een tijdconstante die aangeeft hoe snel de gewenste snelheid bereikt wordt. De gewenste snelheid van persoon  $i$  is weergegeven als  $v_0$  en in het model voor alle personen gelijk gekozen. De uitgang of het einde van de gang is in de formule weergegeven als  $\mathbf{e}_0$ , dit zijn de coördinaten van de (eind)bestemming. Op een bepaald moment heeft persoon  $i$  een bepaalde locatie  $\mathbf{p}_i$ . De snelheid van de persoon  $i$  is  $\mathbf{v}_i$ . De grootte  $\mathbf{F}_\tau$  is vrijwel alleen afhankelijk van de snelheid. Als de snelheid van persoon  $i$  kleiner wordt dan de gewenste snelheid, wordt  $\mathbf{F}_\tau$  groter in de richting van de uitgang. Bij een hogere snelheid dan de gewenste snelheid is de kracht in de tegenovergestelde richting, [1].

Daarnaast zit er in  $\mathbf{F}_\tau(i)$  ook een tijdconstante ingebouwd, namelijk de tijd die persoon  $i$  nodig heeft om op de gewenste snelheid te komen. Dit is goed te zien als  $\mathbf{F}_\tau$  wordt beschouwd als enige kracht en  $\mathbf{F}_{\text{muur}}$  en  $\mathbf{F}_{\text{muur}}$  even buiten beschouwing worden gelaten. De versnelling is gelijk aan de afgeleide van de snelheid,  $\dot{v}$ . Nadat  $m$  is weggestreept geeft dat,

$$\dot{v} = \frac{1}{\tau} (v_0 - v). \quad (2.7)$$

Hierbij is  $\frac{\mathbf{e}_0 - \mathbf{p}_i}{\|\mathbf{e}_0 - \mathbf{p}_i\|}$  weggelaten omdat dit een versimpeling is naar een eendimensionaal model. De bovenstaande differentiaalvergelijking geeft de oplossingen (2.8).

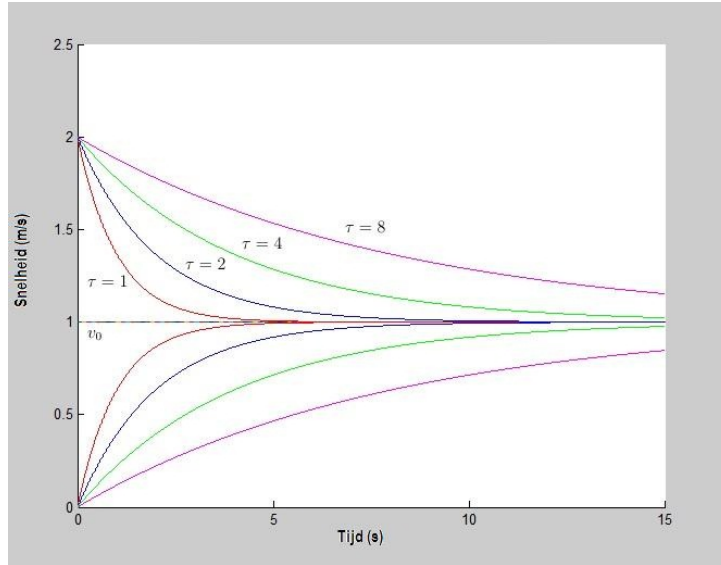
$$v(t) = v_0 + c_1 e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (2.8)$$

$$c_1 = v(0) - v_0 \quad (2.9)$$

Op tijdstip  $\tau$  is  $e^{-\frac{t}{\tau}}$  gelijk aan  $\frac{1}{e} \approx 0.37$ . Formule (2.8) in acht genomen betekent dit dat de afwijking van de gewenste snelheid na  $\tau$  seconden is afgenomen met ongeveer 63 procent. In figuur 2.4 is te zien hoe de snelheid zich gedraagt bij verschillende  $\tau$ .

### 2.1.1 Damping

Het model tot dusver beschreven is grotendeels gebaseerd op het model van [1]. Als een persoon in het model, beschreven in paragraaf 2.1, tegen de muur aanloopt, wordt de kracht die deze persoon van de muur afstuurt erg groot. Dit is goed te zien in grafiek 2.3. Door de krachten die de burens uitoefenen op deze persoon wordt de persoon weer terug naar de muur gestuurd, hij gedraagt zich dan als een soort stuiterbal of veer. Wanneer twee personen op gelijke afstand van de muur zijn en de ene persoon stilstaat en de andere persoon op de muur afloopt, is het vreemd dat beide dezelfde tegenkracht van de muur ondervinden. Dit is niet realistisch dus is het handig om een bepaalde damping in te bouwen. De damping moet worden toegevoegd aan de kracht tussen de personen en de muur, tussen personen en objecten en tussen personen en andere personen. Van een veer is het bekend hoe deze te dempen is. Het dempen van dit stuitereffect van personen wordt, in dit model, op dezelfde manier ingebouwd. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een kracht die gerelateerd is aan de snelheid van de persoon. Een persoon die met een



Figuur 2.4: Snelheidsverloop van  $v_i$  naar  $v_0 = 1$  voor verschillende waarden van  $\tau$ , met beginsnelheden  $v_i(0) = 2$  of  $0$ . De tijd staat op de x-as en de snelheid op de y-as. Daarnaast geldt  $m = 80$  kg.

hogere snelheid op de muur afloopt wordt dan harder geremd dan een persoon die met een lagere snelheid op de muur afloopt.

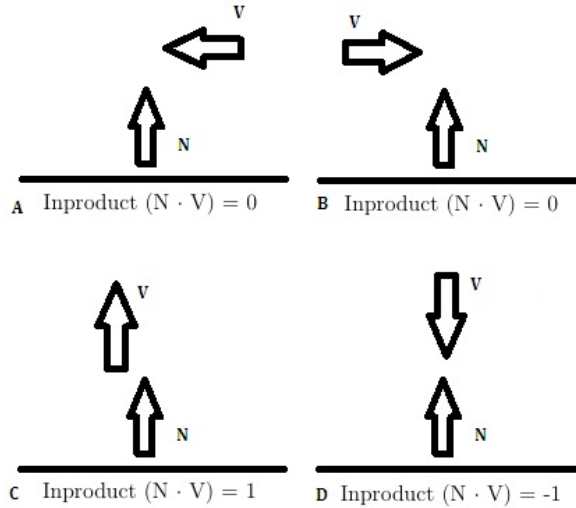
Om het stuitereffect te dempen wordt een krachtterm toegevoegd aan formule (2.2) die gerelateerd is aan de snelheid en afstand tot de muur. In formule (2.10) is te zien hoe deze term is verwerkt in de formule voor de muurkracht.

$$\mathbf{F}_{\text{muur, gedempt}}(i, w) = \left( A e^{\frac{r_i - d_{i,w}}{B}} + KG(\rho) - (\mathbf{v}_i \cdot \mathbf{n}_w) \zeta e^{r_i - d_{i,w}} \right) \mathbf{n}_w - \kappa G(\rho) (\mathbf{v}_i \cdot \mathbf{T}_{i,w}) \mathbf{T}_{i,w}. \quad (2.10)$$

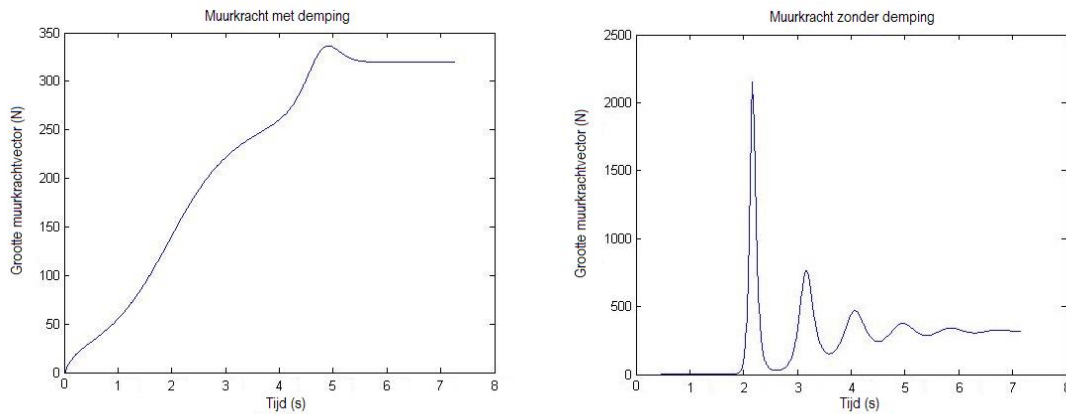
De meeste variabelen en constanten in formule (2.10) zijn al toegelicht bij formule (2.2). De dempingsconstante in de formule wordt weergegeven met  $\zeta$ . De term  $e^{r_i - d_{i,w}}$  betekent dat demping ook afstandsafhankelijk is. Als een persoon dichtbij de muur is en een hoge snelheid heeft, zal deze persoon dus ook snel afremmen. De factor  $-\mathbf{v}_i \cdot \mathbf{n}_w$  gedraagt zich zoals geïllustreerd in figuur 2.5. De waarde van  $\zeta$  is gevonden door meerdere simulaties uit te voeren en een  $\zeta$  te kiezen die zorgt voor een realistisch ogende demping. In figuur 2.6 is goed te zien wat het effect van de demping is. In figuur 2.5 is te zien dat de factor het grootst is als de persoon naar de muur toe loopt, maar ook is te zien dat deze factor het weer van de muur afstuiten tegen gaat door een negatieve factor te worden als de persoon van de muur af loopt. Dit betekent wel dat alle personen die van de muur af lopen (zoals in figuur 2.5 c)) een lichte aantrekkende kracht van de muur ervaren. Hierdoor wordt het stuiten nog extra gedempt.

## Demping bij personen

In paragraaf 2.1.1 werd uitgelegd hoe demping bij de muur werkt. Demping bij een obstakel wordt uitgelegd in paragraaf 2.1.4. Om demping te kunnen inbouwen bij personen moet gebruik worden gemaakt van de relatieve snelheid. Demping werkt immers sterker



Figuur 2.5: Schematische weergave van de verschillende looprichtingen van persoon  $i$  met de daarbij horende uitkomst van het inproduct van  $\mathbf{n}_w$  en  $\mathbf{v}_i$ . Daarnaast geldt dat de snelheidsvector genormaliseerd is voor de vereenvoudiging.



Figuur 2.6: Verloop van de grootte van de muurkracht op persoon  $i$  uitgezet tegen de tijd. In dit scenario is er één persoon die tegen de muur aan wil lopen. Hierbij geldt  $v_0 = 2$ ,  $\zeta = 200$  en de waardes van de overige gebruikte constanten zijn terug te vinden in hoofdstuk 7.

als de relatieve snelheid hoger is. Alleen het probleem bij relatieve snelheid van persoon  $i$  en persoon  $j$  is dat deze relatieve snelheid weinig zegt over de richting die ze hebben en of er de mogelijkheid is dat ze gaan botsen. Dus alleen dempen op de relatieve snelheid is niet handig omdat er dan ook personen worden gedempt die in tegengestelde richting lopen. Een andere mogelijkheid is dan nog rekening houden met de locatie en richting. Alleen het probleem hiervan is dat met deze gegevens niet zeker is of twee personen ook daadwerkelijk gaan botsen. Als twee personen niet botsen hoeft hun snelheid niet gedempt te worden. Het inbouwen van demping bij personen is daarom complex. Het kan namelijk ook zo zijn dat persoon  $i$  met een hoge snelheid op persoon  $j$  afloopt maar dat persoon  $j$  dan misschien net door andere krachten al op een andere locatie is op het moment van botsing. Het zou in dat geval niet realistisch zijn om persoon  $i$  in zijn snelheid te dempen.

Zie verder hiervoor hoofdstuk 6.

## 2.1.2 Randomkracht

In sommige gevallen ontstaat er een evenwicht van bijvoorbeeld twee personen die tegelijk door de deuropening willen lopen. In dit geval heffen de onderlinge krachten elkaar op. Dit is geen realistische situatie, daarom is aan het model de ‘randomkracht’ toegevoegd. Deze randomkracht wordt weergegeven als  $\mathbf{F}_{\text{random}}$ ,

$$\mathbf{F}_{\text{random}} = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

De getallen  $a$  en  $b$  worden ongecorreleerd en uniform getrokken uit het interval  $[-10, 10]$ . In formule (2.12) is te zien hoe de totale kracht  $\mathbf{F}$  er dan uitziet. Gemiddeld is de toegevoegde randomkracht  $[0, 0]_T$ .

$$\mathbf{F} = \sum \mathbf{F}_{\text{muur}} + \sum \mathbf{F}_{\text{buur}} + \mathbf{F}_{\tau} + \mathbf{F}_{\text{random}}. \quad (2.12)$$

De grootte van deze kracht is aan de hand van simulaties vastgesteld. In paragraaf 3.3.5 wordt dit verder toegelicht.

## 2.1.3 Snelheidsbegrenzing

In figuur 2.3 is te zien dat de krachten die een persoon van de muur af sturen erg groot kunnen worden. Dit resulteert in een zeer grote versnelling en kan door de discretisatie zorgen voor een zeer hoge snelheid die een persoon krijgt. Dit kan oplopen tot snelheden van 200 m/s. Helaas is dit niet meer realistisch. Daarom wordt er een begrenzing aan het model toegevoegd die ervoor zorgt dat de snelheid een maximum heeft van  $v_{\text{begrensd}}$ . Zodra de krachten zo groot worden dat de snelheid boven de maximale snelheid komt zal de nieuwe snelheid gelijk worden gesteld aan de maximale snelheid, in formule (2.13) is te zien hoe dit gebeurt. Hierbij staat  $\mathbf{v}_{i,\text{oud}}$  voor de oude snelheid, die ten gevolge van de krachten groter zou worden dan  $v_{\text{begrensd}}$ . De nieuwe snelheid is  $\mathbf{v}_{i,\text{nieuw}}$ .

$$\mathbf{v}_{i,\text{nieuw}} = v_{\text{begrensd}} \frac{\mathbf{v}_{i,\text{oud}}}{\|\mathbf{v}_{i,\text{oud}}\|}. \quad (2.13)$$

## 2.1.4 Obstakels

Uitgaande van het model beschreven in paragraaf 2.1 kunnen ook objecten in de ruimte worden geplaatst waar personen omheen moeten lopen. Deze objecten zijn bijvoorbeeld pilaren. De krachten die werken op een persoon vanaf de pilaar zijn vergelijkbaar met de kracht van de muur die op een persoon werkt. Personen willen immers, net als tegen muren, niet tegen pilaren oplopen. De pilaar  $o$  wordt vormgegeven als een rondje met straal  $R_o$ . De totale kracht  $\mathbf{F}$  wordt dan aangevuld met een extra kracht.

$$\mathbf{F} = \sum \mathbf{F}_{\text{muur}} + \sum \mathbf{F}_{\text{buur}} + \mathbf{F}_{\tau} + \mathbf{F}_{\text{random}} + \sum \mathbf{F}_{\text{object}}. \quad (2.14)$$

Personen willen niet tegen de pilaren oplopen en zullen dus met een bepaalde kracht van de pilaar afgestuurd worden. Er kunnen zich meerdere pilaren in de ruimte bevinden. De formule voor de kracht van de objecten is formule (2.15). Formule (2.15) is vergelijkbaar met formule (2.2).

$$\mathbf{F}_{\text{object}}(i, o) = (Ae^{\frac{-d_{i,o}+r_i+R_o}{B}} + KG(\rho))\mathbf{n}_{i,o} - \kappa G(\rho)(\mathbf{v}_i \cdot \mathbf{T}_{i,o})\mathbf{T}_{i,o}. \quad (2.15)$$

In formule (2.15) hebben  $A$ ,  $B$ ,  $K$  en  $\kappa$ , dezelfde waarden als in  $\mathbf{F}_{\text{muur}}$ . De afstand tussen het middelpunt van persoon  $i$  en het middelpunt van de pilaar  $o$  is  $d_{i,o}$ . Daarnaast is  $r_i$  de straal van de persoon  $i$ . Net als in de formule (2.2) zorgt  $K$  er samen met  $G$  voor dat de kracht groot wordt als persoon  $i$  pilaar  $o$  raakt. Daarbij is  $G$  gelijk aan 0 als persoon  $i$  niet tegen de rand van de pilaar aanzit en gelijk aan  $(-d_{i,o} + r_i + R_o)$  als persoon  $i$  wel tegen de rand van de pilaar aanzit. De snelheid van persoon  $i$  is  $\mathbf{v}_i$ . De term  $\kappa G(\rho)(\mathbf{v}_i \cdot \mathbf{T}_{i,o})\mathbf{T}_{i,o}$  is wederom de wrijvingskracht. De vector  $\mathbf{T}_{i,o}$  is de genormaliseerde vector loodrecht op de richtingsvector van persoon  $i$ . De normaal  $\mathbf{n}_{i,o}$  is de normaalvector die vanuit het middelpunt van pilaar  $o$  de ruimte in wijst in de richting waar de persoon vandaan komt.

