

Kantelpunten perronveiligheid

Kantelpunten perronveiligheid

Opdrachtgever

ProRail
Postbus 2212
3500 GE UTRECHT

Status

EINDRAPPORT V2

Kenmerk

23003/ES

Auteurs:

Erik-Sander Smits
Ira Helsloot
Koen Heijndijk
Martijn Sparnaaij
Serge Hoogendoorn

Datum

22 april 2024

Contactpersoon opdrachtgever

Bescherming persoonlijke levenssfeer (ProRail)

Bescherming persoonlijke levenssfeer (NS Stations)

Bescherming persoonlijke levenssfeer (Ministerie van I&W)

Contactpersoon opdrachtnemer

Erik-Sander Smits (Arane)

Ira Helsloot (Crisislab)

Inhoud

Inhoud.....	1
1 Inleiding	3
1.1 Aanleiding.....	3
1.2 Aanpak van het onderzoek.....	4
1.3 Leeswijzer	7
2 Risico's en hun kantelpunten.....	8
2.1 Inleiding.....	8
2.2 Perronveiligheidsrisico's.....	8
2.3 Beoordelingswijze perronveiligheidsrisico's	10
3 De kantelpunten per perronveiligheidsrisico	16
3.1 Inleiding.....	16
3.2 Kantelpunt voor aantal wachtende reizigers	16
3.3 De risicothermostaat bij val in de spoorbak.....	19
3.4 Val in de spoorbak – Wachtend.....	21
3.5 Val in spoorbak – Lopend	23
3.6 Val in spoorbak – Wachtrij stijgpunt.....	24
3.7 Val in uitloopegebied bewegend stijgpunt.....	25
3.8 Val op/van een stijgpunt door drukte.....	27
3.9 Val tussen trein en perron bij het in- en uitstappen.....	28
3.10 Beklemming tussen treindeuren.....	29
3.11 Verdrukking of vertrapping door hoge dichtheid.....	29
4 Implicaties voor proportioneel perronveiligheidsbeleid	30
4.1 Inleiding.....	30
4.2 Over de noodzakelijke proportionaliteit van veiligheidsbeleid.....	30
4.3 Proportionele investeringen voor domein II	32
4.4 Proportionele investeringen voor domein III.....	35
4.5 Implicaties voor proportioneel perronveiligheidsbeleid	36
4.6 Relatie met bestaande normen.....	38
5 Samenvatting en conclusies	39
5.1 Inleiding.....	39

5.2	Onderzoeksaanpak	39
5.3	Geïdentificeerde risico's en bijbehorende risicoprofielen.....	40
5.4	Kantelpunten van risico's en hun gevolgen.....	40
5.5	Implicaties voor de proportionaliteit van perronveiligheidsmaatregelen	42
5.6	Slotsom	43
Bijlage 1: Literatuurstudie naar risico's op het perron.....		44
1.	Welke risico's kunnen er worden geïdentificeerd?.....	44
2.	Welke risico's komen het meeste voor op het perron?.....	46
3.	Welke oorzaken worden genoemd voor perronveiligheidsincidenten?.....	48
4.	Kantelpunten	49
5.	Literatuurlijst.....	50
Bijlage 2: Analyse incidentrapportage.....		53
1.	Identificatie meldingen incidenten met relatie drukte	53
2.	Verdeling incidenten over stations.....	55
3.	Verdeling incidenten over tijd van de dag.....	57
4.	Conclusies.....	58
Bijlage 3: Natuurlijke wachtdichtheid		59
Bijlage 4: Simulatie – mogelijke incidenten bij hoge lokale dichtheden		65
1.	Het nieuwe voetgangersabsorptievermogen model.....	66
2.	Technische specificatie van het model.....	67
3.	Kalibratie.....	70
4.	Simulatiestudie en de resultaten	71
5.	Conclusies.....	76
Bijlage 5: Rekenmethode		77
1.	Correctiefactor.....	77
2.	Berekening effectief bruikbare oppervlakte en kantelpunt.....	78
3.	Rekenvoorbeelden.....	81
Bijlage 6: Relatie tot de huidige normen en richtlijnen		88

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

In 2019 heeft Arane Adviseurs in verkeer en vervoer (vanaf nu: Arane) in opdracht van ProRail een 'risicomodel 2.0' ontwikkeld om de drukte te voorspellen die op perrons kan ontstaan. De grootste waarde van het model zit in het kunnen rangschikken van verschillende scenario's om perrons onderling te classificeren in termen van drukte. Daarmee kan het gebruikt worden als een hulpmiddel om de investeringen die gericht zijn op het beheersen van de mogelijke gevolgen van die drukte te prioriteren.

In opdracht van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW) heeft de onderzoeksgroep Stichting Crisislab (vanaf nu: Crisislab) in 2020 een review van het risicomodel 2.0 uitgevoerd. Hoewel de onderzoekers vonden dat het risicomodel een goede voorspeller is van drukte die kan ontstaan op perrons, stelden zij de aanname in het model dat een lineaire toename van het aantal reizigers in de gevarenzone leidt tot een grotere kans op het voordoen van incidenten ter discussie. Zij concludeerden dat het op basis van de beschikbare kennis niet mogelijk was om te berekenen wat het maximale aantal personen op een perron mag zijn voordat het incidenttype 'val van het perron in de spoorbak' met een bepaalde kans optreedt. Los van de daarvoor benodigde ontbrekende data spelen daarbij ook moeilijk voorspelbare gedragsaspecten van reizigers daarin mee.

Omdat de reizigersaantallen de komende decennia gaan toenemen en de vraag is of dit van invloed zal zijn op perronveiligheid, zijn Arane en Crisislab gevraagd om onderzoek te doen naar perronveiligheidsincidenten. Het ministerie van I&W, ProRail en NS Stations zijn hierbij vanuit de samenwerking in het kader van de Stationsagenda gezamenlijk opdrachtgever.

Het doel van dit onderzoek is te komen tot onderbouwde indicatoren (in ieder geval zo onderbouwd als mogelijk) die aangeven of en wanneer een toename in drukte leidt tot een 'exponentieel' (zie paragraaf 1.2) oplopend risico op perronveiligheidsincidenten omdat reizigersgedrag en loopstroomprocessen fundamenteel veranderen; een zogenoemd kantelpunt.¹ Inzicht in deze kantelpunten kan vervolgens de basis vormen voor een realistisch en praktisch handelingsperspectief voor de aanpak van perronveiligheidsrisico's. In paragraaf 1.2 gaan we nader in op de definities van deze termen.

¹ In de uitvraag voor deze opdracht wordt het kantelpunt als het moment omschreven waarop drukte leidt tot perronveiligheidsincidenten. Aangezien ook bij relatief weinig drukte al incidenten kunnen ontstaan, is de definitie in dit rapport aangescherpt en gekoppeld aan gedragsmatige en verkeerskundige condities.

1.2 Aanpak van het onderzoek

Onderzoeksvragen

Om het gewenste handelingsperspectief te bieden, hebben de volgende vier onderzoeksvragen de basis gevormd voor het onderzoek:

- 1) Wat zijn de perronveiligheidsrisico's die tot incidenten kunnen leiden?
- 2) Wat zijn de kantelpunten als gevolg waarvan een individueel perronveiligheidsrisico plotseling sterk kan toenemen?
- 3) Hoe verhouden deze kantelpunten zich tot geldende normeringen en ontwerpvoorschriften?
- 4) Wat zijn mogelijke handelingsperspectieven op basis van de verkregen inzichten?

Definities

Onder een *perronveiligheidsrisico* verstaan we elk risico (dus als combinatie van kans en effect) dat te relateren is aan het verkeerskundig gebruik van het perron. Denk daarbij bijvoorbeeld aan een val in de spoorbak, valincidenten bij stijgpunten (zoals roltrappen) en het ontstaan van lokale hoge dichtheden die tot verdrukking leiden bij het in- en uitstappen van de trein.

Onder een *perronveiligheidsincident* verstaan we situaties waarin een reiziger als gevolg van een of meer perronveiligheidsrisico('s) gewond raakt of komt te overlijden.

Het totale perronveiligheidsrisico bestaat uit de som van het *individueel risico* van iedere reiziger. Zie paragraaf 2.2 voor een nadere uitleg van het individueel risico.

Onder een *kantelpunt* verstaan we het punt waarop een toename in drukte plotseling leidt tot een 'exponentieel' oplopend individueel risico op perronveiligheidsincidenten als gevolg van veranderend gedrag van reizigers door veranderende verkeerskundige processen (*human factors*).² Overigens, hoewel we in wiskundige zin niet met zekerheid kunnen zeggen dat het risico exponentieel oploopt, bedoelen we dat de stijging met zekerheid een stuk sterker is dan lineair. Het gaat hierbij dus om verkeerskundige kantelpunten die weergeven wanneer vanuit verkeerskundig perspectief nieuwe patronen ontstaan, waarbij reizigersgedrag steeds een belangrijke factor is. Dit zijn patronen die we in de huidige praktijk niet observeren en registreren. Het onderzoek richt zich daarom op het inzichtelijk maken van kantelpunten die tot grote(re) risico's op incidenten kunnen leiden, bijvoorbeeld omdat een domino-effect optreedt.

² Deze definitie is een nadere uitwerking, op basis van de gehouden werksessies, van de aanzet tot kantelpunt die u uw uitvraag hanteert: "Een kantelpunt is dus een maatstaf voor wanneer drukte op een perron onverantwoord wordt, het risico op incidenten te groot wordt." danwel "[...] het kantelpunt: vanaf wanneer leidt drukte tot perronveiligheidsincidenten?"

Onder *drukke* verstaan we de hoeveelheid mensen per vierkante meter (*dichtheid* van een gebied) en het aantal personen per minuut (*intensiteit* van een doorsnede van de reizigersstroom). De dichtheid is uit te splitsen in de *globale* dichtheid en de *lokale* dichtheid. De globale dichtheid bepalen we op het stuk van perron dat reizigers redelijkerwijs gebruiken: het gedeelte (in de lengterichting) waar treinen normaliter tot stilstand komen en waar reizigers wachten. De lokale dichtheid betreft een specifiek (en dus kleiner) gebied van de het perron (binnen deze studie hanteren we een meetgebied van ongeveer 5 meter), bijvoorbeeld het uitloopgebied van een stijgpunt zoals een roltrap.