## Demping bij obstakels

Zoals gezegd moet er ook demping worden ingebouwd in de kracht die werkt vanaf een obstakel naar een persoon. Als een persoon met een hoge snelheid richting een obstakel loopt kan hetzelfde stuitereffect optreden als bij een muur. Daarom is het ook van belang een demping in het model te bouwen voor de obstakels. Formule (2.15) komt er dan uit te zien als formule (2.16).

$$\mathbf{F}_{\text{object, gedempt}}(i, o) = (Ae^{\frac{-d_{i,o}}{B}} + KG(\rho) - (\mathbf{v}_i \cdot \mathbf{n}_{i,o})\zeta e^{-d_{i,o}})\mathbf{n}_{i,o} - \kappa G(\rho)(\mathbf{v}_i \cdot \mathbf{T}_{i,o})\mathbf{T}_{i,o}. \quad (2.16)$$

Doordat een obstakel aan dezelfde voorwaarden moet voldoen als een muur, zal een obstakel op dezelfde manier een dempende kracht hebben als de muur.

### 2.1.5 Verdrinking

Personen kunnen maar een bepaalde hoeveelheid fysieke kracht verdragen. Bij ernstige panieksituaties komt het dan ook wel eens voor dat er personen overlijden of gewond raken doordat ze verdrukt worden door de menigte. Een persoon wordt verdrukt als de som van alle fysieke krachten die op deze persoon werken gedeeld door zijn omtrek, groter wordt dan  $1600\frac{N}{m}$ , [1]. Deze kracht wordt weergegeven met  $F_{\gamma,i}$ . De personen die overlijden worden objecten die hinder opleveren. Deze personen worden vanaf dan gemodelleerd als objecten zoals beschreven in paragraaf 2.1.4. Het verschil tussen gewonde mensen en objecten is dat men over gewonde mensen heen kan stappen maar niet door objecten heen kan. Dit wordt gedaan door de afstotende kracht van gewonde mensen kleiner te maken dan de afstotende kracht van het object. Bij een zeer hoge kracht kan men dan alswaare door het object heen.

Als persoon  $i$  wordt gesimuleerd ervaart hij een aantal krachten. Personen oefenen krachten op hem uit, maar ook muren en objecten. Dit zijn geen daadwerkelijke krachten maar een soort ‘denkbeeldige’ krachten die een persoon ergens toe doen bewegen. Het is zo

dat deze ‘denkbeeldige’ krachten geen fysieke schade kunnen toebrengen. Daarom worden deze krachten niet meegenomen in het berekenen van de fysieke kracht. De fysieke kracht,  $F_{\gamma,i}$  is de som van de norm van alle afzonderlijke krachten die gaan werken zodra een persoon daadwerkelijk een ander persoon of de muur raakt. De formule is te zien in (2.17).

$$F_{\gamma} = \begin{cases} 0 & \text{als } \rho < 0 \\ \|\mathbf{F}_{\text{buur}}\| + \|\mathbf{F}_{\text{muur}}\| + \|\mathbf{F}_{\text{object}}\| & \text{als } \rho \geq 0 \end{cases} \quad (2.17)$$

## 2.2 Bewegingsmodel

De krachten op een persoon zijn nu bekend, dus kan er berekend worden hoe personen zich bewegen. Een model voor hoe personen zich bewegen is hieronder weergegeven.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} p_{i,x} \\ p_{i,y} \\ v_{i,x} \\ v_{i,y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{i,x} \\ v_{i,y} \\ F_{i,x}/m \\ F_{i,y}/m \end{bmatrix}. \quad (2.18)$$

Deze differentiaalvergelijking is de continue weergave van het model. Hierbij is  $p_{i,x}$  de x-coördinaat en  $p_{i,y}$  de y-coördinaat van de positie van persoon  $i$ . Daarnaast staat  $v_{i,x}$  en  $v_{i,y}$  voor de afgeleiden van de plaats dus de snelheid respectievelijk in de  $x$  en  $y$  richting van persoon  $i$ . De totaalcrachten (alle krachten bij elkaar opgeteld) in  $x$  en  $y$  richting worden weergegeven met  $F_{i,x}$  en  $F_{i,y}$ . Wederom wordt met  $m$  de massa bedoeld. In formule (2.19) zijn de begincondities van dit probleem gegeven. De coördinaten van de geïnitieerde beginpositie van persoon  $i$  zijn  $(p_{i,x,0}, p_{i,y,0})$ . De geïnitieerde beginsnelheid van persoon  $i$  met bijbehorende richting is  $(v_{i,x,0}, v_{i,y,0})$ .

$$\begin{bmatrix} p_{i,x}(0) \\ p_{i,y}(0) \\ v_{i,x}(0) \\ v_{i,y}(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{i,x,0} \\ p_{i,y,0} \\ v_{i,x,0} \\ v_{i,y,0} \end{bmatrix}. \quad (2.19)$$

Bij het simuleren van de personen wordt gebruik gemaakt van Matlab. Bovenstaande differentiaalvergelijking is behoorlijk complex, daarom is besloten om bij het simuleren eerst deze differentiaalvergelijking discreet te maken. Matlab rekent dan elke tijdstap het model door en berekent dus de nieuwe positie en snelheid van persoon  $i$ . Met behulp van formules (2.20) en (2.21) update Matlab steeds de positie en snelheid van persoon  $i$ .

$$p_{i,\text{nieuw}} = p_{i,\text{oud}} + v_{i,\text{oud}}\Delta_t. \quad (2.20)$$

$$v_{i,\text{nieuw}} = v_{i,\text{oud}} + \frac{\mathbf{F}}{m}\Delta_t. \quad (2.21)$$

Na deze berekening wordt de tijd  $t$  met tijdstap  $\Delta_t$  opgehoogd en dezelfde formules weer uitgerekend.

### 2.2.1 Botsing

Wanneer een persoon in aanraking komt met de muur of een andere persoon, komen er enorme krachten vrij, zie formule (2.2). Om deze krachten goed om te zetten naar een



discreet model, moet  $\Delta_t$  erg klein gekozen worden, wat veel rekentijd kost. Een manier om dit enigszins te versimpelen is door een persoon direct stil te laten staan zodra hij ergens tegenaan loopt. Alleen de snelheid in de richting van de botsing zal dan op 0 gezet worden. Allereerst zal er worden bekeken wanneer er sprake is van contact.

In het model voor één persoon zonder wrijving en zonder contact met de muur is formule (2.2) te versimpelen tot formule (2.22).

$$\mathbf{F}_{\text{muur}}(x) = Ae^{\frac{r-x}{B}}. \quad (2.22)$$

In formule (2.22) is  $x$  de afstand tot de muur en  $r$  de straal van de persoon. De kracht  $\mathbf{F}_{\text{muur}}(x)$  is enkel afhankelijk van  $x$  en is daarom een conservatief krachtveld. De potentiaal  $U(x)$  van dit krachtveld is de negatieve primitieve van het veld.

$$U(x) = AB e^{\frac{r-x}{B}}. \quad (2.23)$$

De mechanische energie van dit systeem is de potentiële energie plus de kinetische energie. De mechanische energie is in dit geval constant als functie van tijd, omdat er geen sprake is van wrijving of demping. Dit levert de volgende formule.

$$E_{\text{mechanisch}} = U(x) + \frac{1}{2}mv^2. \quad (2.24)$$

Het verschil in potentiële energie tussen aanraking met de muur ( $x = r$ ) en totaal geen interactie ( $x = \infty$ ) is te zien in formule (2.25).

$$U(r) - U(\infty) = AB - 0. \quad (2.25)$$

Wanneer de kinetische energie bij  $x = \infty$  groter is dan  $AB$ , zal er bij contact met de muur ( $x = r$ ) nog kinetische energie over zijn (omdat de mechanische energie constant moet blijven) en zal de persoon dus verder de muur in gedrukt worden. De snelheid waarbij de persoon de muur precies raakt (de kinetische energie is dan  $AB$ ) is  $v_{\text{contact, muur}}$ .

$$v_{\text{contact, muur}} = \sqrt{\frac{2AB}{m}}. \quad (2.26)$$

Met de keuze van  $A = 2000$ ,  $B = 0.08$  en  $m = 80$  geldt  $v_{\text{contact, muur}} = 2$ .

Voor een botsing tussen twee personen kan  $v_{\text{contact, buur}}$  op dezelfde manier worden afgeleid. Wanneer twee personen met dezelfde snelheid op elkaar af komen lopen geldt formule (2.22), behalve dat de afstand tussen de twee personen eigenlijk dubbel zo snel klein wordt. Dit omdat de buur niet stilstaat (zoals de muur), maar met dezelfde snelheid in de richting van de persoon gaat. Dit levert formule (2.27).

$$\mathbf{F}_{\text{buur}}(x) = Ae^{\frac{r-x}{2B}}. \quad (2.27)$$

Hieruit volgt formule (2.28), op dezelfde manier als bij  $v_{\text{contact, muur}}$ .

$$v_{\text{contact, buur}} = \sqrt{\frac{4AB}{m}}. \quad (2.28)$$

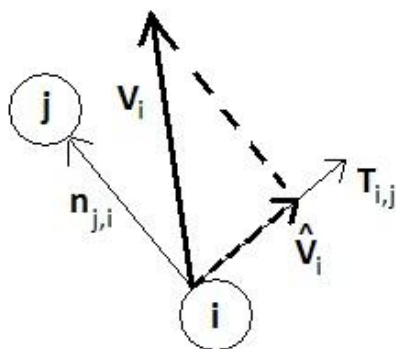
Blijkbaar zullen (met dezelfde constantes) twee buren elkaar precies raken wanneer hun relatieve snelheid gelijk is aan  $2\sqrt{2}$  m/s. Op het eerste ogenblik is het misschien verrassend dat deze snelheid niet gelijk is aan 2 m/s, zoals bij de muurkracht. Toch is het duidelijk dat de contactsnelheid groter moet zijn als een persoon bekeken wordt die met 2 m/s op een buur affloopt. Wanneer deze buur stil zou blijven staan, zoals een muur, zal hij deze precies raken. De buur zal zich echter van de naderende persoon afbewegen, waardoor een hogere snelheid nodig is om deze precies te raken.

Zoals beschreven in paragraaf 2.1.1 wordt de muurkracht echter versterkt door een demping, waardoor de mechanische energie niet meer constant blijft. Hierdoor zal contact met de muur alleen nog maar voorkomen bij (veel) hogere snelheden dan de contactsnelheid. In paragraaf 2.1.1 wordt ook beschreven dat demping bij de buurkracht niet wordt meegenomen in het model. Hierdoor zullen tussen buren wel botsingen voorkomen, namelijk zodra de relatieve snelheid boven de  $2\sqrt{2}$  m/s ligt.

Zoals beschreven aan het begin van deze paragraaf is discretiseren vervelend bij grote krachten die vrijkomen bij een botsing. Daarom is er voor gekozen om bij een botsing tussen twee personen de snelheden gelijk te stellen aan nul, zodat ze in één tijdstap stil staan. Dit is in de praktijk ook realistischer, omdat in de werkelijkheid mensen ook maar erg gering in elkaar kunnen worden gedrukt en ze bij een botsing vaak direct stil staan. Wiskundig gezien ziet dit er uit zoals in formule (2.29).

$$\hat{\mathbf{v}}_i = \begin{cases} (\mathbf{v}_i \cdot \mathbf{T}_{i,j})\mathbf{T}_{i,j} & d_{i,j} \leq r_i + r_j \text{ en } \mathbf{v}_i \cdot \mathbf{n}_{i,j} \geq 0 \\ \mathbf{v}_i & \text{elders} \end{cases} \quad (2.29)$$

Op deze manier wordt de snelheid in de richting van de andere buur gelijkgesteld aan nul en de graduele snelheid geprojecteerd op de vector die loodrecht staat op de vector van persoon  $i$  naar persoon  $j$ . De schematische weergave hiervan is terug te vinden in figuur 2.7.



Figuur 2.7: Schematisch figuur hoe de graduele snelheid geprojecteerd wordt op de vector die loodrecht staat op de vector van persoon  $i$  naar persoon  $j$ .

## 2.3 Paniek

Het gewoon simuleren van een menigte in een ruimte is stap één, maar het simuleren van een menigte in een panieksituatie zorgt voor enkele aanpassingen. Zodra personen in paniek raken beginnen ze te duwen en worden ze ongeduldig. Er zijn meerdere manieren om een panieksituatie te simuleren.

### 2.3.1 Verhoogde gewenste snelheid

Als er een panieksituatie optreedt, bijvoorbeeld bij een brand, willen alle personen sneller de kamer uit. De gewenste snelheid zal hierbij omhoog gaan. Hierdoor gaat ook de kracht om naar de uitgang te lopen omhoog en zullen de personen sneller naar de uitgang lopen. Het gevolg hiervan is dat er een opstopping kan ontstaan bij de deur en dat er zelfs personen verdrukt kunnen worden. Eigenlijk modelleren alle modellen paniek door aanpassing van  $v_0$ . De panieksimulaties variëren in de manier waarop  $v_0$  wordt aangepast.

### 2.3.2 Paniekparameter

Een manier om een panieksituatie te simuleren is met behulp van de paniekparameter  $\theta_i(t)$ . Deze parameter geeft aan hoe ongeduldig persoon  $i$  is en is tijdsafhankelijk. In [1] is deze paniekparameter als volgt gedefiniëerd.

$$\theta_i(t) = 1 - \frac{\bar{v}_i(t)}{v_{i,0}(t)}. \quad (2.30)$$

In formule (2.30) geeft  $\theta_i(t)$  aan hoe ‘paniekerig’ persoon  $i$  is op tijdstip  $t$ , hierbij geldt dat  $0 \leq \theta_i(t) \leq 1$ . Naarmate de gemiddelde snelheid in de richting van de uitgang ( $\bar{v}_i(t)$ ) kleiner wordt, dan neemt het paniekgevoel toe. Zodra een persoon op de gewenste snelheid is neemt het paniekgevoel weer af. Maar de gewenste snelheid is afhankelijk van het paniekgevoel. Zodra het paniekgevoel groter wordt, wil men harder lopen. De formule voor de gewenste snelheid in [1] in een panieksituatie is formule (2.31).

$$v_{i,0}(t) = [1 - \theta_i(t)]v_0(0) + \theta_i(t)v_{\max}. \quad (2.31)$$

Formule (2.31) geeft de gewenste snelheid op tijdstip  $t$  voor persoon  $i$ . Daarbij is  $\theta_i(t)$  de paniekparameter voor persoon  $i$  op tijdstip  $t$ . De maximumsnelheid is weergegeven door  $v_{\max}$ . De gewenste snelheid in het begin, voordat er paniek optreedt, is  $v_0(0)$ .

Deze formules zorgen ervoor dat de gewenste snelheid toeneemt naarmate de wachttijd groter wordt. Hoe sneller men de kamer uit kan, hoe geruster men er op is, [1].

### 2.3.3 Paniekfactoren

Een andere manier om paniek te simuleren is met behulp van een formule waarbij  $v_0$  afhankelijk is van verschillende factoren. De factoren die hier invloed hebben op de ‘paniekerigheid’ van persoon  $i$  zijn gemiddelde snelheid en verdrukking. In een panieksituatie

zijn er verschillende factoren die bijdragen aan het ‘paniekgevoel’ van personen in de betreffende situatie. Het is goed voor te stellen dat het paniekgevoel toeneemt als er een persoon bijna of half verdrukt wordt. In ieder geval voelt de persoon die verdrukt wordt steeds meer paniek en wil hij dus sneller de kamer uit. Ook als het lang duurt voordat de personen de kamer kunnen verlaten zorgt dit voor meer ongeduldige mensen en dus uiteindelijk meer paniek. Deze twee factoren dragen dus veel bij aan het ‘paniekgevoel’ van de menigte en zorgen dus voor een hogere gewenste snelheid. Er is voor gekozen om deze twee factoren dezelfde weging te geven. De formule voor het aanpassen van  $v_0$  is te zien bij (2.32).

$$v_{i,0}(t) = 1 + 4 \left[ \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{\bar{v}_i(t)}{v_0(t)} \right) + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{F_{\gamma,i}}{F_{\max}}} \right]. \quad (2.32)$$

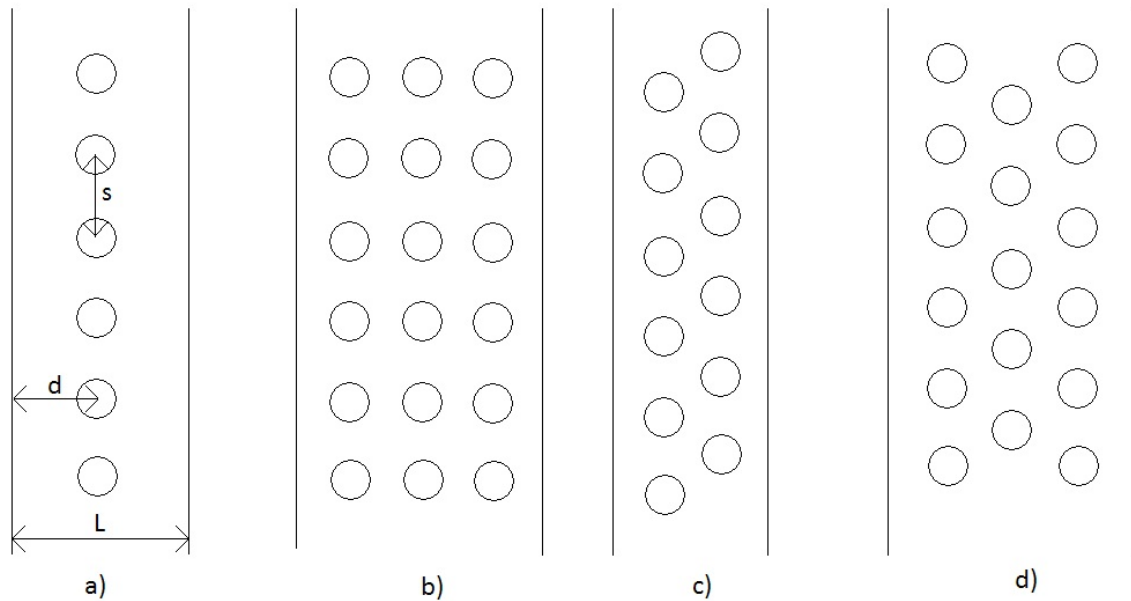
In formule (2.32) staat  $F_{\gamma,i}$  voor de hoeveelheid fysieke kracht die persoon  $i$  voelt. Deze kracht wordt gedeeld door de maximaal verdraagbare kracht  $F_{\max}$ , zodat het getal onder de wortel een getal uit het interval  $[0, 1]$  is. De formule wordt met 4 vermenigvuldigd en er wordt 1 bij opgeteld. Dit om een getal te krijgen tussen 1 en 5 (een realistische snelheid ligt tussen de 1 en de 5 meter per seconde in een panieksituatie). De factor  $1 - \frac{\bar{v}_i(t)}{v_0(t)}$  werkt op dezelfde wijze als (2.30)

## 2.4 Statisch model

Om het gevonden model te analyseren, is het mogelijk om te kijken naar evenwichten van een stroom mensen. Er wordt hier gekeken naar een oneindig lange gang waar alle personen een kracht  $\mathbf{F}_\tau$  in dezelfde richting ervaren. De breedte van de gang wordt weergegeven met  $L$ . De afstand tot de muur van de buitenste personen wordt weergegeven met  $d$  en de afstand tussen de personen in een rij met  $s$ . Dit is te zien in figuur 2.8. Voor de evenwichtsituaties wordt ter vereenvoudiging aangenomen dat de personen punten zijn met een straal van 0 cm. Wanneer voor alle personen de krachten sommeren tot 0 en alle personen dezelfde constante snelheid hebben, is er sprake van een evenwicht. Elke persoon ervaart dan alleen een kracht in dezelfde richting en grootte, waardoor het evenwicht standhoudt. In het meest simpele geval van evenwicht, zie figuur 2.8 a), is er één rij mensen. Het is goed in te zien dat hier een evenwicht ontstaat als  $2d = L$ . De som van de muurkrachten is dan gelijk aan nul, want de krachten van beide muren heffen elkaar op. De som van de buurkrachten is eveneens gelijk aan nul, want voor en achter een bepaalde persoon zijn evenveel mensen, namelijk oneindig. De som van alle krachten is gelijk aan 0, dus is er een evenwicht.

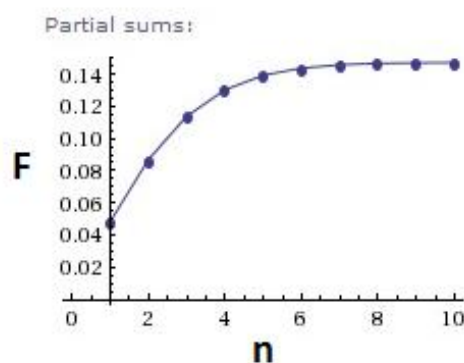
Wanneer er meerdere rijen naast elkaar lopen, zoals in figuur 2.8 b) - d), zijn vanwege de symmetrie de verticale buurkrachten wederom gelijk aan nul. Wanneer de middelste rij precies tussen de muren loopt, is de som van krachten voor deze rij ook gelijk aan nul, dus dat lijkt een goede positie voor de middelste rij. Voor de buitenste rijen moet dan formule (2.33) gelden.

$$Ae^{-\frac{d}{B}} = Ae^{-\frac{L-d}{B}} + Ae^{-\frac{\frac{L}{2}-d}{B}} + 2Ae^{-\frac{L-2d}{B}} + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^n \frac{Ae^{-\frac{\sqrt{(i(\frac{L}{2}-d))^2 + (js)^2}}{B}}}{\sqrt{\left(\frac{js}{i(\frac{L}{2}-d)}\right)^2 + 1}}. \quad (2.33)$$



Figuur 2.8: Vier mogelijke statische evenwichten van personen die zich door een gang bewegen. Elk persoon is een punt met een straal van 0 cm. De breedte van de gang wordt weergegeven met  $L$ . De afstand tot de muur van de buitenste personen wordt weergegeven met  $d$  en de afstand tussen de personen in een rij met  $s$ .

In deze formule wordt de muurkracht op een persoon van bijvoorbeeld de linkermuur gelijk gesteld aan de muurkracht van de rechtermuur plus de horizontale component van de buurkracht van alle burens rechts van de persoon. Voor kleine  $s$  lijkt het nodig om een groter aantal burens te bekijken en dus  $n$  groot te kiezen. Voor een  $s$  van 10 cm (zeer ernstige verdrukking) en een gang van 3 meter breed is figuur 2.9 van de partiële sommen gemaakt. Uit figuur 2.9 blijkt dat  $n = 6$  in formule (2.33) een goede keuze lijkt en dat



Figuur 2.9: De uitkomst van de partiële sommen bij verschillende waarden van  $n$ . Hierbij geldt  $s = 10$  cm en  $L = 3$  m.

verder gelegen burens geen toegevoegde kracht leveren.

In figuur 2.8 staan nog twee evenwichten weergegeven, waarin de rijen ten opzichte van elkaar  $\frac{s}{2}$  verschoven zijn. Voor deze evenwichten gelden volgens dezelfde principes de

gelijkheid voor evenwicht 2.8 c).

$$Ae^{-\frac{d}{B}} = Ae^{-\frac{L-d}{B}} + \sum_{j=1}^{\infty} \frac{2Ae^{-\frac{\sqrt{(L-2d)^2 + ((j-\frac{1}{2})s)^2}}{B}}}{\sqrt{(\frac{(j-\frac{1}{2})s}{L-2d})^2 + 1}}. \quad (2.34)$$

Formule (2.35) laat zien hoe dit zit voor evenwicht 2.8 d).

$$Ae^{-\frac{d}{B}} = Ae^{-\frac{L-d}{B}} + Ae^{-\frac{L-2d}{B}} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2Ae^{-\frac{\sqrt{(\frac{L}{2}-d)^2 + ((i-\frac{1}{2})s)^2}}{B}}}{\sqrt{(\frac{(i-\frac{1}{2})s}{\frac{L}{2}-d})^2 + 1}} + \sum_{j=1}^{\infty} \frac{2Ae^{-\frac{\sqrt{(L-2d)^2 + (js)^2}}{B}}}{\sqrt{(\frac{js}{L-2d})^2 + 1}}. \quad (2.35)$$

Naast deze evenwichten zijn er natuurlijk ook uitbreidingen van deze evenwichten te bedenken, waar er meer rijen personen naast elkaar staan.

Uit het evenwicht van figuur 2.8 a) blijkt dat er geen begrenzing is op  $s$ , wat betekent dat er oneindig veel personen op een eindige afstand kunnen staan. In dit geval worden de personen verdrukt, waardoor dit eigenlijk geen evenwicht kan zijn. Bij de evenwichten voor situatie b, c en d in figuur 2.8 is oneindig veel personen niet mogelijk, omdat de buurkracht dan oneindig groot wordt en dit groter is dan de muurkracht, zelfs voor  $d = 0$ . Wanneer aangenomen wordt dat de minimale afstand tussen twee personen iets minder is dan tweemaal de straal, zijn de evenwichten goed gedefinieerd.

# Hoofdstuk 3

## Resultaten

Na het model opgesteld te hebben is het tijd om te gaan simuleren. Met behulp van deze simulaties worden resultaten geboekt die terug te vinden zijn in dit hoofdstuk. Naast de weergave van de resultaten is in dit hoofdstuk ook de validatie en verificatie van het model te vinden. Dit zegt hoe goed of gevoelig het model is.

In dit model zijn de resultaten gegeven van verschillende simulaties. In alle gevallen is het zo dat de kamer een grootte heeft van 15 meter bij 15 meter, de deur 1 meter breed is, de gewenste snelheid op  $v_0 = 1$  ligt en  $\Delta_t = 0.01$ , tenzij dit anders is aangegeven. In de grafieken waar de ondergrens en de bovengrens van toepassing is, gaat dit om een onder- en bovengrens van een 95%-betrouwbaarheidsinterval, waarbij 10 simulaties per keer gedaan worden.

### 3.1 Validatie

Elk model moet gevalideerd worden om te kijken of het model in overeenstemming is met de werkelijkheid. Blijkt dat na de validatie het model inderdaad in overeenstemming is met de werkelijkheid is te spreken van een valide model.

Om het model te valideren is er data uit de praktijk nodig om resultaten en waargenomen gedrag te vergelijken. Op het gebied van crowd modelling is er redelijk wat data verzameld, onder andere bij vissen en vogels, [3]. Over menselijk gedrag in panieksituaties is er echter bijna geen informatie beschikbaar. Het is daarom bijna niet mogelijk om het model te valideren, behalve dan door simulaties te vergelijken met wat men verwacht hoe mensen zich gedragen en te vergelijken met andere modellen uit de literatuur.

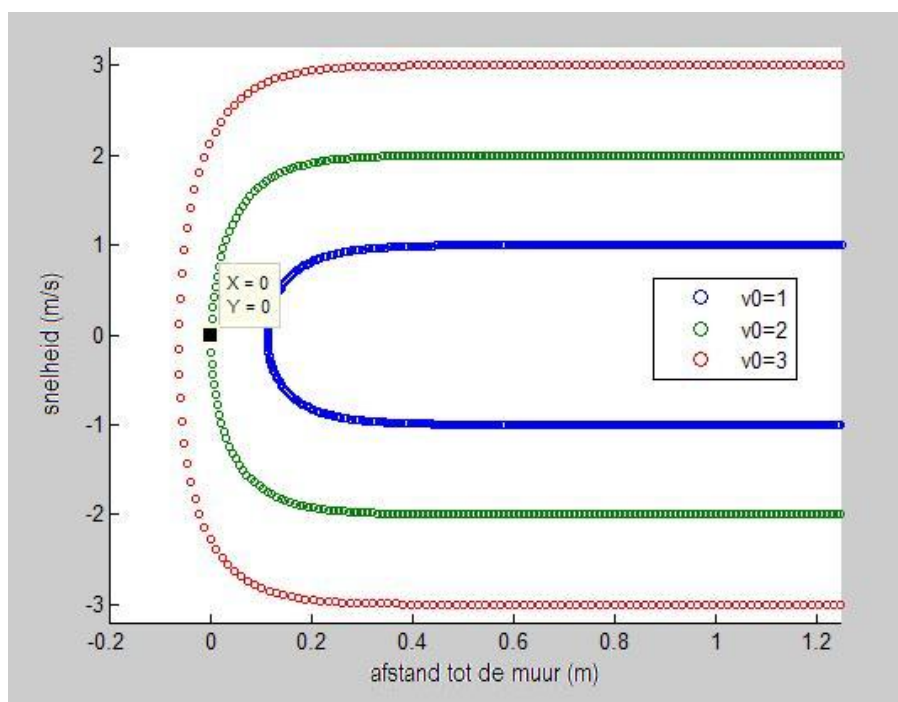
Over het algemeen lijkt het gedrag van de mensen in simulaties redelijk op een echte groep mensen. In panieksituaties gedragen personen zich als individuen die zo snel mogelijk naar buiten willen en erg gaan dringen. Ook het verlangen van mensen om niet te dicht bij elkaar of bij de muur te gaan staan is goed terug te zien in de simulaties. Toch blijft er, ondanks de demping, in het model licht stuitergedrag van personen zichtbaar. Voor situaties waar wordt gedrongen bij de uitgang is dit schokkerige gedrag misschien te verklaren, maar wanneer één persoon tegen een muur of andere persoon aanloopt, is het veel logischer als deze persoon dan direct stilstaat. Verder zijn de personen in het

model niet nadenkend en lopen ze soms recht tegen een object aan, terwijl dit in het echt waarschijnlijk niet zou gebeuren. Ook wordt er niet op een intelligente manier geprobeerd om andere personen te ontwijken, terwijl dit wel realistischer is. In hoofdstuk 6 wordt hier verder op in gegaan.