Hoge lokale dichtheid niet per definitie een gevolg van hoge globale dichtheid

Perronveiligheidsincidenten door drukke manifesteren zich lokaal op een druk perrondeel. Hoewel perronveiligheidsincidenten veroorzaakt door drukke in een gebied altijd het gevolg zijn van een hoge lokale dichtheid, hoeft die lokale dichtheid niet altijd het gevolg te zijn van een hoge globale dichtheid.

Zo kan bijvoorbeeld een val op de overgang van de roltrap naar het perron worden veroorzaakt door een hoge lokale dichtheid in het uitloopgebied (vanwege een hoge intensiteit (en dus het aantal personen per minuut) op de roltrap) waardoor er geen mogelijkheid bestaat om 'uit te lopen'. Deze hoge lokale dichtheid kan het gevolg zijn van een vol perron (en dus een hoge globale dichtheid), maar kan ook het gevolg zijn van slechte spreiding waardoor het alleen erg druk is rond het stijgpunt (en dus sprake is van alleen een hoge lokale dichtheid). In het onderzoek gaan we op zoek naar de oorzaken van hoge lokale dichtheden, en beoordelen we de risico's van die lokale hoge dichtheden.

Evident is er een relatie tussen de dichtheid en de intensiteit. De drukke in termen van dichtheid op het perron is onderhevig aan de *instroom* op het perron en de *uitstroom* van het perron via de perronopgangen of in/uit de trein. De in- en uitstroom is een voorspellende factor voor de wijze waarop de drukke op het perron zich op korte termijn zal ontwikkelen.

Onderzoeksaanpak

Om de hierboven genoemde onderzoeksvragen te beantwoorden, hebben we ons onderzoek als volgt aangepakt. We hebben:

- > Op basis van literatuuronderzoek en werksessies met experts van het ministerie van IenW, NS Stations en ProRail acht perronveiligheidsrisico's geïdentificeerd.
- > De geïdentificeerde risico's kwalitatief geanalyseerd door de verkeerskundige processen in kaart te brengen en het (risicomijdende) gedrag te beschrijven. Hiervoor zijn ook videobeelden van drukke spitsen en koningsdag bekeken en is een avond meegelopen bij de crowd control operatie bij een zogeheten 'triple-event' op station Bijlmer Arena.
- > De voorwaarden onderzocht waarbij door drukke een 'normale' situatie (dus een 'lineaire' toename van een risico door drukke) een kantelpunt bereikt en er plotseling sprake is van een 'exponentieel' oplopende kans op perronveiligheidsincidenten.

- > Wetenschappelijke literatuur en perronveiligheidsdata gebruikt om kwantitatieve analyses uit te voeren van de omstandigheden die randvoorwaardelijk zijn voor het optreden van kantelpunten.
- > Een simulatiemodel ontwikkeld om specifiek voor perrons het risico op het vallen in de spoorbak door drukte te modelleren en daar op een andere wijze het kantelpunt uit te halen.
- > Gesprekken gevoerd met internationale experts (zie onderstaande tabel) op het gebied van perronveiligheid om beter inzicht te krijgen in de internationale aanpak van perronveiligheidsrisico's.
- > Aan de hand van gangbaar Nederlands veiligheidsbeleid dat het Europese ALARP-principe (*as low as reasonably practicable*) volgt en op basis van de uitkomsten uit bovenstaande onderdelen beschreven hoe proportioneel perronveiligheidsbeleid vormgegeven kan worden. Hieruit volgt dan het handelingsperspectief.

Tabel 1 Overzicht internationale experts

Internationale expert	Omschrijving (o.m.)
dr. Ernst Bosina	Ernst Bosina is verbonden aan het Instituut voor Transportplanning en Systemen (IVT) aan de ETH Zürich, zijn onderzoek richt zich op het begrijpen en verbeteren van voetgangersdynamica en -veiligheid.
Shravan Patel	Shravan Patel is 'Crowding Analysis Manager' bij Network Rail, en werkt aan het modelleren van openbaar vervoer en spoorveiligheid in Groot-Brittannië.
Shintaro Terabe	Shintaro Terabe is verbonden aan de Tokyo University of Science, waar hij zich bezighoudt met onderzoek naar transport(planning) en civiele techniek.
Katharine Hunter-Zaworski Ph.D.	Katharine Hunter-Zaworski is directeur van het 'National Center for Accessible Transportation' aan de Oregon State University. Haar onderzoek richt zich op de toegankelijkheid en veiligheid van het openbaar vervoer.
prof. dr. Armin Seyfried	Armin Seyfried is verbonden aan het Duitse Forschungszentrum Jülich. Zijn onderzoek richt zich voornamelijk op het gedrag van menigtes en het ontwikkelen van beheers- en veiligheidsstrategieën.

1.3 Leeswijzer

Deze rapportage is opgebouwd uit vijf hoofdstukken en zes overwegend technische bijlagen.

Na dit inleidende hoofdstuk volgt hoofdstuk 2, waarin we ingaan op de geïdentificeerde perronveiligheidsrisico's en de wijze waarop we die beoordeeld hebben. In hoofdstuk 3 beschrijven we vervolgens de kwalitatieve en kwantitatieve resultaten die voort zijn gekomen uit de beoordeling van de risico's. Op basis daarvan beschrijven we in hoofdstuk 4 de implicaties die de resultaten uit dit onderzoek hebben voor perronveiligheidsbeleid. In hoofdstuk 5 vatten we ons onderzoek samen en zetten we afsluitend de conclusies van ons onderzoek op een rij.

2 Risico's en hun kantelpunten

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk staan we kort stil bij de perronveiligheidsrisico's die we op basis van literatuuronderzoek en werksessies hebben geïdentificeerd. Vervolgens geven we een beschrijving van de beoordelingswijze die we hebben toegepast om de risico's vervolgens in te delen in een risicoprofiel dat bestaat uit drie verschillende domeinen.

2.2 Perronveiligheidsrisico's

Op basis van ons literatuuronderzoek (zie bijlage 1) en daaropvolgende werksessie(s) hebben we acht verschillende perronveiligheidsrisico's geïdentificeerd die we verder analyseren:

- 1) Val in spoorbak – Wachtend
- 2) Val in spoorbak – Lopend
- 3) Val in spoorbak – Wachtrij stijgpunt
- 4) Val in uitloopgebied bewegend stijgpunt
- 5) Val op/van een stijgpunt door drukte
- 6) Val tussen trein en perron bij het in- en uitstappen
- 7) Beklemming tussen treindeuren
- 8) Verdrukking of vertrapping door hoge dichtheid

Als we in deze rapportage spreken over risico's bedoelen we daarmee een risico uitgedrukt in een individueel risico (IR), in lijn met de kerngedachte van het veiligheidsbeleid in Nederland dat sinds de eind jaren tachtig gestalte heeft gekregen. Uitgangspunt van het in Nederland breed gehanteerde veiligheidsbeleid is dat risico's objectiveerbaar zijn en dat veiligheidsbeleid gebaseerd moet worden op wetenschappelijke kennis over die risico's.

Het EU-spoor beleid is dat de lidstaten hun nationaal beleid zo inrichten dat een constante verbetering van de spoorveiligheid wordt nagestreefd volgens het ALARP-principe. Dit betekent dat de investeringen in verbetering in verhouding moeten staan tot de bereikte verhoging van de veiligheid. In dit rapport hebben we hiervoor de in het Nederlandse veiligheidsbeleid breed gebruikte investeringsnorm van € 75.000 per DALY gebruikt.

Hoe verhoudt deze norm zich tot Nederlandse en Europese regelgeving?

De in Nederland breed gehanteerde norm voor het IR houdt in dat in beginsel niemand in Nederland blootgesteld mag worden aan een kans op sterfte door een hoofdactiviteit waaraan deze persoon een heel jaar is blootgesteld van groter dan een op de honderdduizend jaar (genoteerd als IR 10-5). De normering van het IR op 10-5 is sinds publicatie van de nota (mede door jurisprudentie van de Raad van State) geaccepteerd als een wettelijk verplichtende norm op diverse beleidsterreinen.

Zo'n hoofdactiviteit (een risicocompartiment) kent natuurlijk veel mogelijke deelrisico's. Per deelrisico van een hoofdrisico (zoals dus het perronveiligheidsrisico als onderdeel van het spoorvervoerrisico) is het maximaal toelaatbare IR een overlijdenskans van een op de miljoen jaar (genoteerd als 10-6). De gedachte daarachter is dat de som van deelrisico's optelt tot maximaal het toelaatbare IR van een hoofdrisico en dat men in de praktijk niet wordt blootgesteld aan meer dan tien deelrisico's op hetzelfde moment. Voor perronveiligheid is deze niet vastgelegd.

Een Europese beschikking³ uit 2009 beschrijft op basis van Richtlijn 2004/49/EG dat gemeenschappelijke veiligheidsdoelen (GVD) en -methoden geleidelijk geïntroduceerd moeten worden om een hoog veiligheidsniveau te handhaven en dat niveau indien nodig en redelijkerwijs uitvoerbaar te verbeteren. Voor deze reeks GVD hebben het Europees Spoorwegbureau en de Commissie nationale referentiewaarden (NRW) opgesteld die gebruikt kunnen worden om het veiligheidsniveau op het spoorwegsysteem te toetsen (risiconorm). De meeteenheid voor de NRW en GVD is het aantal slachtoffers en gewogen ernstige letsels (SGEL) uitgedrukt per miljard passagiers- of treinkilometer per jaar, waarbij één ernstig letsel statistisch gelijk is aan 0,1 overledene.

Jaarlijks onderzoekt het Europees Spoorwegbureau of de NRW en GVD zijn bereikt. Naast een berekening van de NRW en GVD is onderdeel van dat onderzoek de vraag of het aantal ernstige ongevallen per treinkilometer gedurende de voorgaande jaren stabiel is gebleven (of is toe-/afgenomen). Het criterium om dit te beoordelen is of er een statistisch significante toename was van het aantal relevante ernstige ongevallen per miljard treinkilometer.

De risico's op deze ernstige ongevallen zijn uitgesplitst naar risico's voor passagiers, risico's voor personeel of werknemers (inclusief personeel van onderaannemers), risico's van spoorovergangen, risico's voor onbevoegde personen op spoorwelterreinen, risico's voor anderen, en risico's voor de samenleving als geheel.

Wanneer het aantal ernstige ongevallen per miljard treinkilometer de daarvoor geldende tolerantie niet overschrijdt, wordt ervan uitgegaan dat er géén sprake is van een statistisch significante toename en wordt het resultaat van deze beoordelingsstap als 'positief' genoteerd.

Met het individueel risico is een precieze(re) duiding van het feitelijke risico (namelijk het individueel overlijdensrisico per passagierskilometer) te geven. Zwaar- en lichtgewonden worden daarnaast meegenomen als tweede maatstaf voor proportioneel veiligheidsbeleid, namelijk in de vorm van een investeringsnorm. Hoe groter het verlies aan gezonde levensjaren (DALY's, zie ook hoofdstuk 4), hoe hoger de investeringsnorm voor de aanpak van het risico.

³ Beschikking (EU) van de Commissie van 5 juni 2009 betreffende de vaststelling van gemeenschappelijke veiligheidsmethoden om te beoordelen of voldaan is aan de veiligheidsdoelen, als bedoeld in artikel 6 van Richtlijn 2004/49/EG van het Europees Parlement en de Raad (2009/460/EG).

2.3 Beoordelingswijze perronveiligheidsrisico's

Zoals in hoofdstuk 1 al kort genoemd hanteren we voor ieder perronveiligheidsrisico hetzelfde proces om een kantelpunt vast te stellen.

Kwalitatieve beoordelingswijze

Allereerst voeren we een kwalitatieve analyse uit waarbij we voor ieder perronveiligheidsrisico de 'normale' situatie beschrijven, waarna we beschrijven of er kantelpunten zijn door antwoord te geven op de vraag hoe de verkeerskundige processen veranderen bij toenemende drukte en de mate waarin dit van invloed is op de kans op (zwaardere) incidenten. We beschouwen daarbij steeds het individueel risico van de reizigers. In deze analyse nemen we ook omstandigheden mee die van invloed kunnen zijn op de grootte van risico's: verzwarende factoren. Denk daarbij bijvoorbeeld aan de populatie (forensen, toeristen of festivalgangers) die in meer of mindere mate risico lopen en het soort perron (doorgaande treinen of geen doorgaande treinen) waar het risico zich in meer of mindere mate voordoet.

Kwantitatieve beoordelingswijze

Vervolgens voeren we een kwantitatieve analyse uit waarbij we wetenschappelijke literatuur en beschikbare perronveiligheidsdata gebruiken om waar mogelijk tot objectieve waarden te komen op basis waarvan we de kantelpunten kunnen afleiden. Een voorbeeld hiervan is de benodigde dichtheid op een perron waarbij reizigers een val niet meer kunnen herstellen en een domino-effect kan optreden wanneer een persoon valt. Een ander voorbeeld is de benodigde dichtheid waarna mensen geen andere keuze meer hebben dan de gevarenzone op het perron te gebruiken om de wachten en/of lopen.

In deze rapportage deduceren wij een kantelpunt voor het aantal reizigers op het perron op grond van de literatuur en een eigen simulatiemodel. In de huidige praktijk hebben we geen observaties van situaties met een dichtheid op of boven dit kantelpunt. De registraties van ongevallen geven ook geen indicatie dat het kantelpunt momenteel wordt overschreden; er zijn geen ongevallen bekend waarbij het heel druk was. Vanwege dit gebrek aan empirische data kunnen we niets over de precieze omvang van het perronveiligheidsrisico boven het kantelpunt; het risico zelf kunnen we dus niet kwantificeren. Wel kunnen we modelmatig laten zien dat boven het kantelpunt (vooral) ook het risico snel toeneemt dat één of meerdere mensen tegelijkertijd bij een perronveiligheidsincident betrokken raken.

Uitkomst na kwalitatieve en kwantitatieve beoordeling: een risicoprofiel

Uit bovenstaande stappen volgt per geïdentificeerd risico een *risicoprofiel* dat drie domeinen kent en dat rekening houdt met de verschillende verkeerskundige processen die plaatsvinden op een perron en bijbehorende stijgpunten.

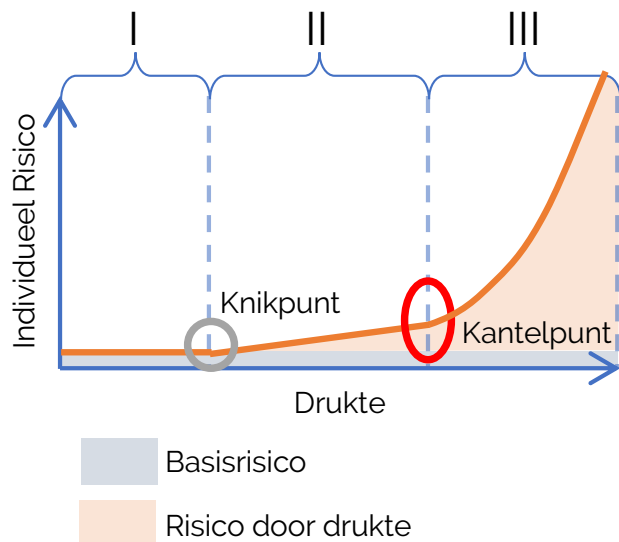
- > **Domein I** van het risicoprofiel beschrijft het deel waarbij het individueel perronveiligheidsrisico niet afhangt van de drukte.
- > **Domein II** van het risicoprofiel beschrijft het deel waarbij het individueel perronveiligheidsrisico 'lineair' toeneemt met de drukte.
- > **Domein III** van het risicoprofiel beschrijft het deel waarbij het individueel perronveiligheidsrisico 'exponentieel' toeneemt met de drukte.

We beschrijven de drie domeinen hierna meer precies:

Domein I

Bij ieder 'normaal' loopproces op het perron is altijd sprake van een risico: het 'domein I'-risico. Reizigers wachten op het perron, reizigers stappen de trein in en uit, reizigers lopen over het perron naar een wachtplek of naar een uitgang en reizigers maken gebruik van stijgpunten. En mensen kunnen daarbij namelijk altijd, ook op rustige momenten, in de spoorbak vallen als ze vrijwillig besluiten door de gevarezone te lopen en dan struikelen. Net zoals dat mensen altijd van een stijgpunt af kunnen vallen of kunnen vallen bij het afstappen van een roltrap. Dit risico is inherent aan het normale gebruik van het perron en de stijgpunten. Er is dan sprake van een individueel basisrisico, die aanwezig is in alle domeinen, zoals weergegeven in figuur 1.

In dit domein is de dichtheid dermate laag dat er nauwelijks interacties plaatsvinden tussen de reizigers op het perron en dat deze interacties dus ook geen aanleiding vormen voor een (significant) hoger risico dan het basisrisico.



Figuur 1 Het risicoprofiel met domein I, II en III Dit betreft een gestileerde weergave van het verloop van het individueel risico.

Domein II

Het risico op perronveiligheidsincidenten neemt op enig moment 'lineair' toe naarmate het drukker wordt, vanwege het toegenomen aantal interacties tussen verschillende reizigers. Dit is het eerste zogenoemde *knikpunt* in de grafiek van figuur 1.

Er worden meer reizigers blootgesteld en er is meer interactie tussen reizigers. Zo is het bij relatief kleine perrons eerder noodzakelijk om dicht langs de perronrand te lopen als er groepjes reizigers wachten. Dit betekent dat instromende reizigers een stuk door de gevarenzone moeten lopen om hun wachtplek verderop op het perron te bereiken. Bij een toenemende drukte zal dit zowel betekenen dat meer reizigers door de gevarenzone moeten lopen alsook dat ze een groter stuk door de gevarenzone moeten afleggen. Zodoende neemt het risico op een val in de spoorbak toe naarmate de drukte op het perron toeneemt.

Deze fase van het risicoprofiel wordt in de huidige situatie met regelmaat bereikt, bijvoorbeeld bij forenzenspitsen en in grotere mate bij verstoringen en evenementen. Dit is een risico van 'normaal' perrongebruik. Tot nu toe zijn er geen fatale incidenten bekend waarbij een (of meerdere) personen in de spoorbak terecht kwamen terwijl een trein op het perron arriveerde, echter is het natuurlijk niet uitgesloten dat binnen dit domein iemand in de spoorbak valt wanneer een trein passeert of arriveert. Wel verwachten we vanwege het risicomijdende gedrag van reizigers dat een dergelijk incident ook niet snel zal plaatsvinden. Aan het einde van dit hoofdstuk gaan we hier verder op in.

Merk dus op dat er in zowel domein I en II er een 'normaal' individueel risico (het basisrisico) bestaat op incidenten waarbij een (of meerdere) dodelijke slachtoffer(s) valt (of vallen).

Net als in het exponentiele domein III kunnen we niet kwantitatief aantonen dat de toename van het risico mathematisch lineair is. Wel bestaat er een directe relatie tussen het aantal reizigers op het perron en de kans dat daarbij een verstoring ontstaat die mogelijk tot een incident leidt, de *toename* van het individuele risico, is het risico dat we toekennen aan drukte. Aan het eind van domein II is het risico op een perronveiligheidsincident dus groter dan aan het begin. In figuur 1 geven we grafisch weer dat het risico waarbij drukte als oorzaak kan worden beschouwd (oranje oppervlak) bovenop het basisrisico (blauwe oppervlak) komt in domein II. De exacte verhouding tussen basisrisico en risico door drukte bij verschillende drukteniveaus zijn niet eenvoudig te bepalen omdat er geen goede gegevens zijn over het aantal incidenten, waarbij de data verrijkt is met de dan geldende drukte. Vanuit de incidentdatabase van ProRail⁴ hebben we drukte als oorzaak van incidenten geprobeerd te isoleren, maar deze data bevat onvoldoende datapunten om een significante uitspraak te doen over de relatie tussen drukte en het individueel risico.