Ter validatie is het model ook naast het model van [1] gelegd door de resultaten te vergelijken. Hier wordt verder op in gegaan in hoofdstuk 4.2.

## 3.2 Verificatie

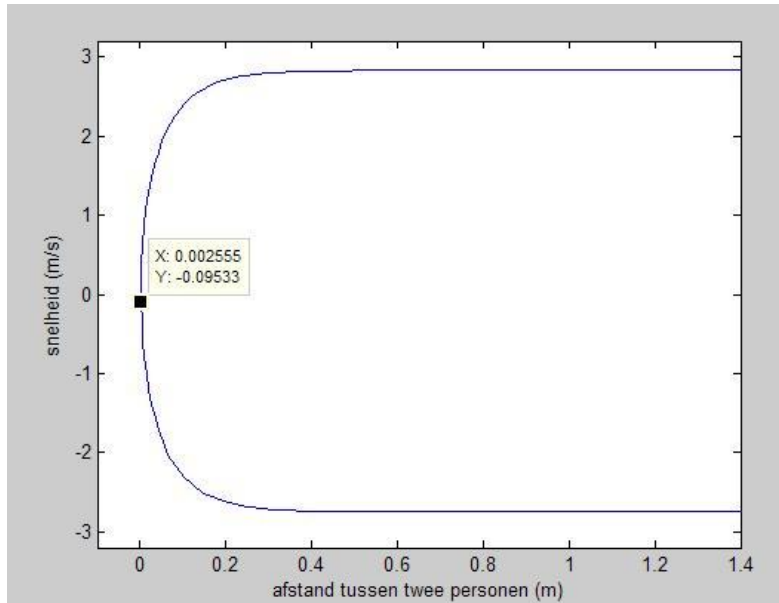
Het verifiëren van een model gebeurt door te kijken of het model doet wat hij moet doen en of bepaalde situaties ook nog van toepassing zijn in een simpel geval. Daarnaast wordt getest of wat het model doet ook in overeenstemming is met bestaande theoriën. Dit wordt gedaan door simpele situaties te simuleren. Uit paragraaf 2.2.1 is bekend dat  $v_{\text{contact}}$  gelijk is aan 2 m/s. Wanneer het model gesimuleerd wordt en  $\mathbf{F}_{\text{muur}}$  (zonder demping en wrijving) als enige kracht op een persoon werkt, ontstaat figuur 3.1. Hier is de snelheid negatief als de persoon op de muur afloopt en positief als deze van de muur afloopt. Uit



Figuur 3.1: Het scenario waarbij één persoon richting de muur loopt en er van weggestuurd wordt door de muurkracht. Het deel van de grafieken bij  $y \leq 0$  is de heenweg en het overige deel van de grafieken is de terugweg. De rode grafiek geeft een beginsnelheid van 3 m/s, de groene een beginsnelheid van 2 m/s en de blauwe een beginsnelheid van 1 m/s. De enige kracht die op de persoon werkt is  $\mathbf{F}_{\text{muur}}$  en er is geen sprake van demping of wrijving.

figuur 3.1 blijkt dat  $v_{\text{contact}} = 2$  m/s klopt. Wanneer de persoon op de muur afloopt met snelheden van 1 en 3 m/s, gedraagt de persoon zich ook naar verwachting. Uit paragraaf 3.2 bleek ook dat de contactsnelheid bij een botsing tussen twee personen gelijk is aan  $2\sqrt{2}$  m/s. Dit blijkt ook uit figuur 3.2.





Figuur 3.2: Deze grafiek laat zien dat, wanneer twee personen met een relatieve snelheid van  $2\sqrt{2}$  m/s op elkaar aflopen (met een beginafstand van 1.5 m), ze precies botsen. Voor  $y \leq 0$  lopen de twee personen op elkaar af en voor de rest van de grafiek geldt dat ze bij elkaar vandaan lopen.

### 3.3 Gevoeligheidsanalyse

Bij gevoeligheidsanalyse wordt gekeken hoe gevoelig het model is op kleine veranderingen. Als een model bij kleine veranderingen van de constanten en variabelen hele andere resultaten geeft kan dit aangeven dat het model niet valide is. Daarnaast is hier terug te vinden wat de resultaten zijn bij variatie van bepaalde variabelen. De toelichting van de keuze voor constanten staat ook in deze paragraaf.

#### 3.3.1 Variatie in $n$ en $v_0$

Om erachter te komen wat de invloed van het aantal personen  $n$  is op de doorstroomtijd is deze variabele gevarieerd. Daarnaast is de gewenste snelheid gevarieerd omdat het vermoeden is dat deze  $v_0$  invloed heeft op de doorstroomtijd.

De gewenste snelheid  $v_0$  wordt in het model gebruikt als parameter die de paniekerigheid van personen weergeeft, hoe hoger  $v_0$ , hoe groter de paniek. Van [1] is bekend dat bij gewenste snelheden groter dan 1.5 m/s de efficiëntie van het verlaten van de ruimte achteruit gaat, dus dat hogere paniek niet gewenst is voor een goede doorstroom. Bij het verlaten van gebouwen bij bijvoorbeeld brand is ‘geen paniek’ ook altijd de regel die voor een zo veilig mogelijk verloop moet zorgen.

Toch blijkt uit de resultaten van de simulaties van het model iets anders. In figuur 3.3 is goed te zien dat voor vijf mensen de doorstroomtijd daalt wanneer de gewenste snelheid stijgt. Dit is goed te begrijpen, omdat vijf personen bijna geen last hebben van elkaar en dus sneller de kamer uit zijn als ze harder lopen. Voor grotere aantallen ( $n = 20$ ) geldt dit echter nog steeds, terwijl er nu toch al aardig wordt gedrongen. Bij vijftig mensen in een

kamer is pas (heel gering) te zien dat hogere paniek niet altijd een betere doorstroming geeft, hier levert  $v_0 = 4$  de optimale doorstroomtijd. Zie hoofdstuk 4.2 voor resultaten met grotere waarden van  $n$ .

Verder is het interessant om te kijken naar de doorstroomtijd van de kamer. Het aantal mensen dat per seconde uit een kamer kan ontsnappen zegt veel over de efficiëntie van een kamer. De resultaten staan in figuur 3.4 en zijn verkregen door de totale doorstroomtijd te delen door het aantal mensen. De getallen op de y-as staan voor de gemiddelde tijd tussen twee ontsnappingen. Duidelijk is dat voor kleine aantallen mensen de doorstroomtijd laag is, wat ook goed te begrijpen is omdat er een groot deel van de tijd niemand bij de deur staat. Verder is het voor kleine aantallen personen goed te zien dat een hogere gewenste snelheid de uitstroomsnelheid verbetert. Echter, hoe groter het aantal mensen, hoe kleiner dit verschil wordt. De lijn  $v_0 = 5$  heeft zijn minimum bij  $n = 30$ . Bij  $v_0 = 4.5$  en  $v_0 = 4$  ligt het minimum bij  $n = 40$ . Het lijkt er dus op dat hogere waarden van  $v_0$  lagere minima voor  $n$  hebben. Hieruit kan wederom voorzichtig worden geconcludeerd dat bij een groter aantal mensen de optimale  $v_0$  steeds lager ligt, met een bepaalde, niet gespecificeerde, ondergrens. Zie wederom hoofdstuk 4.2 voor resultaten met grotere waarden van  $n$ .

### 3.3.2 Variatie in $\Delta_t$

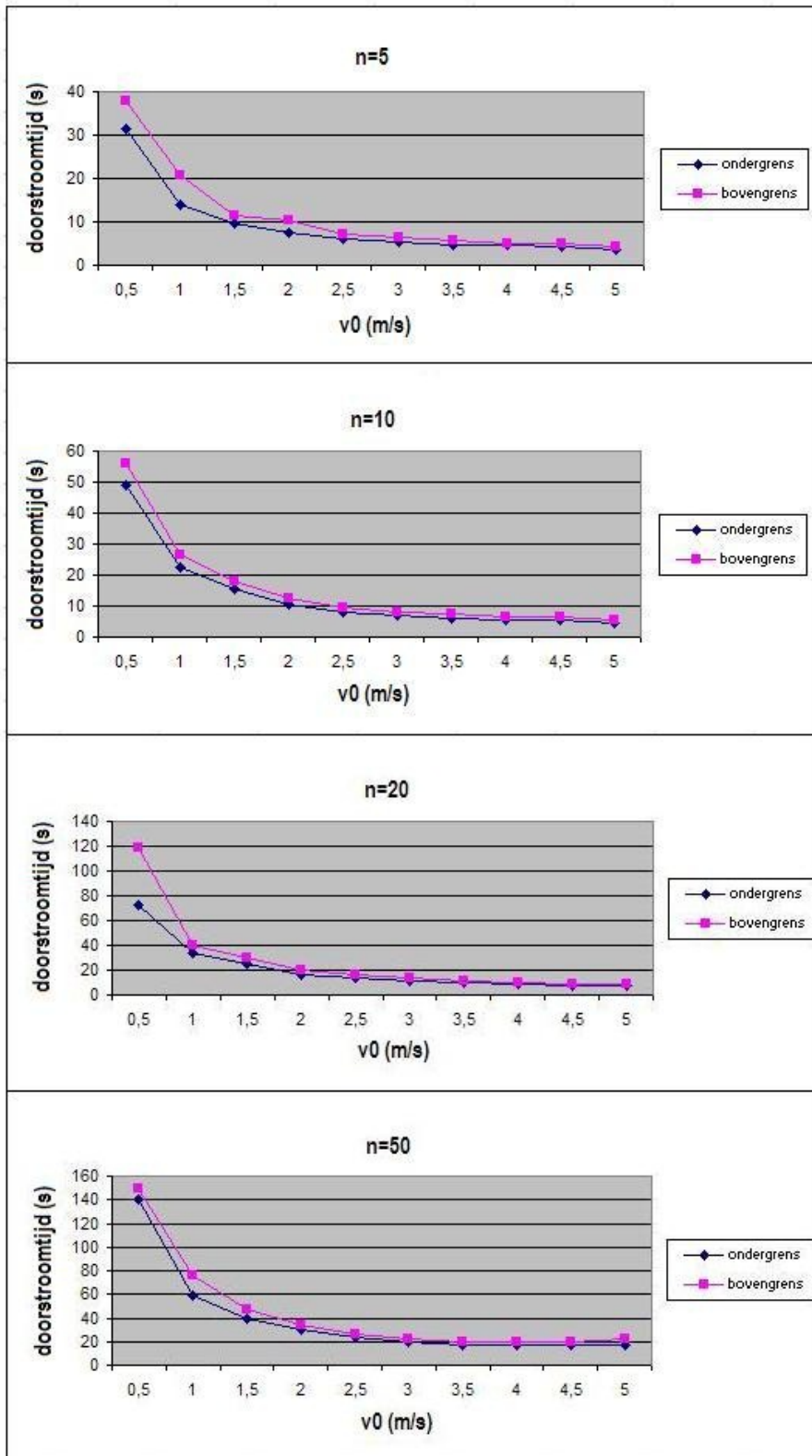
In sommige gevallen is het moeilijk analytisch een model op te lossen, zo is dat ook het geval bij dit model. Daarom wordt het model numeriek gesimuleerd. Bij numerieke simulatie wordt een stapgrootte genomen waarbij per stap de verandering wordt uitgerekend. Deze stapgrootte moet dan wel klein genoeg zijn om geen al te grote variatie te krijgen. In deze paragraaf wordt de  $\Delta_t$  gevarieerd om de invloed van de stapgrootte te bepalen. Een goed model zou in principe niet te veel afhankelijk moeten zijn van  $\Delta_t$ . De resultaten van het variëren staan in figuur 3.5.

Uit figuur 3.5 blijkt dat  $\Delta_t$  een aardig grote invloed heeft op het model. De gemiddelde waarden zijn in het begin aardig gelijk, maar bij grotere stapgroottes is de doorstroomtijd significant lager. Ook is goed te zien dat de variantie groter wordt bij grotere stapgroottes. Hierom is gekozen om de stapgrootte  $\Delta_t = 0.01$  te nemen, omdat een te grote stapgrootte dus zorgt voor minder betrouwbare resultaten en rare uitschieters.

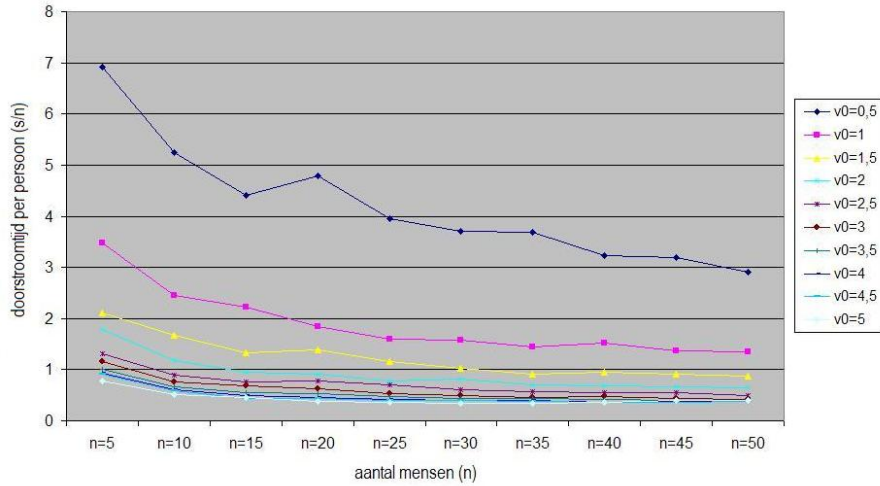
Een probleem bij het variëren van  $\Delta_t$  is dat bij erg kleine stapgroottes de randomkracht wordt uitgedempt, omdat deze kracht uniform wordt getrokken met een gemiddelde van 0 en vermenigvuldigd met  $\Delta_t$ . Een mogelijkheid om dit te verhelpen is om deze kracht te vergroten wanneer  $\Delta_t$  afneemt. Dit gebeurt door de oude randomkracht te vermenigvuldigen met de wortel van de verhouding tussen de oude en nieuwe  $\Delta_t$ . De randomkracht is dan nog steeds gedefiniëerd als in formule (3.1), alleen worden  $a$  en  $b$  nu getrokken uit het interval  $[-10\sqrt{\frac{0.01}{\Delta_t}}, 10\sqrt{\frac{0.01}{\Delta_t}}]$ .

$$\mathbf{F}_{\text{random}} = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

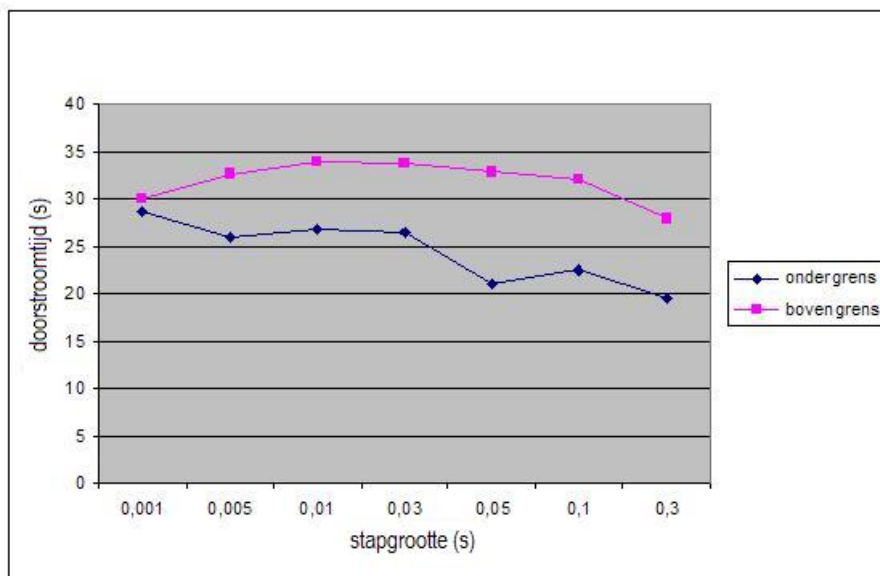
Een andere manier om  $\Delta_t$  te controleren is om gebruik te maken van paragraaf 2.2.1. Voor het model waarin alleen de muurkracht (zonder demping en wrijving) invloed heeft



Figuur 3.3: In de vier bovenstaande figuren zijn de onder- en bovengrens van het 95%-betrouwbaarheidsinterval van de doorstroomtijd uitgezet tegen verschillende  $v_0$ . De figuren vertegenwoordigen respectievelijk  $n = 5, 10, 20$  en  $50$ . Per waarde van  $v_0$  zijn 10 simulaties uitgevoerd.