De overgang van domein I naar domein II is geen kantelpunt: hoewel de toegenomen drukte leidt tot een groter individueel risico, leidt de toegenomen drukte niet tot een veel grotere kans op een *ernstig* incident *vanwege* die drukte. Voordat een incident plaatsvindt binnen domein II is een zeer ongelukkige combinatie van omstandigheden nodig, vooral om tot een incident met een groot effect te komen. Bovendien valt de drukte binnen de ordegrrootte van wat men 'normaal' gesproken kan verwachten op een perron. Een incident in dit domein kan pas plaatsvinden wanneer iemand precies op het moment dat een persoon langsloopt door de gevarezone een beweging in de richting van de spoorbak maakt. Daarbij moet deze beweging ook nog groot genoeg zijn dat deze niet meer gecompenseerd kan worden om een val te voorkomen. Een ander voorbeeld is een val van de trap: naar verwachting is de kans dat er iemand van de trap valt groter dan in domein II dan in domein I.

Domein III

Maar, boven een bepaalde drukte op het perron veranderen de verkeerskundige processen *vanwege* een toename van drukte, hierdoor kan een reiziger verstoringen in de menigte onvoldoende compenseren. Het risicomijdende gedrag dat aanwezig is in domein II (zoals het niet betreden van een perron), kan dan niet meer plaatsvinden (zie einde hoofdstuk). De kans op een incident en/of het effect van een incident neemt dan 'exponentieel' toe in relatie tot de drukte. Er kunnen bijvoorbeeld domino-effecten ontstaan (ofwel een kettingreactie) waarbij meerdere reizigers struikelen en vallen. Anders gezegd: zodra dit punt bereikt wordt (het *kantelpunt*) wordt het individueel risico op perronveiligheidsincidenten 'exponentieel' groter. Kenmerkend voor de incidenten in dit domein is dus het veranderende gedrag en veranderende processen waarbij de kans op een incident voor een reiziger sterk toeneemt en/of het effect van een incident sterk toeneemt en er bijvoorbeeld één of meerdere dodelijk(e) slachtoffer(s) valt of vallen.

⁴ Zie bijlage 2. Merk op dat niet alle vervoerders over incidenten rapporteren en dat mogelijk niet alle incidenten worden gerapporteerd.

Een voorbeeld van deze veranderende processen zijn wachtende reizigers die als gevolg van drukte niet langer een wachtplek kunnen vinden op het perron. Het risico op een val in de spoorbak zal toenemen omdat, bij verder toenemende drukte, steeds meer reizigers staan te wachten op een plek waar een beweging van achteren in de richting van de spoorbak kan leiden tot een val in de spoorbak.

Zoals gezegd geven we in figuur 1 schematisch weer hoe de verschillende domeinen zich tot elkaar verhouden, afgezet tegen de drukte (en het 'basisrisico') en de relatieve grootte van het individueel perronveiligheidsrisico.

Nogmaals: we spreken pas van een kantelpunt op het moment dat een risico zich op het risicoprofiel tussen domein II en domein III begeeft. De start van *domein III* is het gedeelte van het risicoprofiel waarbij een verder toenemende drukte vanaf domein II als gevolg van verkeerskundige processen zal leiden tot een 'exponentieel' toenemend perronveiligheidsrisico. Als de drukte op het perron een bepaalde dichtheid overschrijdt, kunnen bijvoorbeeld domino-effecten optreden. Als gevolg daarvan kunnen verstoringen die uit de buurt van de gevarenzone plaatsvinden leiden tot gevolgen in de gevarenzone van het perron. De kans op een groot incident wordt daarmee aanzienlijk groter op het moment dat mensen zich in de gevarenzone begeven.

Een nadere beschouwing van de verschillen in human factors tussen domein I, II en III

Zoals al opgemerkt in de eerdere review door Crisislab is het aantal dodelijk of zware ongevallen, al dan niet door drukte, bijzonder constant en voor deskundigen onverwacht laag. Niet in alleen in Nederland maar ook bij onze internationale respondenten. De al eerder gegeven hypothetische verklaring is dat hier een bekend human factors fenomeen zichtbaar is: de menselijke risicothermostaat in actie.

Allereerst speelt de perceptie van risico een cruciale rol in hoe individuen zich gedragen in potentieel gevaarlijke omgevingen zoals treinperrons. Mensen zijn over het algemeen geneigd risico's te vermijden, vooral als de gevolgen ernstig kunnen zijn zoals in het geval van treinongelukken. Deze risicobewustheid leidt tot voorzichtig gedrag, zoals het vermijden van te dicht bij het spoor staan of oversteken van de veiligheidslijnen. En wanneer ze wel op een plek zijn waarbij de reizigers de perceptie heeft dat deze potentieel gevaarlijk is, kunnen ze extra oplettend zijn. Ook al gebeuren er zelden ernstige incidenten, de mogelijke ernst ervan is voldoende om voorzichtigheid bij de meeste reizigers te bewerkstelligen. Dit voorzichtige gedrag wordt verder versterkt door veiligheidsmaatregelen zoals markeringen van de gevarenzone.

Daarnaast speelt zelforganisatie een belangrijke rol in het handhaven van veiligheid op drukke perrons. Zelforganisatie verwijst naar het spontane ontstaan van orde en gestructureerd gedrag zonder centrale sturing. Op perrons ontstaat dit vaak door het nabootsen van gedrag. Wanneer enkele reizigers voorbeeldgedrag vertonen door verantwoord en veilig te handelen, zoals ruimte overhouden voor anderen, is de kans groot dat anderen dit gedrag volgen. Dit fenomeen wordt versterkt door de menselijke neiging om zich aan te passen aan sociale normen en het gedrag van anderen in

groepen. Bovendien draagt het ergonomische ontwerp van perrons bij aan dit veilige gedrag, dan gaat het om elementen zoals duidelijke markeringen, veilige wachtruimtes en visuele waarschuwingssignalen. We vermoeden dat de combinatie van individuele risicoperceptie en collectieve zelforganisatie zorgt voor een omgeving waarin reizigers instinctief risicomijdend gedrag vertonen, zelfs onder drukke omstandigheden zoals spitsen, verstoringen van de dienstregeling en evenementen.

Een beschouwing van het kwantificeren van het individueel risico per domein

Om tot een handelingsperspectief te komen is het wenselijk om het IR kwantitatief te maken en te toetsen of het IR voldoet aan de eerdergenoemde 10^{-6} -norm. De uitkomsten daarvan kunnen worden gekoppeld aan een (beleidsmatige) risicoacceptatie.

Echter, zoals in hoofdstuk 1 aangegeven zeggen de kantelpunten zelf niets over de absolute grootte van het perronveiligheidsrisico en dus niets over het IR. Om tot een inschatting dan wel berekening voor een individueel perron te komen zullen de eigenschappen van het perron, de relevante omstandigheden en de mate van drukte op het perron afgezet moeten worden tegen de gevonden kantelpunten. Op basis van deze berekeningen zal vervolgens een nieuwe afweging gemaakt moeten worden over de acceptatie van grootte van het IR en de proportionaliteit van eventuele maatregelen.

3 De kantelpunten per perronveiligheidsrisico

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk beoordelen we de acht geïdentificeerde perronveiligheidsrisico's zoals genoemd in sectie 2.2 volgens de in het vorige hoofdstuk beschreven beoordelingswijze.

Allereerst staan we stil bij het enige door ons aangetroffen kantelpunt voor aantal wachtende reizigers, waar we later in dit hoofdstuk in het beschrijven van de risicoprofielen bij op terug komen. Per risico bepalen we dan het risicoprofiel op basis van een kwalitatieve beoordeling. We maken een inschatting van de risico's die kunnen optreden in domein II en domein III. Daarbij beoordelen we of er een kantelpunt is, onder welke voorwaarden die zich voordoen en of er verzwarende factoren zijn die invloed hebben op het kantelpunt. Vervolgens maken we dit kantelpunt waar mogelijk kwantitatief identificeerbaar met verkeerskundige analyses. In hoofdstuk 4 zullen we vervolgens op basis van deze resultaten ingaan op de beleidsmatige implicaties die de resultaten in dit hoofdstuk met zich meebrengen.

3.2 Kantelpunt voor aantal wachtende reizigers

Uit onze analyses is één daadwerkelijk kantelpunt naar voren gekomen dat een relatie heeft met meerdere perronveiligheidsrisico's. We beginnen met de definitie en uitwerking van dit kantelpunt, zodat deze later in de risicoprofielen gebruikt kunnen worden. Bij een toenemend aantal wachtende reizigers op het perron zien we dat uiteindelijk een kantelpunt bereikt wordt, waarbij in dit geval een domino-effect optreedt waarbij één of meerdere reizigers in de perronbak kunnen vallen. Dit kantelpunt wordt bepaald door een samenspel van reizigersgedrag en de dichtheid op het perron. Er zijn twee belangrijke voorwaarden waaronder een kantelpunt kan optreden:

- > **Er zijn reizigers in de gevarenzone:** Dit fenomeen wordt reeds waargenomen bij relatief lage drukte. Het gebeurt wanneer reizigers, door gebrek aan ruimte, in de gevarenzone langs de perronrand lopen of gaan wachten.
- > **Verstoringen worden niet meer geabsorbeerd:** De tweede voorwaarde is dat de dichtheid op delen van het perron dermate hoog moet zijn dat verstoringen, zoals duwen of struikelen, niet meer geabsorbeerd kunnen worden door de menigte en reizigers geen risico-compenserend gedrag meer kunnen vertonen.

De combinatie van deze twee factoren zorgt ervoor dat een verstoring ertoe leidt dat één of meer reizigers in de gevarenzone in de spoorbak vallen. In dat geval is de kans op een incident dus veel groter en tevens is het effect groter omdat dit incident niet beperkt hoeft te blijven tot de val van één reiziger.

Inzichten over wachtdichtheid en gedrag

Gebaseerd op camerabeelden en smart station data⁵, blijkt dat reizigers zich goed over een perron verdelen naarmate het drukker wordt, waarbij tot een globale dichtheid van ongeveer 2 p/m^2 (binnen de bandbreedte van $1,75 - 2,25$) geen hoge lokale dichtheden op het perron ontstaan waarbij verstoringen niet meer worden geabsorbeerd (zie bijlage 3 voor de deductie hiervan; zie bijlage 5 voor een rekenmethode voor globale dichtheid). Dat noemen we de natuurlijke wachtdichtheid; de onderliggende gedragsaannname is dat wanneer de natuurlijke wachtdichtheid lokaal bereikt is, reizigers elders nog een plek vinden waar de lokale dichtheid lager is, en daar dan heen lopen. Dat reizigers zich goed over het perron verdelen betekent overigens niet dat er geen incidenten kunnen optreden als gevolg van de toegenomen interactie tussen reizigers in domein II.

Met de beschikbare informatie is het niet mogelijk de natuurlijke wacht dichtheid met een 'significante zekerheid' vast te stellen. Op basis van een verkeerskundige analyse met fundamenteel diagrammen schatten we de onzekerheid in (zie ook bijlage 3). We verwachten dat de natuurlijke wachtdichtheid binnen de bandbreedte $1,75 - 2,25$ ligt.

Als de dichtheid lokaal, in dit geval over een perronsegment van 5 meter lengte, stijgt tot boven de 3 tot $4,5 \text{ p/m}^2$, dan blijkt dat het vermogen van de menigte om verstoringen te absorberen sterk afneemt en dat er een domino-effect ontstaat (zie bijlage 4). Boven deze dichtheden zijn reizigers dus niet meer in staat risicomijdend gedrag uit te vertonen; een val van meerdere reizigers wordt daarmee onoverkomelijk.

Definitie van het kantelpunt voor wachtende reizigers

Het kantelpunt voor wachtende reizigers wordt bereikt wanneer de globale dichtheid de natuurlijke dichtheid van 2 p/m^2 op het gehele bruikbare perron overschrijdt (zie onderstaande definitie). Zodra dit punt bereikt is, begint een transitie naar een instabiele fase waarin het absorptievermogen verdwijnt en de kans op incidenten plotseling exponentieel stijgt. Dit kan verschillende vormen aannemen:

- > Een "vlek" van hoge dichtheid die zich vanuit het stijgpunt verspreidt, waarbij de dichtheden snel ver boven de 3 p/m^2 uitstijgen en de groep reizigers op het perron instabiel wordt.
- > Een geleidelijke toename van de dichtheid over een groter deel van het perron, wat na verloop van tijd leidt tot een groot risico wanneer de dichtheid de 3 p/m^2 overschrijdt.

Op basis van onze expert judgement, waarbij ook loopstroom-experts van de TU Delft zijn geraadpleegd, wordt het eerste proces als het meest waarschijnlijk beschouwd, hoewel dit nog niet direct blijkt uit onze waarnemingen. Het precieze gedrag van reizigers bij dichtheden boven de natuurlijke dichtheidsgrens is onbekend, waardoor de transitie van 2 naar $3+ \text{ p/m}^2$ niet volledig in kaart te brengen is.

⁵ Dichtheidsdata voor Utrecht spoor 5, Eindhoven en Bijlmer Arena, zie ook bijlage 3.

We definiëren het kantelpunt voor wachtende reizigers als volgt:

Het aantal wachtende reizigers op het perron waarbij de globale dichtheid van 2 p/m^2 wordt bereikt. Het oppervlak dat we hiervoor gebruiken is het bruikbare (het bereikbare deel waar de trein halteert) perronoppervlak exclusief gevarenzone.

De definitie van het bruikbare perronoppervlak is hierin belangrijk. Met betrekking tot perronbreedte nemen we de gevarenzone niet mee, omdat hier in het algemeen weinig wachtende reizigers staan en het gebruik van de gevarenzone *by design* ongewenst is. Qua perronlengte is er meer onzekerheid over de bruikbaarheid. Op basis van inzichten uit de observaties (videobeelden en crowd control) en expert judgement nemen we nu aan dat het bruikbare perrondeel begrensd is door de haltepositie van de trein en 200 meter rond een gecentreerd stijgpunt. In bijlage 5 gaan we nader in op de berekenmethode, geven we nadere voorbeelden en bespreken we de onzekerheden. Belangrijkste onzekerheid vanwege gebrek aan empirische data is het bruikbare perronoppervlak bij kopontsluitingen (we stellen dat deze tussen de 150 en 200 meter ligt waarbij 175 voorsnog als rekengetal gebruikt kan worden) en het effect van (grote) obstakels. Aanvullend empirisch onderzoek is nodig om hier meer betrouwbare uitspraken over te doen.

Het kantelpunt en de dichtheden in perspectief

Om het kantelpunt en de natuurlijke wachtdichtheid van 2 p/m^2 in perspectief te plaatsen vergelijken we deze met het in de verkeerskunde veel gebruikte Level-Of-Service (LOS) concept van Fruin en zogeheten 'Voetgangers Fundamentele Diagrammen' (FD).

Levels-Of-Service

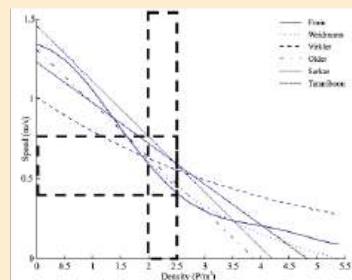
Level-of-Service (LoS) voor voetgangers, gebaseerd op het concept van Fruin, is een maatstaf die de kwaliteit van de loopomgeving aangeeft op basis van factoren zoals dichtheid, snelheid en intensiteit van beweging, en het comfort van voetgangers. Dit concept verdeelt de loopomstandigheden in verschillende categorieën, variërend van LoS A (vrije beweging met veel persoonlijke ruimte) tot LoS F (extreem druk en beperkte bewegingsvrijheid), waardoor het mogelijk is om de voetgangerservaring en -veiligheid in verschillende scenario's te beoordelen. Een dichtheid van 2 p/m^2 valt in een LOS-niveau E voor lopende reizigers op een perron, wat wil zeggen dat reizigers niet met hun gewenste snelheid kunnen lopen en zo af en toe iemand licht kunnen aanraken. Voor wachtende reizigers, die de meerderheid op een perron zullen vormen, valt dezelfde dichtheid in een LOS-niveau D.

Wanneer de dichtheid vanaf 2 p/m^2 verder zal oplopen zal het LOS-niveau voor de lopende reizigers snel zakken naar niveau F. Het zal daarom ook steeds lastiger worden om door de wachtende reizigers een route te vinden naar een geschikte wachtplek. Men zal zich steeds meer door de massa heen moeten wurmen, met als gevolg een toename aan fysiek contact met andere reizigers. Daarbij zal het lopen via de gevarenzone steeds aantrekkelijker worden.

Voetgangers Fundamentele Diagrammen

De zogeheten Voetgangers FD beschrijven de relatie tussen dichtheden, stromen en snelheden van voetgangers. Deze relatie is context afhankelijk en is onder meer beïnvloedbaar door de soort populatie en het type voetgangersstromen (unidirectioneel, bidirectioneel, kruisend).

In figuur 2 is een collectie van verschillende FD's afgebeeld, afgezet tegen de dichtheid (p/m^2) en snelheid (m/s) van voetgangers. Daarin is af te lezen dat bij dichtheden tussen de 2 en 2,5 p/m^2 voetgangers nog met snelheden tussen de 0,4 en 0,75 m/s kunnen lopen. Dat betekent dat reizigers op een perron hierbij nog door kunnen lopen naar hun gewenste wachtplek, maar dat dat wel met gematigde snelheid gaat. Hierbij moet wel opgemerkt worden dat deze FD's er vanuit gaan dat alle voetgangers bewegen (en dus niet dat een deel stil staat op het perron).



Figuur 2 Verschillende Voetganger FD's.

In bijlage 3 gaan we dieper in op de relatie tussen FD's en het kantelpunt en gebruiken we deze relatie om uitspraken te doen over de onzekerheid rondom de natuurlijke wachtdichtheid.

3.3 De risicothermostaat bij val in de spoorbak

Voor de risico's gerelateerd aan een val in de spoorbak beginnen we met een analyse van human factors en de eerder genoemde risicothermostaat. Hiermee duiden we het geobserveerde gedrag van reizigers en beredeneren we wat er na het overschrijden van het kantelpunt voor wachtende reizigers gebeurt.

Drukke wordt in de ProRail database een aantal maal als reden gegeven voor een val in de spoorbak. Echter vond een incident nooit plaats op momenten dat er een treinbeweging op hetzelfde spoor plaatsvond. Een mogelijke hypothese (zie ook de review van Crisilab (2020)) is daarom dat op het moment dat een trein aankomt, de aanwezigen in de gevarenszone op het perron risico-compenserend gedrag vertonen.

Wetenschappers als Chaucy Starr (1969)⁶, Gerald Wilde (1976)⁷ en John Adams (1985)⁸ staan aan de basis van het inzicht dat de mens geen willoze risico-ontvanger is maar zich actief verhoudt tot het risico. Dit betekent dat wanneer de mens zich onveilig voelt, hij extra beschermingsmaatregelen neemt en wanneer hij zich veilig voelt juist weer minder veiligheidsmaatregelen neemt. Door hen wordt dit de menselijke risicothermostaat genoemd.

⁶ Starr, C. 1969. Social benefit versus technological risk. Science 165 (3899), pp. 1232-1238.

⁷ Wilde, G. 1976. The risk compensation theory of accident causation and its practical consequences for accident prevention. Paper presented at the annual meeting of the Österreichische Gesellschaft für Unfallchirurgie, Salzburg.

⁸ Adams, J.G.U. 1985. Smeed's Law, seat belts and the emperor's new clothes. In Human behaviour and traffic safety, L.Evans & R.Schwing (eds), 191-257. New York: Plenum Press.

In zijn boek 'Risk' uit 1995 heeft John Adams dat modelmatig in de volgende figuur samengevat (p.16):



Figuur 3 Menselijke risicothermostaat (John Adams, 1995)

Toegepast op het risico 'vallen in de spoorbak' in domein I en II betekent dit dat mensen zolang er geen trein aankomt het risico op het vallen in de bak als niet zo hoog inschatten en daarom relatief makkelijk door de gevarenczone heenlopen. Hierbij kan een onjuiste risico inschatting worden gemaakt omdat iemand bijvoorbeeld geen rekening houdt met een plotse beweging van een ander die op het perron staat te wachten of omdat iemand zichzelf verstart. In de ongevalsdata (waaronder filmpjes en mediaberichten) zijn dit type ongevallen dan ook zichtbaar. Zodra echter een trein aankomt verhoogt de risicoperceptie zeer sterk: alle aanwezigen zullen bijna instinctief een stap van de perronrand af zetten. Deze (overmatige) risicocompensatie is dan de verklaring dat er in de praktijk nooit iemand voor een aanrijdende trein valt in domein I en II, waar mensen op het perron nog bewegingsvrijheid hebben.