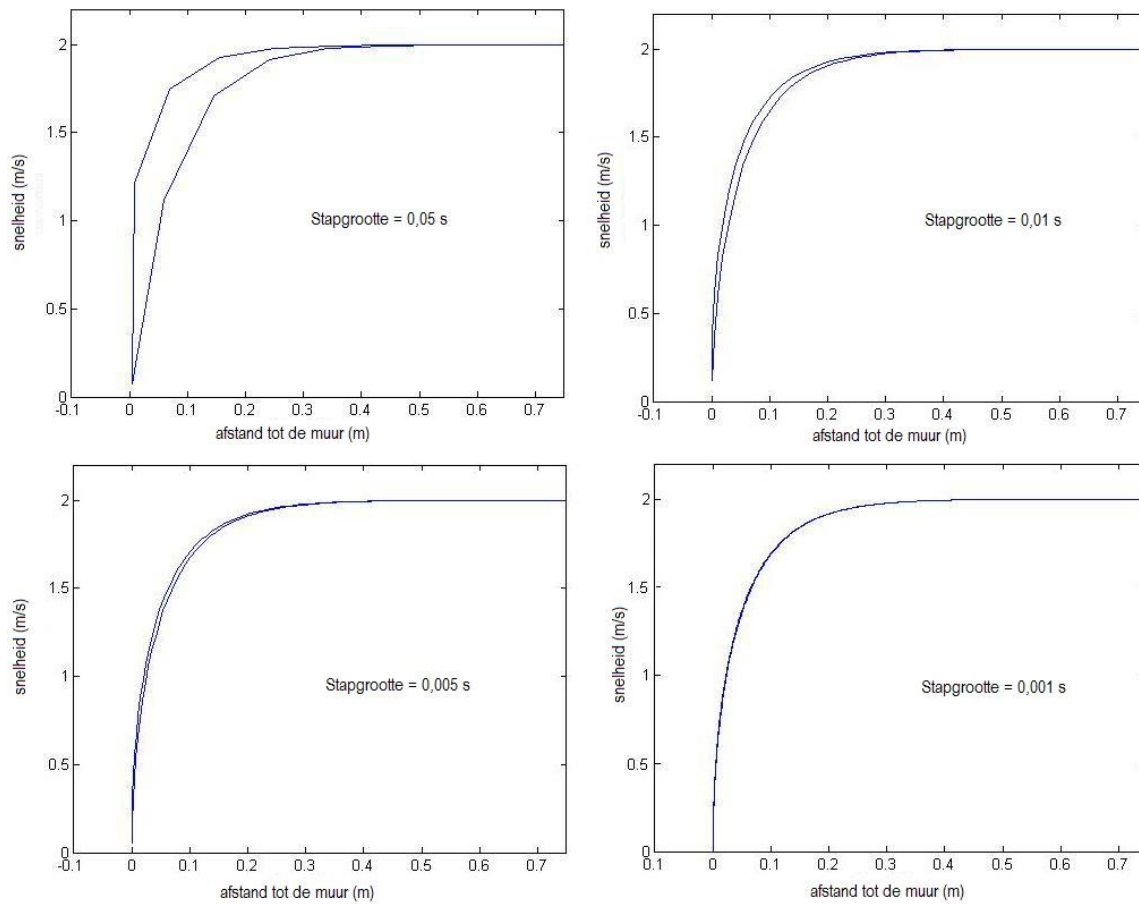


Figuur 3.4: De doorstroomtijd weergegeven per persoon bij verschillende waarden van  $v_0$  en van  $n$ . De grootte van de kamer is hierbij 15 m bij 15m. Per  $n$  en  $v_0$  zijn er 10 simulaties uitgevoerd.



Figuur 3.5: De onder- en bovengrens van het 95%-betrouwbaarheidsinterval van de doorstroomtijd van een kamer van 5 m bij 5 m met daarin 15 personen uitgezet tegen verschillende waarden van  $\Delta_t$ .

op een persoon geldt dat, wanneer een persoon richting de muur loopt, deze met dezelfde snelheid weer van de muur afloopt. Op elk punt met gelijke afstand van de muur zou dus de absolute snelheid gelijk moeten zijn. Het discretiseren zorgt er echter voor dat bij  $v = v_{\text{contact}}$  de persoon toch de muur kan raken, waardoor de persoon met een andere snelheid terugloopt dan hij zou moeten hebben volgens de theorie. Als de twee lijnen op elkaar liggen klopt dit met wat er verwacht wordt. Uit dit figuur blijkt dus ook dat de stapgrootte niet te groot moet worden gekozen voor betrouwbare resultaten.



Figuur 3.6: Het gedrag van één persoon die tegen een muur aanloopt en weer terug loopt bij verschillende stapgroottes. De enige kracht die deze persoon ondervindt is  $F_{\text{muur}}$ . In elk figuur geeft de ene grafiek de heenweg weer en de andere grafiek de terugweg. De beginsnelheid is in alle gevallen 2 m/s.

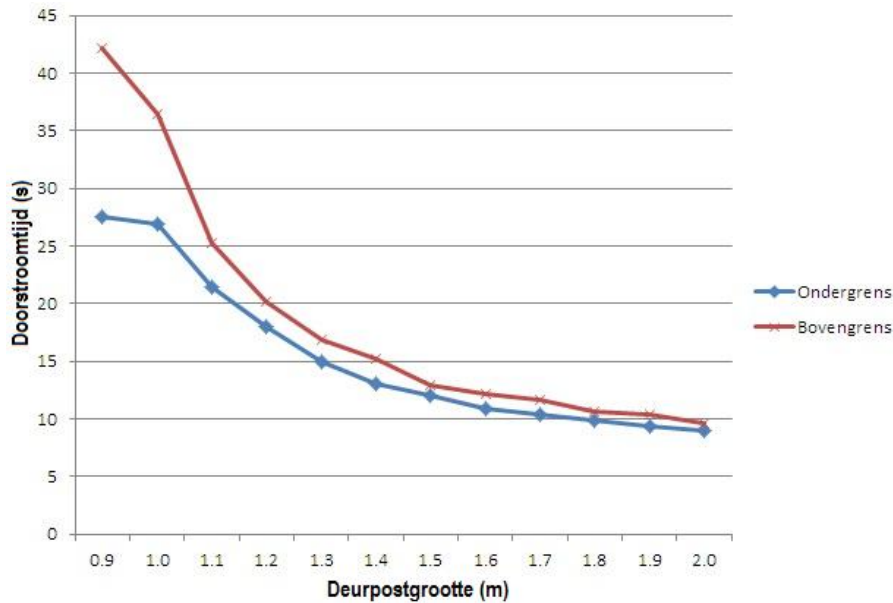
### 3.3.3 Variatie in deurpostgrootte

Als er een deur in de ruimte zit waar maar één persoon doorheen kan zal de doorstroomtijd groter zijn dan bij een deur waar iedereen tegelijk doorpast. Dit is iets wat intuïtief goed aan te voelen is, maar de precieze invloed van de deurgrootte is moeilijk aan te voelen. Daarom staat in deze paragraaf precies weergegeven wat de invloed is van de grootte van de deurpost op de doorstroomtijd.

Zoals te verwachten is, blijkt dat een grotere deur ervoor zorgt dat de doorstroomtijd kleiner wordt. Een oneindig grote deur zou dan voor een optimale doorstroomtijd zorgen. Dit zorgt er namelijk voor dat er geen opstoppingen ontstaan.

### 3.3.4 Variatie in vormgeving

Aangezien obstakels en muren krachten uitoefenen op personen, speelt de vormgeving van de ruimte een belangrijke rol in de doorstroomtijd van personen. Er zijn veel varianten van vormgeving van ruimtes te verzinnen, de ene efficiënter dan de ander. Een voorbeeld

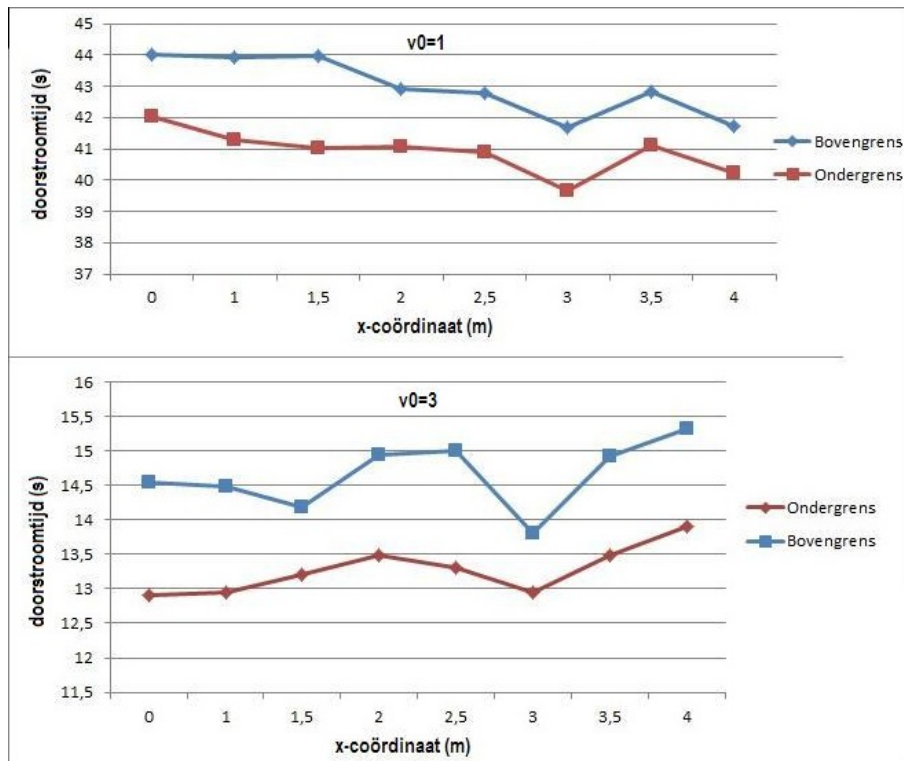


Figuur 3.7: De boven- en ondergrens van een 95%-betrouwbaarheidsinterval van de doorstroomtijd bij verschillende deurpostgroottes. Het gaat hier om een kamer van 5 m bij 5 m met 15 personen. Per deurpostgrootte zijn 10 simulaties uitgevoerd. Daarnaast is de deurpostgrootte gevarieerd van 0.9 meter tot 2.0 meter.

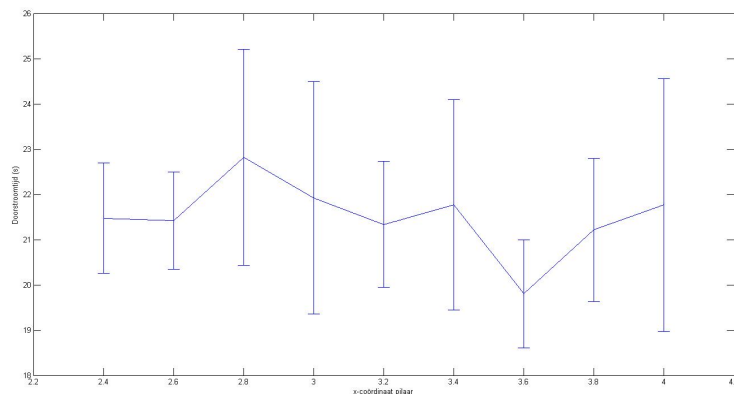
hiervan is het plaatsen van een pilaar voor de uitgang. Hierdoor neemt de druk op de uitgang af en daarmee zou de doorstroomtijd kunnen afnemen. In deze paragraaf is dit getest met het bovenstaande model maar ook met het model van [1].

Met behulp van een pilaar wordt als het ware een dubbele uitgang gecreëerd. Er zal gekeken worden naar de invloed van de plek van de pilaar op de doorstroomtijd. Van de pilaar wordt alleen de x-coördinaat gevarieerd (dit is de afstand van de meest linker muur tot de pilaar). Dit zal zowel met ons model als met het model van [1] onderzocht worden.

De x-coördinaat van de deur is 5 meter. De afstand van het middelpunt van de pilaar wordt gesimuleerd tussen  $x = 0$  en  $x = 4$ , dit is tussen de 1 en 5 meter van de pilaar. In figuur 3.8 is het resultaat te zien van het model van [1] voor  $n = 40$ , met  $v_0$  van 1 en 3. Voor simulaties met een kleiner aantal mensen is niet een duidelijk verband te zien, uit de figuur blijkt echter dat voor veertig personen de optimale plek voor de pilaar een x-coördinaat heeft van 3, dit is twee meter vanaf de uitgang. Het effect van deze pilaar is echter zo gering, dat hier eigenlijk geen harde conclusie uit kan worden getrokken. Voor ons eigen model hebben we ook bekeken wat het effect is van een pilaar, de resultaten hiervan staan in figuur 3.9. In deze figuur geldt  $v_0 = 3$  m/s en wordt de x-coördinaat van de pilaar gevarieerd tussen 2.4 en 4.0 meter. De optimale plek van de pilaar lijkt nu te liggen bij  $x = 3.6$ , dus iets minder dan anderhalve meter van de deur. Toch zijn hier de resultaten ook eigenlijk niet significant en kunnen hier geen harde conclusies aan worden verbonden. De verschillen in gemiddelde tijden tussen figuur 3.8 en 3.9 kunnen worden verklaard door de ingebouwde demping.



Figuur 3.8: Verschillende afstanden van het middelpunt van de pilaar tot de linkermuur van de kamer. Bij een  $v_0 = 1$  en  $3$  m/s en  $n = 40$ . De kamer heeft hier een grootte van  $5$  m bij  $5$  m. De waarden van de overige constanten zijn te vinden in hoofdstuk 7.