Redenerend vanuit de risicothermostaat zullen lopende reizigers in domein I de gevarenczone mijden omdat er geen beloning tegenover staat. In domein II is de beloning dat je via de gevarenczone makkelijker naar een meer comfortabele plek op het perron kunt lopen. Echter doen ze dat dan alleen op het moment dat ze weten dat er geen trein aankomt.⁹

Een observatie in domein I is overigens dat wachtende reizigers de beloning van het in de zon kunnen staan al genoeg kunnen vinden om in de gevarenczone te wachten, zoals bijvoorbeeld op Utrecht Centraal regelmatig waarneembaar is. De gevarenczone is dan net het deel van het perron dat niet in de schaduw van de overkapping ligt. In domein II observeren we dat reizigers in de gevarenczone wachten en dat deze vanwege de risicothermostaat een stap naar achter doen als de trein arriveert.

In domein III is het essentiële verschil dat wachtende reizigers geen bewegingsvrijheid meer hebben vanwege de drukte die hen samenpakt. Er is met andere woorden in

⁹ Een discussiepunt is de invloed van oordoppen op het risico van het vallen in de spoorbak. Verwacht zou kunnen worden dat reizigers die door de gevarenczone lopen met oordoppen een aankomende trein niet horen aankomen en daardoor minder goed risico compenserend gedrag kunnen vertonen. In de cijfers is zo iets niet zichtbaar. Mogelijk dat een reiziger met oordoppen juist extra goed kijkt of er een trein aankomt.

domein III geen ruimte meer voor risico compenserend gedrag als je eenmaal op het perron vaststaat.

Onze hypothese is echter wel dat wanneer voor aankomende reizigers op het perron het tijdig duidelijk is dat het perron overvol is (d.w.z. boven de natuurlijke wachtdichtheid van 2 pp/m²), deze aankomende reizigers het perron zullen willen vermijden, en het perron dus niet betreden. Het model van Adams maakt duidelijk dat dit gedrag afhangt van de 'bereidheid risico's te lopen' die bijvoorbeeld door alcoholgebruik sterk verhoogd wordt en door de gepercipieerde beloning die met het risiconemen gepaard gaat. Zo kan bijvoorbeeld het halen van de laatste trein als een belangrijke beloning gezien worden.

3.4 Val in de spoorbak - Wachtend

Vanaf deze paragraaf zullen we het risicoprofiel per geïdentificeerd risico opstellen.

Risicoprofiel

In domein I, op zeer rustige perrons, staan reizigers slechts sporadisch in de gevarenzone. De kans op een valincident in de spoorbak is hier minimaal, aangezien het gebrek aan drukte betekent dat reizigers een wachtplek buiten de gevarenzone kunnen kiezen.

Naarmate de drukte toeneemt, bewegen we ons naar domein II. Hier kiezen reizigers er soms voor om in de gevarenzone te wachten vanwege de beperkte beschikbare ruimte. Alhoewel dit niet strikt noodzakelijk is omdat er elders nog voldoende ruimte is, observeren we dat reizigers van gevarenzone gebruik maken in dit domein. Ondanks de verhoogde aanwezigheid in de gevarenzone, kunnen verstoringen zoals duwen of struikelen nog steeds grotendeels worden geabsorbeerd door de wachtende reiziger en/of de menigte. Bovendien zijn de wachtende reizigers vanwege hun risicothermostaat extra alert op aankomende treinen. In deze fase is er een risico op de val van een enkele reiziger in de spoorbak, maar het risico op een kettingreactie blijft beperkt.



Figuur 4 Voorbeeld van wachtende reizigers bij aankomst trein tijdens crowd control operatie op Bijlmer Arena

Domein III wordt bereikt wanneer de drukte op het perron dermate toeneemt dat een verstoring leidt tot het valincident van één of meerdere reizigers in de spoorbak. Dit stadium treedt op wanneer kantelpunt voor wachtende reizigers wordt bereikt. Bij de verhoogde lokale dichtheden die dan ontstaan kunnen verstoringen die ver van de perronrand plaatsvinden, zich via de menigte verplaatsen naar de perronrand, zonder dat deze effectief geabsorbeerd worden; het risicomijdende gedrag kan niet meer

worden uitgevoerd. Tevens treedt er mogelijk een domino-effect op, waarbij meerdere reizigers vallen. Als gevolg kunnen één of meerdere reizigers van het perron vallen.

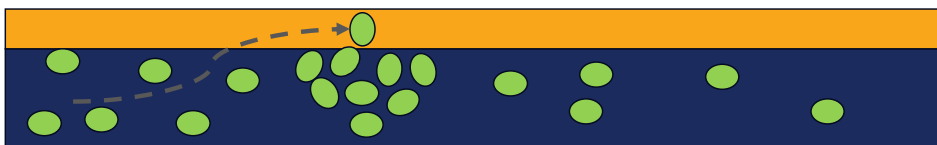
Verzwarende omstandigheden

- > **Doorgaande treinen:** De aanwezigheid van doorgaande treinen kan een aanzienlijke impact hebben op de veiligheid op het perron. De drukgolf of zuigende werking van snelle treinen (of minder snelle onregelmatig geladen goederentreinen) kan reizigers in de gevarenzone uit balans brengen. Dit treft vooral domein II en III waar reizigers dicht langs de perronrand wachten. Tevens is het effect van een val in spoorbak bij een doorgaande trein veel hoger en verwachten we meer dodelijke slachtoffers dan bij een val in de spoorbak zonder doorgaande trein.
- > **Populatie reizigers:** Verschillende groepen reizigers, zoals beschonken feestgangers, voetbalhooligans, ouderen, reizigers met een beperking, of reizigers die onbekend zijn met het gebied, verhogen het risico op perronveiligheidsincidenten. Hun gedrag kan onvoorspelbaar zijn of hun vermogen om risico's te mijden kan verminderd zijn.
- > **Ruimtegebruik reizigers:** Wanneer wachtende reizigers koffers, kinderwagens, etc meenemen zullen ze meer ruimte gebruiken. De natuurlijke wachtdichtheid wordt dan eerder bereikt. Wanneer dit structureel voorkomt die er bij de berekening van de dichtheid rekening gehouden te worden met dit extra ruimtegebruik. In bijlage 5 geven we aan hoe dit met een factor verrekend kan worden binnen de berekening.
- > **Smal perron:** Een smal perron bereikt sneller hogere lokale dichtheden, waardoor de kans toeneemt dat mensen in de gevarenzone op de trein wachten (met name relevant voor domein II). De definitie van een smal perron hangt af van de verhouding tussen het totale bruikbare wachtoppervlak en het maximaal aantal mensen dat in een halterende trein past.

3.5 Val in spoorbak - Lopend

Risicoprofiel

In domein I, gekenmerkt door zeer lage drukte op het perron, lopen reizigers slechts sporadisch door de gevarenzone. De kans op valincidenten in de spoorbak is minimaal, mede doordat reizigers normaal gesproken looproutes kiezen die niet door de gevarenzone leiden. Deze situatie vertegenwoordigt een laag risico op valincidenten voor lopende reizigers.



Figuur 5 Schematische weergave van een reiziger die door de gevarenzone loopt.

Met de toename van de drukte op het perron, bewegen we naar domein II, waar reizigers stukken door de gevarenzone lopen om drukke gedeelten te vermijden. Dit fenomeen treedt op wanneer de directe route naar de wachtplek langs de perronrand loopt. Hoewel er een verhoogd risico bestaat dat een reiziger valt, is dit risico nog steeds beperkt, omdat verstoringen zoals duwen of struikelen overwegend door de menigte of de reiziger zelf geabsorbeerd kunnen worden. Bij een incident is het niet aannemelijk dat meer dan één reiziger in de spoorbak valt.

Domein III wordt bereikt wanneer de drukte op het perron dermate toeneemt dat een verstoring leidt tot een valincident van één of meerdere reizigers in de spoorbak. Dit stadium treedt op wanneer het kantelpunt voor wachtende reizigers wordt bereikt. Bij de verhoogde lokale dichtheden die dan ontstaan kunnen verstoringen die ver van de perronrand plaatsvinden, zich via de menigte verplaatsen naar de perronrand, zonder dat deze effectief geabsorbeerd worden. Tevens treedt er mogelijk een domino-effect op, waarbij meerdere reizigers vallen. De kans op een incident is daarom in dit domein veel hoger dan binnen domein II.

Het kantelpunt voor lopende reizigers is dus identiek aan dat voor wachtende reizigers, zoals gedefinieerd in paragraaf 3.2.

Verzwarende Omstandigheden

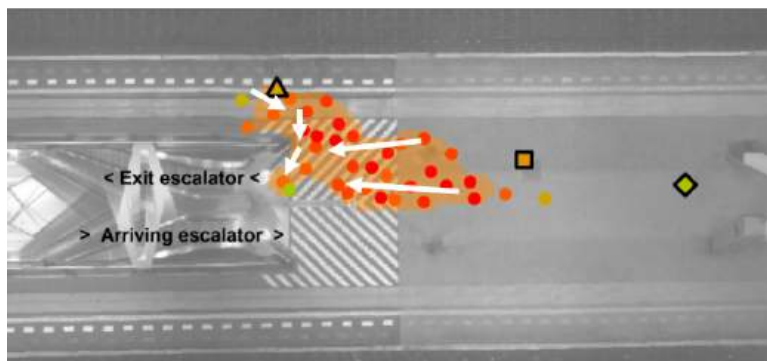
- > **Looprichting en aankomstrichting van de trein:** Een verzwarende factor is de looprichting van reizigers in relatie tot de aankomstrichting van de trein. Een aankomende trein vanuit de rug van de reiziger verhoogt het risico omdat de reiziger minder tijd heeft om te reageren en zich aan te passen aan de situatie.
- > **Doorgaande treinen:** De aanwezigheid van doorgaande treinen kan een aanzienlijke impact hebben op de veiligheid op het perron. De drukgolf of zuigende werking van snelle treinen (of minder snelle onregelmatig geladen goederentreinen) kan reizigers in de gevarenzone uit balans brengen. Dit treft vooral domein II en III waar reizigers

dicht langs de perronrand wachten. Tevens is het effect van een val in spoorbak bij een doorgaande trein veel hoger, we verwachten dan dodelijke slachtoffers.