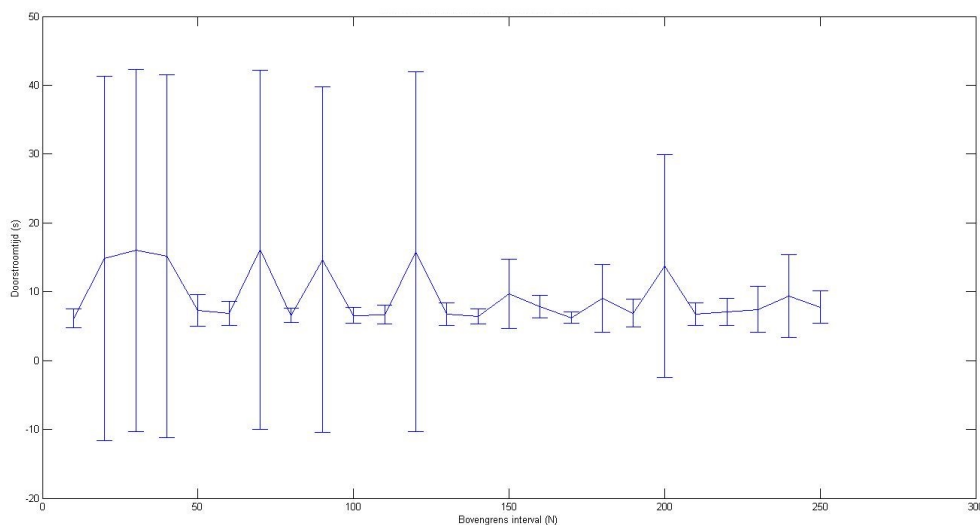


Figuur 3.9: Verschillende afstanden van de pilaar tot de linkermuur van de kamer. Bij een  $v_0 = 3$  m/s. Met 40 personen in een kamer van  $5$  m bij  $5$  m. In het figuur is per punt het 95%-betrouwbaarheidsinterval weergegeven.

### 3.3.5 Variatie in $F_{\text{random}}$

Naast dat er met de randomkracht een evenwichtssituatie voorkomen wordt, is het ook logisch dat deze kracht er is. In de realiteit ondervindt men ook een ‘random kracht’. Dit kan een oneffenheid in de grond zijn waarover men loopt of een struikeling of een andere situatie waarin men genoodzaakt is een ‘rare’ beweging te maken. Het is lastig te bedenken welke grootte deze kracht zou moeten hebben. De kracht mag de richting van

de persoon niet op een bepaalde manier beïnvloeden en dus ook de doorstroomtijd niet beïnvloeden, maar de kracht moet wel groot genoeg zijn om personen niet in evenwicht voor de uitgang te laten staan. Om hier wat gevoel bij te krijgen wordt het interval, waaruit de random kracht uniform getrokken wordt, gevarieerd. In figuur 3.10 staat de positieve intervalgrens tegen de doorstroomtijd uitgezet. De verwachtingswaarde van de random kracht is altijd gelijk aan de nulvector en dus is de benedengrens de negatieve waarde van de bovengrens. Er is bekend dat de grootte van  $\mathbf{F}_\tau$  bij  $v_0 = 2$  niet veel groter zal zijn dan 300 N,  $\|\mathbf{F}_{\text{random}}\|$  moet veel kleiner zijn dan deze waarde om geen significante invloed te hebben. In figuur 3.10 is het gemiddelde van tien simulaties en de bijhorende



Figuur 3.10: Verschillende waarden van de bovengrens van het interval waar  $\|\mathbf{F}_{\text{random}}\|$  uit getrokken wordt uitgezet tegen de bijbehorende doorstroomtijd in de vorm van een 95%-betrouwbaarheidsinterval bij  $v_0 = 2$ . In dit figuur is het interval van de randomkracht gevarieerd van  $[-10, 10]$  tot  $[-250, 250]$  N. Het gaat hierbij om een kamer van 5 m bij 5 m, met 40 personen.

standaardfout tegen elkaar uitgezet. Zoals te zien is, is de spreiding van de doorstroomtijd overal erg groot, zelfs nog bij 120 N, wat inhoudt dat bij deze bovengrens ook nog evenwichten voorkomen.

Er is gekozen voor een lagere  $\|\mathbf{F}_{\text{random}}\|$ . Die zorgt ervoor dat in de simulatie een vloeiende beweging zichtbaar is. Bij hogere  $\|\mathbf{F}_{\text{random}}\|$ , zijn veel rare bewegingen te zien. Met bovenstaande informatie en de simulaties in beschouwing genomen, is gekozen voor een interval van  $[-10, 10]$  N, waaruit  $\mathbf{F}_{\text{random}}$  gekozen wordt zoals beschreven in paragraaf 2.1.2.

### 3.3.6 Variatie in constantes

In hoofdstuk 7 zijn alle waarden te vinden van de gebruikte constantes. In deze paragraaf zal een toelichting gegeven worden op de gekozen waarden van deze constantes.



## Constantes uit [1]

De straal van persoon  $i$  is een uniform getrokken getal uit het interval  $[0.20 \text{ m}, 0.35 \text{ m}]$ . Dit betekent dat een persoon een diameter heeft van gemiddeld 55 cm. In [1] is het interval waaruit de straal van de personen gekozen wordt  $[0.25 \text{ m}, 0.35 \text{ m}]$ , alleen is dit daar de straal van een gemiddelde voetbalfan. In dit model gaat het niet alleen om voetbalfans maar ook om andere personen en dus met een kleiner gemiddelde.

De massa voor een persoon in het model is 80 kg. Wederom komt dit getal uit [1] en is dit het gemiddelde gewicht van een voetbalfan. Het gemiddelde gewicht van een Nederlander ligt ook rond dit getal en daarom is deze waarde dusdanig gekozen.

In onder andere formule (2.2) worden de constanten  $A$  en  $B$  gebruikt.  $A$  heeft een waarde van  $2 \cdot 10^3 \text{ N}$ . De constante  $B$  heeft een waarde van 0.08 m. Deze waardes zijn wellicht zo gekozen dat de contactsnelheid  $v_{\text{contact}}$  uit komt op 2 m/s, ook zorgen deze constanten ervoor dat persoon  $i$  een bepaalde afstand tot de muur en tot andere personen houdt. Als een persoon met een snelheid van 2 m/s loopt zal hij precies de muur raken. Als een persoon met een lagere snelheid dan 2 m/s naar de muur toeloopt of er langsloopt zal hij een bepaalde afstand van de muur houden, deze afstand is afhankelijk van de snelheid. Deze afstanden zijn te zien in tabel 3.1. De persoon heeft een straal van 0.25 m.

Tabel 3.1: Gewenste snelheid uitgezet tegen de afstand die één persoon dan van de muur blijft staan zodra deze persoon tegen de muur wil lopen met de gewenste  $v_0$ . De beginsnelheid is  $v_0$ .

$v_0$ (m/s)	Afstand tot de muur (m)
0.50	0.26
0.75	0.22
1.00	0.20
1.25	0.18
1.50	0.17
1.75	0.16

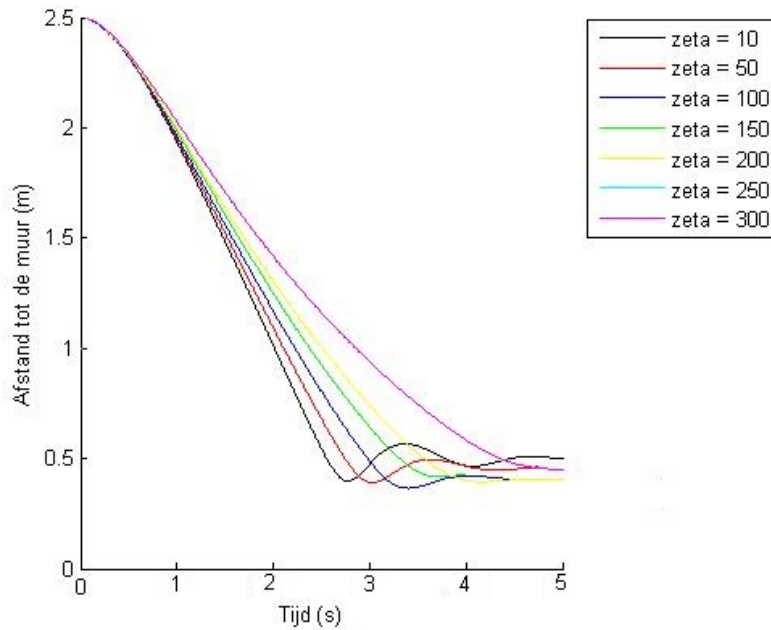
Het verband tussen de kracht  $\mathbf{F}_{\text{muur}}$  en  $A$  en  $B$  is terug te vinden in formule (2.2).

Twee andere constanten die terug te vinden zijn in onder andere  $\mathbf{F}_{\text{muur}}$  zijn  $K$  en  $\kappa$ . Deze twee constanten zijn pas van toepassing als persoon  $i$  de muur raakt. De twee constanten geven aan hoe groot de ‘fysieke’ kracht wordt als de persoon de muur raakt. Daarbij is  $\kappa$  de wrijvingscoëfficiënt.

Een constante die terug te vinden is in  $\mathbf{F}_\tau$  is  $\tau$ . In het model heeft  $\tau$  een waarde van 0.5 s. Dit is een redelijke vertragingstijd.

## Dempingscoëfficiënt

De constante  $\zeta$  is de dempingscoëfficiënt en heeft een eenheid van N m/s. In dit model heeft de  $\zeta$  een waarde van 200 N m/s. Deze waarde is bepaald door één persoon richting de muur te laten lopen en te kijken wat een realistische demping is. In figuur 3.11 is te



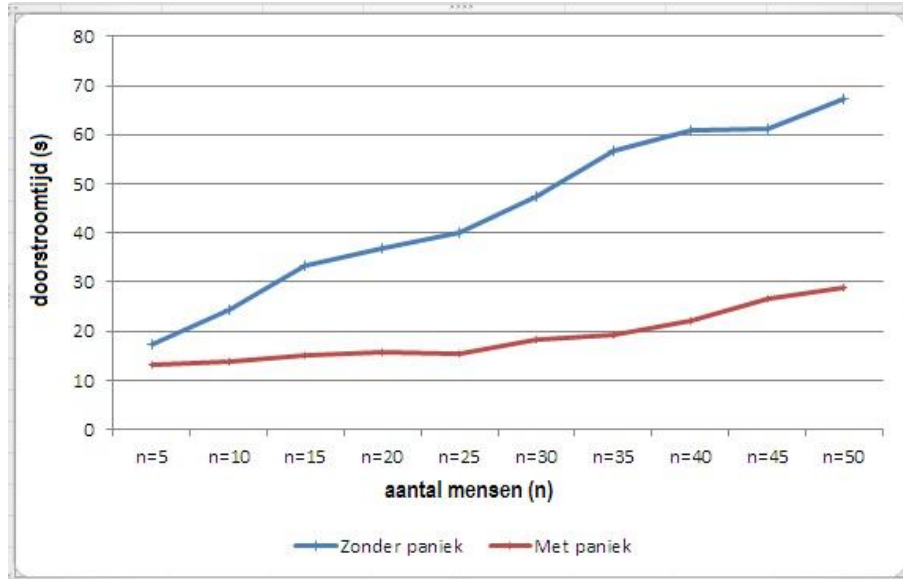
Figuur 3.11: De grafieken van verschillende dempingscoëfficiënten, hierbij is de afstand tot de muur uitgezet tegen de tijd. Daarna is bepaald wat ogenschijnlijk een goede demping is. In de simulatie is één persoon met een  $v_0 = 1$  naar de muur toegestuurd.

zien wat verschillende  $\zeta$ 's doen met de demping. Uit figuur 3.11 blijkt dat voor  $\zeta$ 's van 10, 50 en 100 er nog te veel stuitergedrag te zien is. Voor een  $\zeta$  van 250 of 300 wordt de persoon al te snel gedempt en is het effect te overdreven. Een geschikte  $\zeta$  is dan 150 of 200, waarbij een  $\zeta$  van 200 een iets gelijkelijker verloop geeft. Daarom is gekozen voor een  $\zeta$  van 200 N m/s.

## 3.4 Paniek

### 3.4.1 Paniekparameter

Zoals in paragraaf 2.3 is besproken is in [1] een bepaalde paniekparameter beschreven waarmee de paniekerigheid wordt weergegeven van de personen in de kamer. De gewenste snelheid gaat omhoog naarmate er meer paniek is in de kamer. Het gevolg hiervan is dat personen harder willen gaan lopen. In figuur 3.12 is te zien wat het verschil is tussen met of zonder paniek. De beginsnelheid van de personen die in de kamer staan is 0 m/s. Het verschil tussen een simulatie met of zonder paniek is bij weinig personen minimaal. Naarmate er meer personen in de kamer zijn wordt de doorstroomtijd hoger en het verschil groter. Dit komt doordat er meer paniek in de kamer ontstaat doordat het langer duurt voordat de personen de kamer kunnen verlaten. Als er geen sprake is van paniek zullen de personen op elkaar wachten en zal het dus langer duren voordat iedereen de kamer heeft verlaten. De drang om dan de kamer uit te komen is dan aanzienlijk lager en zal het over het algemeen langer duren om de kamer uit te komen. In figuur 3.12 is een variatie van 5 tot 50 personen weergegeven. Bij 50 personen is nog niet echt sprake van een echte

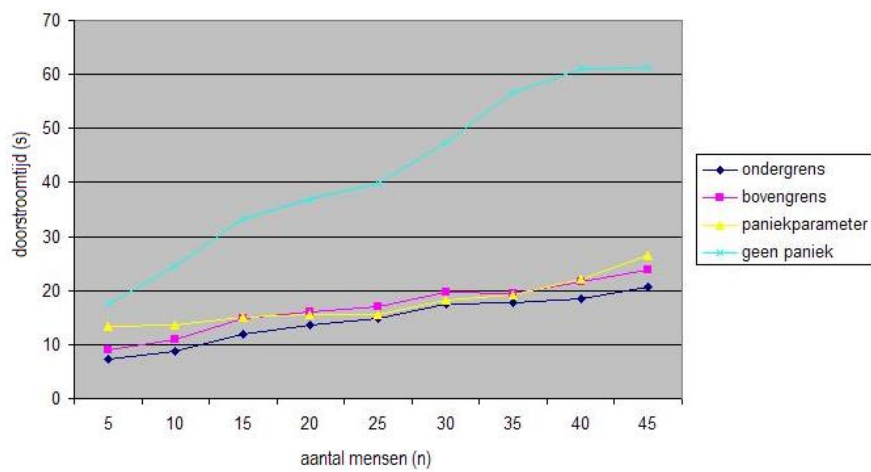


Figuur 3.12: In dit figuur wordt een situatie met paniek vergeleken met een situatie zonder paniek. De blauwe lijn geeft de doorstroomtijd uitgezet tegen het aantal personen als er geen panieksituatie is en de rode lijn geeft de doorstroomtijd tegen het aantal personen als er wel een panieksituatie is. Het gaat hierbij om een kamer van 15 m bij 15 m en geldt in een situatie met paniek  $v_0(0) = 1$ , voor een situatie zonder paniek is  $v_0$  constant en gelijk aan 1 m/s. De manier van paniek simuleren is in dit figuur ‘paniekparameter’.

opstopping dus zal het niet langer duren om de kamer uit te komen zodra er meer paniek is. Dit zal pas bij een hoger aantal personen gebeuren, zie paragraaf 4.2.

### 3.4.2 Panieufactoren

Zoals beschreven in paragraaf 2.3.3, wordt in het model paniek gedefinieerd als een lineaire combinatie van panieufactoren, zie formule (2.32). De gewenste  $v_0$  is afhankelijk van de gemiddelde snelheid en de kracht die een persoon echt voelt,  $F_{\gamma,i}$ . In figuur 3.13 staan de resultaten van simulaties voor verschillende waarden van  $n$ . In figuur 3.13 zijn de ondergrens en bovengrens van het 95% betrouwbaarheidsinterval weergegeven voor het model met panieufactoren. Ter vergelijking staan ook de resultaten van de vorige paragraaf in de grafiek. Met panieufactoren wordt de manier van simuleren van paniek met formule (2.32) bedoeld. Met paniekparameter wordt de manier van simuleren van paniek met formule (2.30) en (2.31). Zoals verwacht zijn de doorstroomtijden met paniek beduidend lager dan zonder paniek. Voor aantallen onder de  $n = 50$  resulteert een hogere gewenste snelheid namelijk in een snellere doorstroming. Wanneer de paniekparameter van [1] wordt vergeleken met de panieufactoren, is er niet een groot verschil te zien, beide simulaties laten ongeveer hetzelfde gedrag zien. Toch is voor  $n \leq 10$  de paniekparameter beduidend langzamer dan de panieufactoren, waarschijnlijk ten gevolge van een lagere  $v_0$ . Het is niet duidelijk waardoor dit komt.



Figuur 3.13: Dit figuur vergelijkt de doorstroomtijd van verschillende soorten van panieksimulaties. De boven- en ondergrens van het 95%-betrouwbaarheidsinterval geven de doorstroomtijd bij de simulaties van ‘paniekfactoren’. De gele lijn geeft de simulaties die ook zijn te vinden in figuur 3.12 (alleen dan de lijn met de gemiddelden). De lichtblauwe lijn geeft de situatie zonder paniek. Dit gaat wederom om een kamer van 15 m bij 15 m met verschillende aantallen personen.

# Hoofdstuk 4

## Discussie

In het hoofdstuk discussie zal besproken worden welke haken en ogen er aan het model zitten, dit is een kritische analyse van het model. Daarnaast is in de inleiding aangegeven dat er veel literatuur is over het begrip ‘crowd modelling’, in dit hoofdstuk zal dan ook besproken worden welke onderdelen van het model verschillen met de literatuur en welke conclusies hieruit te trekken zijn.

### 4.1 Analyse model

In paragraaf 3.1 is met behulp van validatie geprobeert aan te tonen of het waarschijnlijk is dat het model valide is. Daarnaast zijn er nog een aantal punten waarop het model kritisch bekeken moet worden. Deze punten zijn in deze paragraaf weergegeven.

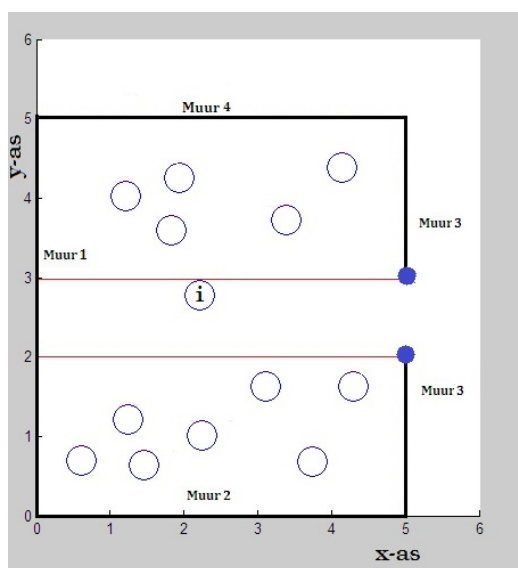
Over het algemeen laat het model in de simulaties een ogenschijnlijk realistische weerspiegeling van de werkelijkheid zien. Toch zijn er af en toe momenten waarop er twee personen voor de uitgang staan en daar blijven staan. Er ontstaat dan een evenwicht en de personen zullen dan de kamer nooit meer uitkomen. Dit is geen realistische situatie. Men kan zich wel een situatie voorstellen waarin twee personen voor de deur staan en de één tegen de ander zegt dat hij/zij voor mag gaan. Maar langer dan een paar seconde duurt dat nooit. In de simulaties kan het zijn dat beide personen niet eerst gaan maar allebei even graag de kamer uit willen waardoor ze voor de deur blijven staan. Om dit probleem te verhelpen is de kracht  $\mathbf{F}_{\text{random}}$  ingebouwd. Alleen deze kracht is zo gekozen dat die geen significante veranderingen aanbrengt in het gedrag van de personen, maar er alleen voor zorgt dat er minder evenwichtssituaties ontstaan bij de deur. Toch blijkt het evenwicht bij de gekozen  $\mathbf{F}_{\text{random}}$  soms nog steeds te ontstaan. Dit is een afweging van  $\mathbf{F}_{\text{random}}$  tussen een evenwichtssituatie en realistisch gedrag.

In het model is een demping ingebouwd om te voorkomen dat personen al te hard stuiten. Ondanks deze demping is er af en toe nog licht stuitergedrag waar te nemen in simulaties. Dit is niet realistisch en blijft een probleem. Wel heeft de demping ervoor gezorgd dat het stuitereffect gereduceerd is. Daarnaast zit er geen demping op personen wat soms voor situaties zorgt waarbij twee personen tegen elkaar aan lopen en dan weer terug stuiten. Om dit gedrag te voorkomen moet ook demping op personen ingebouwd

worden, zie hiervoor paragraaf 6.1.

Om een geheel realistische weergave te krijgen van personen zullen personen moeten kunnen vooruitkijken. In dit model is het nog mogelijk dat een persoon recht op een pilaar afloopt en daarheen blijft lopen tot hij heel dicht bij is en dan pas afremt en uitwijkt. Een normaal persoon zal de pilaar al ver van te voren zien en eerder afbuigen. Ook is niet helemaal te voorspellen wat personen zullen doen, maar in de werkelijkheid kunnen personen soms aanvoelen en zien waar een ander persoon naartoe gaat lopen. Dit maakt het model een heel stuk complexer maar zou het allemaal wel realistischer maken. De personen in het model hebben geen mate van intelligentie. Dit is wiskundig wel enigszins mogelijk, desalniettemin blijft dit een complex probleem.

De deurpost in het model bestaat uit een stuk muur waarvan de personen geen kracht ondervinden en twee pilaren bij de deurposten. Het is namelijk zo dat personen geen kracht van de deur ondervinden om daar doorheen te kunnen. Maar het probleem is dan dat als een persoon van de zijkant naar de deur loopt opeens de kracht van de muur wegvalt, dit zorgt voor rare en onvoorspelbare situaties, zie figuur 4.1. Hier ondervinden personen geen kracht van muur 3 tussen de rode lijnen. Daarom zijn er twee pilaren als deurposten neergezet met een zeer kleine straal zodat niet meteen de kracht helemaal wegvalt. Toch blijft het goed modelleren van de deur een probleem, zelfs met de pilaren blijft het gedrag rondom de deur van de personen soms grillig.



Figuur 4.1: Schematische vormgeving van een kamer van 5 m bij 5 m met een deur van 1 m breed. De x-as geeft muur 2 weer en de y-as geeft muur 1 weer. De deur zit precies in het midden van muur 3 en is 1 m breed.

In de werkelijkheid worden mensen soms tegen elkaar aangedrukt als er paniek ontstaat. Maar niet alleen als er paniek ontstaat maar bijvoorbeeld ook bij een concert is het heel normaal dat iedereen tegen elkaar aanstaat om zijn of haar favoriete artiest te zien. In het model komt het bijna (tot nooit) voor dat personen elkaar raken en zodra dit wel gebeurt wordt de afstotende kracht zo groot dat ze meteen uit elkaar lopen. Hierdoor komt het

dus vrijwel nooit voor dat personen voor langere tijd tegen elkaar aanstaan. Er zal door de buurkracht bijna altijd een ruimte tussen personen zitten. De kracht die er voor zorgt dat twee personen elkaar raken of blijven raken moet verschrikkelijk groot zijn, omdat de afstotende kracht tussen twee personen ook verschrikkelijk groot is. In het model komt dit vrijwel nooit voor, mede doordat het model geen grotere waarde van  $n$  aankan dan 50.

Doordat in het model het niet zo vaak voorkomt dat personen elkaar raken heeft de fysieke kracht weinig invloed. Het gevolg hiervan is dat deze factor bij de paniekfactoren zelden groter is dan 0. Hierdoor draagt de drukkracht weinig bij aan de paniek (zie paniekfactoren paragraaf 2.3.3), terwijl het wel een belangrijke factor is om mee te nemen.

Het model is geïmplementeerd in Matlab, een wiskundig programma dat simulaties kan doen. Het nadeel van Matlab is dat Matlab niet zeer snel rekent. Hierdoor kan het geïmplementeerde model geen grote waarden van  $n$  aan. Bij een  $n$  groter dan 50 duurt één run veel te lang. Hierdoor zijn de resultaten alleen van kleine aantallen personen gesimuleerd. Bij kleinere waarden van  $n$  blijkt het zo te zijn dat een hogere  $v_0$  vrijwel altijd voor een snellere doorstroomtijd zorgt. Bij grotere waarden van  $n$  is het zo dat er een optimale  $v_0$  is waarbij de doorstroomtijd optimaal is, [1]. Het model is dus gevoelig voor  $n$ . Pas bij een  $n$  van 100 of meer begint er echte opstopping te ontstaan en zorgt een hogere  $v_0$  voor niet altijd meer voor een langere doorstroomtijd.

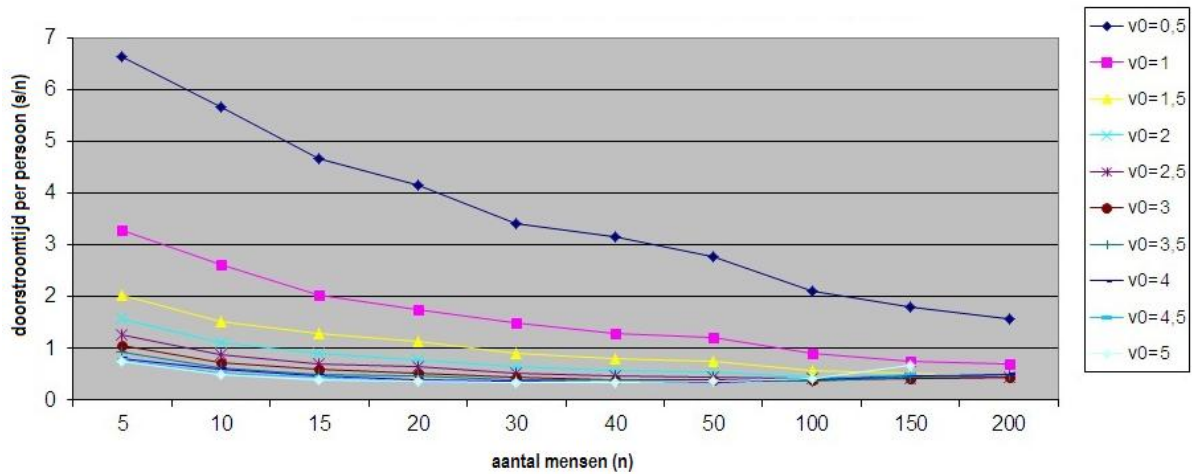
## 4.2 Vergelijking met literatuur

De basis van het model ligt ten grondslag aan [1]. In deze paragraaf wordt het model vergeleken met het model van [1]. Hierbij wordt gekeken naar verschillen en overeenkomsten in het model en de resultaten.

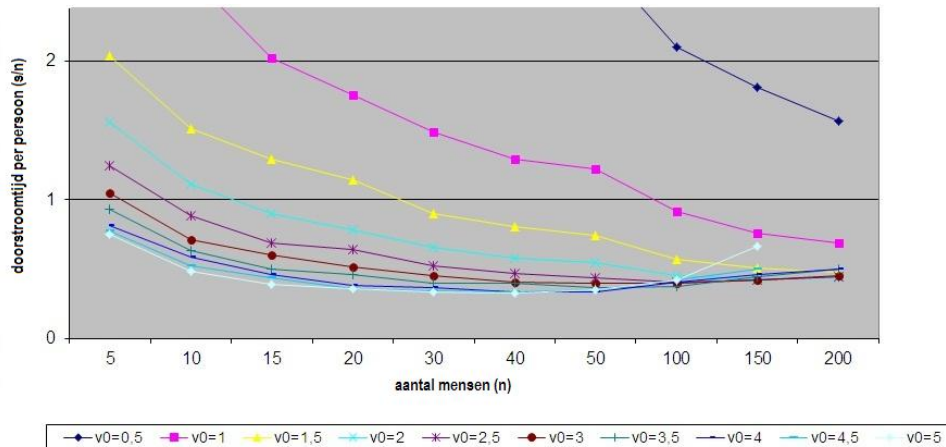
Het grootste verschil tussen het model en het model van [1] is de demping. In [1] wordt er in het geheel niet gedempt en in het model van dit verslag wel (met uitzondering van demping op personen). Demping zorgt ervoor dat personen minder stuiteren en zich menselijker gedragen.

Een ander verschil met de literatuur is de manier van paniek simuleren. Een manier om paniek te simuleren is door middel van een paniekparameter beschreven in paragraaf 2.3.2. Hierbij wordt alleen rekening gehouden met de gemiddelde snelheid. Als men een snelheid heeft lager dan de gemiddelde snelheid wordt men ‘paniekeriger’, terwijl paniek van vele factoren afhankelijk kan zijn. De tweede manier om paniek te simuleren, zoals in dit model ook gedaan is, is door middel van een lineaire combinatie van verschillende factoren die paniek veroorzaken. Hierbij wegen verschillende factoren mee en hebben deze factoren allemaal invloed op de ‘paniekerigheid’ van de personen.

Doordat het model geïmplementeerd is in Matlab is het niet mogelijk resultaten te krijgen van een  $n$  groter dan 50. In figuur 4.2 is te zien dat bij een  $n$  groter dan 50 er duidelijk een optimale gewenste snelheid is. In figuur 4.2 is goed te zien dat voor kleinere waarden van  $n$  ( $n = 5$  tot  $n = 20$ ) het efficiënter is om een hogere  $v_0$  ( $v_0 = 2$  tot  $v_0 = 5$ ) te hebben. Dit komt doordat er bij weinig mensen nog weinig opstopping ontstaat en het dan sneller is om zo hard mogelijk te willen lopen. Hoe harder er namelijk gelopen wordt hoe sneller



Figuur 4.2: Dit figuur geeft de doorstroomtijd per persoon uitgezet tegen het aantal mensen. De verschillende grafieken geven verschillende waarden van  $v_0$  weer. Het gaat hier om een kamer van 15 m bij 15 m, gesimuleerd met behulp van de `c++` code van [1].



Figuur 4.3: Voor dit figuur geldt hetzelfde als voor figuur 4.2 maar dan ingezoomd op de grafieken met een hogere  $v_0$ .

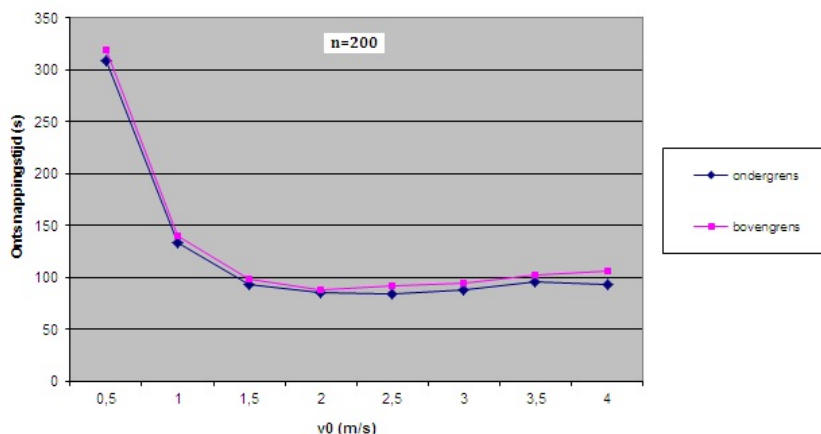
de personen de kamer door zijn en in de buurt zijn van de uitgang.