- > **Perronbreedte:** De breedte van het perron speelt ook een belangrijke rol. Op smalle perrons is de kans groter dat reizigers door de gevarenczone lopen, vanwege de beperkte beschikbare ruimte om andere routes te kiezen. Ook hier heeft dat de meeste impact op de inherente risico's binnen domein II.
- > **Wachtrij stijgpunt:** In de volgende paragraaf beschrijven we dat een wachtrij bij het stijgpunt tot aan de gevarenczone kan reiken en dat daarbij reizigers in de gevarenczone lopen. Indien die wachtrijen optreden verhoogt dat het individuele risico in domein II van de lopende reiziger.

3.6 Val in spoorbak - Wachtrij stijgpunt

De dynamiek van wachtrijen bij stijgpunten kunnen leiden tot een valincidenten bij de spoorbak. Dit risico manifesteert zich vooral na de aankomst van een trein, wanneer tijdelijk een wachtrij kan ontstaan voor de stijgpunten die van het perron leiden.



Figuur 6 Voorbeeld van een wachtpluim bij een roltrap (bron: van den Heuvel, 2022)

Risicoprofiel

In situaties waar de wachtrij zeer kort is of niet ontstaat, spreken we van domein I. Hier kunnen andere reizigers de eventuele wachtrij gemakkelijk passeren zonder door de gevarenczone te hoeven lopen. De wachtrij zelf bevindt zich niet in de buurt van de gevarenczone, waardoor het risico op valincidenten in de spoorbak minimaal is. De stroming van het reizigersverkeer wordt nauwelijks beïnvloed door de aanwezigheid van de wachtrij. Voor dit risico is het basisrisico dus nihil.

Domein II wordt bereikt wanneer de capaciteit van de stijgpunten beperkt is en er een wachtrij ontstaat van uitstappende reizigers die eventueel doorloopt tot in/naast de gevarenczone. Wanneer de wachtrij de gevarenczone bereikt, worden andere reizigers gedwongen om via de gevarenczone te lopen om de rij te passeren. Dit betreft het risico op een val van het perron voor lopende reizigers, zoals beschreven in paragraaf 3.5. De

risico's van de lopers langs de wachtpluim scharen we onder domein II van dat perronveiligheidsrisico. Voor het risico zelf, een val in spoorbak van een wachter in de pluim, achten we het risico klein. Een opvallend kenmerk van dit specifieke risico is dat de primaire 'duw'-krachten niet richting de perronrand, maar naar het stijgpunt, in het midden, toe werken. Bovendien geldt voor een reiziger die in de gevarezone wacht om naar het stijgpunt te gaan, de risicothermostaat in werking treedt en er extra alert gehandeld wordt. Dit betekent dat het individuele risico op een val in de spoorbak voor dit risico kleiner is dan bij de andere twee risico's op het vallen in de spoorbak. Uit de incidentdata is ook niet op te maken dat bij een van de incidenten waarbij iemand in de spoorbak is gevallen, het slachtoffer in de rij bij een stijgpunt stond.

We zien geen aanvullend kantelpunt naar domein III voor dit specifieke risico. Er zijn meerdere stations, waaronder Amsterdam Centraal, waar lange wachtrijen staan en waar volle treinen van maximale lengte halteren. Op die plekken is geen ander reizigersgedrag of een andere loopstroom dynamiek geconstateerd dat plots tot een snellere groei van het risico leidt.

Verzwarende Omstandigheden

Voor dit risico hebben we geen verzwarende omstandigheden geïdentificeerd.

3.7 Val in uitloopgebied bewegend stijgpunt

Voor dit perronveiligheidsrisico zijn twee types drukte van belang. Er is een interactie tussen drukte op het perron welke invloed heeft op de uitstroomcapaciteit en de drukte op het bewegende stijgpunt zelf, welke de 'verkeersvraag' bepaalt.

Risicoprofiel

In domein I, waar de situatie als rustig wordt beschouwd, is de capaciteit van het uitloopgebied van het stijgpunt ruim voldoende om de uitstroom van reizigers te verwerken en stroom van reizigers gering. Reizigers die van het stijgpunt komen, kunnen comfortabel en zonder hinder op het perron oplopen om hun weg te vervolgen. In deze fase is het risico op valincidenten minimaal.

Naarmate de drukte in het uitloopgebied en op het stijgpunt toenemen, bereiken we domein II. Hier begint de mogelijkheid om 'uit te lopen' te verminderen door lokaal toegenomen dichtheid (groepjes wachtende reizigers). Dit leidt tot situaties waarin reizigers meer moeite moeten doen om het perron op te komen, wat het risico op struikelen en daarmee valincidenten verhoogt. Wanneer de stroom reizigers op het stijgpunt groter wordt, wordt bovendien de interactie tussen de reizigers groter, wat ook weer tot een grotere kans tot struikelen leidt. De risico's die bij dit domein horen beperken zich tot een val van één persoon, waarschijnlijk zonder ernstig letsel.

In domein III is de uitloopcapaciteit voor langere tijd lager dan de uitstroom van het stijgpunt, wat resulteert in een wachtrij die zich uitstrekt tot het afstappunt van het stijgpunt. Dit verhoogt de kans op valincidenten aanzienlijk. Een val kan leiden tot een domino-effect met opeenstapeling van mensen, waarbij ook verstikking optreedt. Echter, wordt de impact van een dergelijk incident waarschijnlijk beperkt door de aanwezigheid van stopknoppen op de stijgpunten, waardoor tot het moment dat de stopknop wordt gevonden en ingedrukt slechts een beperkt aantal mensen kan vallen en langdurige opeenstapeling wordt voorkomen.

Verzwarende omstandigheden

- **Kruisende loopstromen:** Bij op- en neergaande roltrappen kunnen kruisende loopstromen ontstaan, wat de uitstroomcapaciteit verlaagt en het risico op drukte verhoogt.
- **Type reiziger:** Reizigers met veel bagage of reizigers die niet bekend zijn met het station bewegen trager en lopen minder ver het perron op. Dit kan de capaciteit in het uitloopgebied snel verlagen en eerder leiden tot een opstopping.
- **Continue hoge uitstroom:** Een voortdurend hoge uitstroom vanaf het bewegende stijgpunt vereist dat de capaciteit van het uitstroomgebied constant groot genoeg blijft. Een hoge uitstroom maakt het systeem gevoelig voor capaciteitsverstoringen.

Kwantitatieve analyse kantelpunt

De kwantitatieve analyse focust op beide types drukte horende bij dit risico; uiteindelijk is het kantelpunt een resultante van de twee 'druktes'. Vanaf een uitstroom van ongeveer 1,6 reizigers per seconde wordt het moeilijker om probleemloos van de roltrap af te stappen¹⁰. Hierdoor neemt de kans op een val aanzienlijk toe wanneer de uitstroom zich rond dit niveau bevindt, zeker voor mensen die slecht(er) ter been zijn of grote bagage bij zich hebben. Dit zijn echter situaties die in reguliere omstandigheden voorkomen (ook als het meerdere reizigers betreft), daarom valt dit risico onder domein II.

Het kantelpunt voor dit risico manifesteert zich mogelijk wanneer het kantelpunt voor wachtende reizigers wordt bereikt. Doorlopen en spreiden van nieuwe reizigers op het perron is dan niet meer mogelijk. In dat geval ontstaan er dichtheden ruim boven 2 p/m^2 nabij de uitgang van het stijgpunt. De uitstroomcapaciteit wordt daarmee nihil. Daardoor ontstaat er kans op een domein III-incident dat alleen voor kan komen als de uitstroom heel laag is.

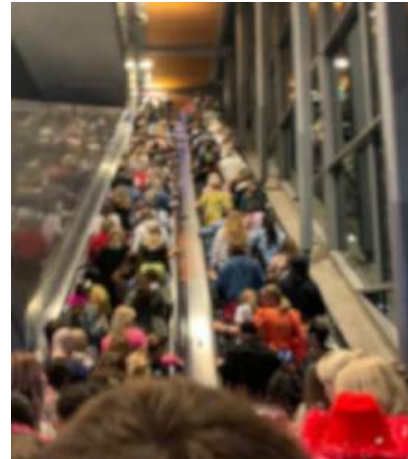
¹⁰ Zie de poster van Lee Verhoeff, PED 2023

3.8 Val op/van een stijgpunt door drukte

Risicoprofiel

Bij normale drukte bewegen reizigers zich eenvoudig en veilig op het stijgpunt. Er bestaat een basisrisico op een val, wat typisch is voor elke omgeving waar mensen bewegen. In dit stadium zijn de risico's beheersbaar en beperkt tot individuele incidenten.

Wanneer de drukte toeneemt, verschuift het risico naar domein II. De val kan nu veroorzaakt worden door drukte: er wordt bijvoorbeeld over de voet van iemand anders gevallen. Bij dit risico kan het ook voorkomen dat een paar mensen tegelijk vallen van de trap. Dit scenario wordt waarschijnlijker in situaties waar reizigers dichter op elkaar staan, en vooral op neerwaartse stijgpunten. Bij toenemende drukte neemt de kans op interactie en daarmee een val toe. Ook hier geldt dat door de risicothermostaat het individueel risico beperkt is; op een drukke trap zullen reizigers extra voorzichtig zijn om niet van de trap te vallen.