Figuur 4.3 is te zien dat, zodra er paniek ontstaat en  $v_0$  omhoog gaat, de doorstroomtijd toeneemt bij een hoger aantal personen ( $n = 100$  tot  $n = 200$ ). In panieksituaties met veel personen is dus de voorzichtige conclusie te trekken dat het handiger is om rustig te blijven en niet te hard te willen lopen.

Bij grotere waarden van  $n$  is te zien dat er een optimale  $v_0$  is waarbij de doorstroomtijd het laagst ligt. Een voorbeeld hiervan is te zien voor  $n = 200$ . In figuur 4.4 is te zien hoe het 95%- betrouwbaarheidsinterval eruit ziet voor verschillende  $v_0$ . Uit figuur 4.4 is op te maken dat de personen een  $v_0$  van ongeveer 2 m/s moeten aanhouden om er zo snel mogelijk uit te komen.

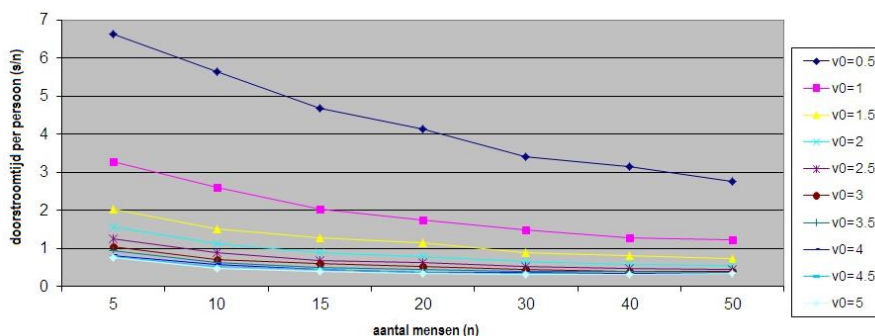
Opmerking: de resultaten weergegeven in figuur 4.2, 4.3 en 4.4 zijn verkregen door gebruik te maken van de `c++` code van [1].



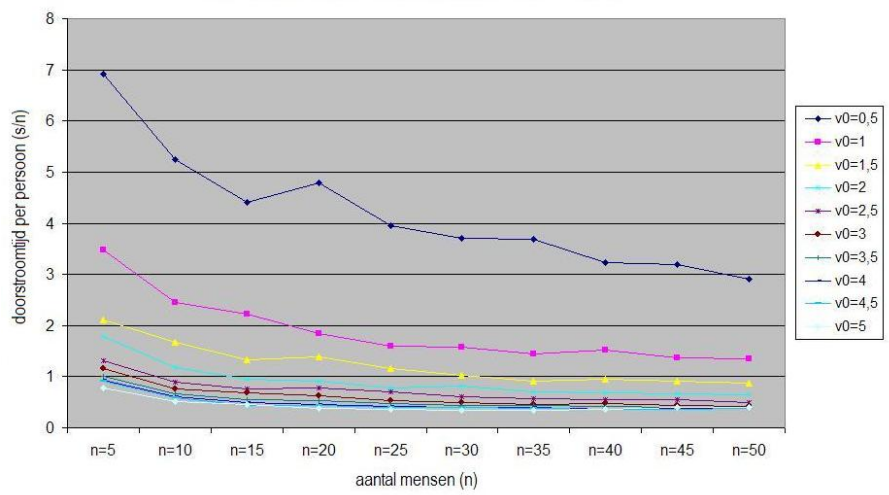


Figuur 4.4: Hier zijn de boven- en ondergrens van het 95%-betrouwbaarheidsinterval van de doorstroomtijd uitgezet tegen  $v_0$ . Hier bevinden zich 200 personen in een kamer van 15 m bij 15 m.

In figuur 4.5 en 4.6 zijn de twee figuren van de resultaten van [1] en van ons model naast elkaar gezet. Beide figuren lijken sterk op elkaar ondanks de verschillen tussen ons model en het model van [1]. Het enige verschil is dat het model van [1] een iets snellere doorstroomtijd heeft. Dit kan worden verklaard door het niet aanwezig zijn van demping.



Figuur 4.5: De doorstroomtijd is hier uitgezet tegen het aantal mensen. Het gaat hier om een kamer van 15 m bij 15 m. Deze resultaten zijn verkregen met behulp van de code van [1].



Figuur 4.6: Dit zijn dezelfde resultaten als in figuur 4.5 alleen dan verkregen met behulp van ons model. De omstandigheden zijn hetzelfde.

# Hoofdstuk 5

## Conclusie

Hoe kan het dynamisch gedrag van een menigte worden gemodelleerd met het oog op de doorstroomtijd? Dit is de hoofdvraag van dit onderzoek. In dit verslag staat een uitgebreide modelbeschrijving van de manier waarop dit model tot stand is gekomen. De conclusies die uit onze simulaties gekomen zijn staan hieronder.

Bij het simuleren met verschillen in de vormgeving zoals met een pilaar voor de ingang is er weinig verschil in doorstroomtijd aangetoond. Er lijkt een lichte daling te zitten bij een pilaar op 2 meter vóór de deur maar dit is niet significant genoeg om met zekerheid te kunnen zeggen. Wel is het zo dat bij het variëren van de deurpost de doorstroomtijd wel aanzienlijk afneemt bij een vergroting van de deurpost, maar dit resultaat is vrij triviaal.

De algemene conclusie over paniek, in een situatie met veel mensen, is dat een hogere gewenste snelheid niet altijd voor een kortere doorstroomtijd zorgt. Dit geldt als er meer dan 100 mensen in een ruimte van 15 meter bij 15 meter zijn. Echter, bij een kleiner aantal personen kan het beter zijn als men een zo hoog mogelijk gewenste snelheid aanhoudt. In dat geval ontstaat er namelijk geen opstopping en kan men beter maken dat hij naar de uitgang komt. Bij grote aantallen mensen heeft paniek dus een negatieve invloed en bij lagere aantallen mensen juist een positieve invloed op de doorstroomtijd.

Het aantal personen in de ruimte is van essentieel belang voor de doorstroom. Weinig mensen zorgen voor weinig opstopping en weinig hinder voor een persoon. Veel mensen zorgen voor hinder en opstoppingen en dus uiteindelijk voor veel vertraging. Naast het aantal personen hangt de gewenste snelheid ook sterk samen met de uiteindelijke doorstroomtijd van de kamer. Wederom is hiervan de conclusie dat het voor grotere aantallen mensen het steeds belangrijker wordt om een lagere  $v_0$  aan te houden.

Het model door ons gepresenteerd lijkt een aardig realistisch beeld te geven van een menigte in een kamer en lijkt het dynamische gedrag redelijk te weerspiegelen.

# Hoofdstuk 6

## Aanbevelingen

De tijd die dit onderzoek mag kosten is beperkt. Daardoor is het niet gelukt om alles helemaal uit te werken. In dit hoofdstuk staan een aantal onderwerpen die nog verder uitgewerkt zouden kunnen worden en dit zijn tegelijkertijd aanbevelingen om mee aan de slag te gaan bij een vervolgonderzoek.

### 6.1 Damping op personen

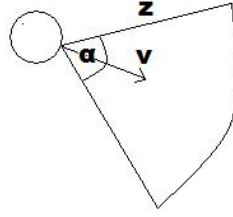
Zoals gezegd in paragraaf 2.1.1 is in ons model damping op personen niet gemodelleerd. Hierdoor wordt het model namelijk erg complex, omdat er als het ware moet worden voorspeld waar de personen zich in de toekomst bevinden om eventuele botsingen te dempen. Ook zou hierdoor het model misschien vast komen te staan, omdat alle personen een damping op elkaar uitoefenen.

Toch lijkt damping op personen een goed idee, want wanneer twee personen botsen, is het niet realistisch dat ze gaan stuiteren. Ook is het vreemd dat zonder damping twee personen evenveel kracht op elkaar uitoefenen wanneer ze op elkaar aflopen als wanneer ze in dezelfde richting lopen. Dit omdat de buurkracht alleen afhankelijk is van de afstand tussen twee personen en niet van de relatieve snelheid.

Een mogelijkheid om toch damping op personen te modelleren is om een gebied te definiëren waarin een persoon rekening houdt met andere personen. Dit gebied is afhankelijk van een hoek  $\alpha$ , gecentreerd om de snelheidsvector en een lengte  $z$  voor de afstand, zie figuur 6.1. In dit gebied is de damping voor persoon  $i$  door de invloed van persoon  $j$  nu gedefinieerd als in formule (6.1).

$$\mathbf{F}_{\text{damping},i,j} = \psi e^{(r_i+r_j-d_{i,j})} ((\mathbf{v}_j \cdot \mathbf{n}_{j,i})\mathbf{n}_{j,i} - (\mathbf{v}_i \cdot \mathbf{n}_{i,j})\mathbf{n}_{i,j}) \quad (6.1)$$

In formule (6.1) is  $\psi$  een nader te bepalen dempingsconstante,  $r_i$  en  $r_j$  de stralen van de personen,  $d_{i,j}$  de afstand tussen de middelpunten van de personen,  $\mathbf{v}_i$  en  $\mathbf{v}_j$  de snelheidsvectoren en  $\mathbf{n}_{i,j}$  en  $\mathbf{n}_{j,i}$  respectievelijk de eenheidsvectoren die van  $i$  naar  $j$  wijst en vice versa. In formule (6.1) wordt het relatieve snelheidsverschil van  $i$  en  $j$  geprojecteerd op de vector  $\mathbf{n}_{i,j}$ , wat resulteert in een afstands- en snelheidsafhankelijke kracht in de richting weg van persoon  $j$ .



Figuur 6.1: Het gebied waarin de demping van personen werkzaam is.

## 6.2 Selectieve invloed muur- en buurkracht

Zoals eerder beschreven is, hebben de personen in het model last van stuitergedrag, terwijl het waarschijnlijk realistischer is dat een persoon tot stilstand komt bij een botsing. Ook als een persoon bijna botst is het realistischer als de persoon stil gaat staan in plaats van terug te lopen. Een mogelijkheid, naast de demping, om dit gedrag verder in te perken is door de buur-, muur- en objectkracht alleen te laten werken wanneer deze kracht botsingen helpt voorkomen. De muurkracht heeft dan alleen invloed op een persoon wanneer de persoon er op afloopt, de burens alleen wanneer de relatieve snelheid groter is dan nul. Dit is te vergelijken met paragraaf 2.2.1, alleen wordt de kracht nu dus niet alleen op nul gezet bij een botsing, maar ook wanneer de krachten niet bijdragen aan het verhelpen van een botsing. Als een persoon al wegloupt voor een botsing, hoeft deze immers niet nog door deze krachten extra weg te worden gestuurd. Daarom wordt op deze manier het stuitereffect extra beperkt. Wiskundig gezien ziet dit er uit als in formule (6.2) en (??).

$$\hat{\mathbf{F}}_{\text{muur}} = \begin{cases} 0 & \mathbf{v}_i \cdot \mathbf{n}_{\text{muur}} \geq 0 \\ \mathbf{F}_{\text{muur}} & \text{elders} \end{cases} . \quad (6.2)$$

$$\hat{\mathbf{F}}_{\text{buur}} = \begin{cases} 0 & (\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i) \cdot \mathbf{n}_{i,j} \geq 0 \\ \mathbf{F}_{\text{buur}} & \text{elders} \end{cases} . \quad (6.3)$$

## 6.3 Dode of gewonde personen

In paragraaf 4.1 is aangegeven dat het in het model vrijwel nooit voorkomt dat personen elkaar zo hard raken of tegen de muur aan worden gedrukt dat de fysieke kracht dusdanig groot is dat ze dood gaan of gewond raken. Daarom is dit in het model niet meegenomen, er gaat immers zelden iemand dood, onder andere door de ingestelde snelheidsbegrenzing. Een aanbeveling is dan om te onderzoeken op welke manier dit wel goed te modelleren is. De uitdaging is hier om de denkbeeldige kracht en de fysieke kracht goed te scheiden en een goede maat te vinden voor wanneer een persoon dood gaat of gewond raakt.

## 6.4 Intelligentie

In het model hebben de personen geen mate van intelligentie. Ze reageren alsof ze niet echt kunnen zien en alleen worden gestuurd door de eerder beschreven krachten. Ze

reageren alleen op de drie gestelde regels. Hierdoor lopen ze soms tegen pilaren of muren aan zonder daarvoor uit te wijken. Een uitdaging is om een bepaald zichtsveld voor de personen in te bouwen waar ze op reageren. Het is mogelijk om ze dan alleen buurkracht te laten ondervinden van de personen die ze kunnen zien. Een andere mogelijkheid is om ze bijvoorbeeld al van de muur af te sturen of van een pilaar af zodra ze deze muur kunnen 'zien'. In dit vlak bevinden zich nog een legioen aan mogelijkheden om het model meer intelligentie te geven.

# Hoofdstuk 7

## Symbolenlijst

Tabel 7.1: Grootheden met hun symbolen, eenheden, waardes en waar ze te vinden zijn.

Grootheid	Symbool	Eenheid	Waarde	Pagina
Straal persoon $i$	$r_i$	m	[0.20, 0.35]	7
Snelheid van persoon $i$	$\mathbf{v}_i$	m/s	-	7
Aantal personen	$n$	-	-	7
Massa	$m$	kg	80	7
A-Constante	$A$	N	$2.0 \cdot 10^3$	7
B-Constante	$B$	m	0.08	7
Druk-constante	$K$	$\text{kg s}^{-2}$	$1.2 \cdot 10^5$	8
Wrijvingsconstante	$\kappa$	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$	$2.4 \cdot 10^5$	7
G-variabele	$\rho$	m	$r_i - d_{i,w}$	8
Gewenste snelheid (in afwezigheid van paniek)	$v_0$	m/s	-	10
Gewenste bestemming	$\mathbf{e}_0$	-	-	10
Reactietijd	$\tau$	s	0.50	10
Positie van persoon $i$	$\mathbf{p}_i$	m	-	10
Dempingsconstante	$\zeta$	N s/m	$2.0 \cdot 10^2$	11
x-component randomkracht	$a$	N	[-10, 10]	13
y-component randomkracht	$b$	N	[-10, 10]	13
Maximale snelheid - begrenzing	$v_{\text{begrensd}}$	m/s	5	13
Straal object	$R_o$	m	-	13
Tijdstap	$\Delta_t$	s	-	15
Contactsnelheid	$v_{\text{contact}}$	m/s	2	16
Afstand tussen personen in een rij	$s$	m	-	figuur 2.8
Afstand van de buitenste persoon tot muur	$d$	m	-	figuur 2.8
Breedte van de gang	$L$	m	-	figuur 2.8
Paniekparameter	$\theta$	-	[0, 1]	18
Maximale gewenste snelheid	$v_{\text{max}}$	m/s	5.0	18
Gemiddelde snelheid	$\bar{v}_i$	m/s	-	18
Maximale verdraagbare kracht	$F_{\text{max}}$	N/m	$1.6 \cdot 10^3$	19

# Bibliografie

- [1] Dirk Helbing, Illés Farkas, and Tamás Vicsek. Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*, 407:487–490, 28 september 2000. DOI:10.1038/35035023.
- [2] Charlotte Hemelrijk. De wereld leert door. *VARA Televisie*, 19 maart 2013.
- [3] H. Hildenbrandt, C. Carere, and C.K. Hemelrijk. Self-organized aerial displays of thousands of starlings: a model. *Behavioral Ecology*, 21:1349–1359, november 2010. DOI:10.1093/beheco/arq149.
- [4] C. Reynolds. Flocks, herds and schools: a distributed behavioral model. *Computer Graphics (ACM)*, 21:25–34, juli 1987. DOI:10.1145/37401.37406.