Figuur 7 Illustratie van drukke roltrappen (niet draaiend) tijdens crowd control operatie op Bijlmer Arena

In situaties van aanhoudende hoge drukte kan er een wachtrij ontstaan op het stijgpunt. Met name bij een stijgpunt in neerwaartse richting kan dit een gevaar opleveren wanneer deze wachtrij een hoge dichtheid bereikt. Als er dan een verstoring optreedt, kan dit leiden tot ernstige valincidenten met domino-effecten. Dit scenario valt binnen domein III, waar een grote opeenstapeling van mensen kan leiden tot verdrukking en verstikking, met name in situaties waarin door de drukte een snelle oplossing moeilijk te realiseren is. Het ontstaan van een dergelijke wachtrij komt pas voor wanneer het hele perron geblokkeerd is door een hoge lokale dichtheid. Dat kan pas voorkomen wanneer het kantelpunt voor wachtende reizigers is overschreden, want dan stopt het spreiden en kunnen hoge lokale dichtheden bij stijgpunten ontstaan. Het kantelpunt voor wachtende reizigers is dus ook maatgevend voor dit risico.

Verzwarende Omstandigheden

- **Specifieke Reizigersgroepen:** Bepaalde type reizigers, zoals mensen met een beperking en reizigers met grote koffers, hebben een verhoogd risico op een val van het stijgpunt. Deze groepen hebben vaak meer ruimte en tijd nodig om zich veilig te verplaatsen, wat in drukke situaties een uitdaging kan zijn.

3.9 Val tussen trein en perron bij het in- en uitstappen

In de context van het risico op vallen tussen de trein en het perron, wordt het risicoprofiel bepaald door de mate van drukte en de vorming van wachtrijen bij de treindeuren.

Risicoprofiel

In domein I heerst een rustige situatie waarbij er geen wachtrijen bij de treindeuren zijn. Reizigers kunnen gemakkelijk en zonder obstructie in- en uitstappen. De dichtheid van reizigers is laag genoeg om een veilige afstand tot de rand van het perron te behouden, waardoor het risico op valincidenten minimaal is. Het basisrisico is erg klein voor een val tussen trein en perron.

In domein II ontstaan wachtrijen bij de treindeuren als gevolg van verhoogde drukte, wat leidt tot een hogere dichtheid van reizigers rond de deuren. De interactie van deze reizigers verhoogt het risico op valincidenten, vooral wanneer reizigers proberen tegelijk de trein te betreden. Hoewel er een risico bestaat dat iemand valt (we zien de incidenten terug in de ongevalsdata, zie bijlage 2), zijn ernstige incidenten zoals het weggrijpen van de trein met een gevallen reiziger tot nu toe voorkomen door het sluitproces van de hoofdconducteur en de attentie van medereizigers.

Voor dit risico is geen domein III vastgesteld, aangezien de situatie niet escaleert naar een niveau waarbij het risico op valincidenten significant toeneemt. De aard van het risico wordt grotendeels beheerst door de aanwezigheid van de trein als fysieke barrière en de aandacht van de treinpersoneel en medereizigers, die samenwerken om de veiligheid te waarborgen.

Verzwarende Omstandigheden

- **Type trein:** Bepaalde type treinen hebben meer ruimte vrij tussen trein en perron. De kans is groter dat hier iemand tussen komt bij een val. Daarnaast zijn er ook (internationale) treinen met een hoge instap, waarbij er een verhoogde kans is dat iemand valt tijdens het instappen.

3.10 Beklemming tussen treindeuren

De kans op het optreden van dit risico heeft geen relatie tot de drukte op het perron. Hooguit kan drukte van invloed zijn op het effect van het risico, wanneer de trein vertrekt zonder dat opgemerkt is dat een reiziger beklemd is tussen de treindeuren.

3.11 Verdrukking of vertrapping door hoge dichtheid

Gegeven de open geometrie van een perron en de beperkte breedte daarvan zal de druk die nodig is voor verdrukking, zeer waarschijnlijk nooit kunnen ontstaan. Zelfs bij een hoge dichtheid zal een val daarnaast niet direct leiden tot een opeenstapeling die lang genoeg zal aanhouden om een verstikking te veroorzaken. Hier geldt dat de drukte op het perron al van dusdanige orde zou zijn dat eerder het kantelpunt voor wachtende reizigers zal optreden.

4 Implicaties voor proportioneel perronveiligheidsbeleid

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk gaan we in op de implicaties die onze bevindingen uit de voorgaande hoofdstukken hebben voor proportioneel perronveiligheidsbeleid in Nederland. Daarom staan we allereerst stil bij de uitgangspunten voor proportioneel veiligheidsbeleid in Nederland.

Zoals in hoofdstuk 2 van dit rapport omschreven liggen de risico's in domein I buiten de scope van dit onderzoek omdat er altijd sprake is van een risico dat iemand in de spoorbak valt zonder dat er een relatie hoeft te zijn met de drukte op het perron. We richten ons in dit hoofdstuk daarom op risico's in domein II en III. Merk echter wel op dat er ook mogelijk proportionele investeringen in domein I te doen zijn. Een denkrichting kan zijn, zo bepleit de Amerikaanse expert Katherine Hunter-Zaworski waarmee wij gesproken hebben op grond van haar onderzoek, om de hoogte van trapleuningen aan te passen om het risico in domein I op het vallen van de trap proportioneel te verminderen.¹¹

In dit hoofdstuk gaan we in aparte paragrafen in op wat de proportionele omvang van investeringen in de risico's in domein II en domein III zouden zijn. We sluiten het hoofdstuk af met daaruit volgende praktische implicaties voor (de omvang van investeringen in) perronveiligheidsbeleid.

4.2 Over de noodzakelijke proportionaliteit van veiligheidsbeleid

Zoals al kort genoemd in hoofdstuk 2 van deze rapportage is een uitgangspunt van Nederlands veiligheidsbeleid dat risico's objectiveerbaar zijn en dat veiligheidsbeleid gebaseerd is op een transparante kosten-batenanalyse van mogelijke maatregelen om die risico's te beheersen. Risicobeheersing gaat daarom over de afweging van welke maatregelen rekening houdend met het beschikbare budget proportioneel zijn om specifieke risico's te beheersen. Risicobeheersing betekent dus nadrukkelijk niet de uitsluiting van alle denkbare (rest)risico's.

¹¹ Hunter-Zaworski et al. (2017). Manual to improve Rail Transit Safety at Platform/Vehicle and Platform/Guideway Interfaces.

lets meer uitgewerkt: sinds het begin van deze eeuw stellen de rijksoverheid en haar adviesorganen dat het noodzakelijk is om de schijnbaar onstuitbare verschuiving van de verantwoordelijkheid voor alle risico's naar de overheid opnieuw te bezien.¹² Het realiteitsgehalte van de mogelijkheid voor de overheid om te voldoen aan de verwachting om veiligheid te garanderen en schade achteraf te kunnen vergoeden blijkt steeds lager. Zo merkte het kabinet al in 2003 in het regeringstandpunt 'Nuchter omgaan met risico's'¹³ op dat er een spanningsveld is ontstaan tussen 'gelijkheid' en 'doelmatigheid' van risicobeleid. Deze afweging gaat om de keuze tussen hoge kosten om gelijke bescherming voor eenieder te realiseren, of openlijk hiervan afwijken en te accepteren dat sommige risico's 'te duur' zijn om te beheersen.

Daarom wordt de eigen verantwoordelijkheid van burgers en maatschappelijke organisaties sindsdien telkens weer benadrukt in het regeringsbeleid. Ook wordt continu gepleit voor een proportionele(re) omgang met risico's. Er moet worden gezocht naar een optimale besteding van de beschikbare (schaarse) overheidsmiddelen. Investerings die gedaan worden om een risico weg te nemen of in te perken moeten dus in verhouding staan tot de grootte van het risico. Kortom, ter voorkoming van een groot risico (met een grote kans en een groot effect) mag meer worden geïnvesteerd dan ter voorkoming van een klein risico (met een kleine kans en een klein effect).

Een maatschappelijke kosten-batenanalyse helpt bij een dergelijke afweging, door maatschappelijke kosten en baten tegen elkaar af te zetten. Maatregelen waarvan de implementatie- of interventiekosten groter zijn dan het te behalen effect zijn disproportioneel. Maatregelen die een positievere kosten-batenverhouding hebben worden gewaardeerd boven maatregelen met een minder positieve kosten-batenverhouding. In dergelijke maatschappelijke kosten-batenanalyses kunnen ook (kwantificeerbare) neveneffecten meegenomen worden. Neveneffecten in relatie tot perronveiligheidsincidenten zijn: mentale gevolgen voor getuigen van een incident, economische gevolgen door het niet kunnen uitvoeren van de dienstregeling, discomfort (dan wel gevoel van onveiligheid) van reizigers bij grote drukte en mogelijke maatschappelijke gevolgen door verslechterd veiligheidsimago van het spoorvervoer. In dit onderzoek richten wij ons vanwege beperkte data 'slechts' en conform rijksbeleid¹⁴ op het menselijke aspect van de kosten-batenanalyse (in de vorm van verloren en gewonnen gezonde levensjaren). Het in kaart brengen van ook de maatschappelijke kosten en baten vanuit een breder perspectief vergt een ander type studie.

¹² WRR (1997). Volksgezondheidszorg. Den Haag: Sdu Uitgevers, p. 8. RVZ (2006). Zinnige en duurzame zorg. Den Haag: RVS. Ministerie van BZK (2015). Bestuurlijk balanceren met risico's en verantwoordelijkheden. Kamerbrief met kenmerk 2015-0000650903.

¹³ RIVM (2003). Nuchter omgaan met risico's. RIVM rapport 251701047/2003.

¹⁴ Sinds de nota "Omgaan met risico's" (1989) wordt alleen naar sterfte gekeken.

Rekenen aan kosteneffectief beleid

In Nederland hebben de Wetenschappelijke Raad voor het Regeringsbeleid (WRR) en de toenmalige Raad voor Volksgezondheid en Zorg (RVZ) de berekeningsbouwstenen voor een 'gestandaardiseerde kosten-effectiviteitsafweging' geïntroduceerd. Zij hebben daarvoor aansluiting gezocht bij een (door de Wereldbank ontwikkelde) geformaliseerde ziekte overstijgende maat voor gezondheidswinst: de 'Disability Adjusted Life Years' (DALY's). Een DALY staat dus voor een gezond levensjaar waarbij gecorrigeerd is voor ziektes en gebreken.

De te volgen aanpak is volgens hen als volgt:

- > Voor de bepaling welke risico-interventie uit collectieve middelen moet worden betaald zijn de volgende drie criteria relevant: noodzakelijkheid zorgbehoefte, effectiviteit en kosten en rechtvaardigheid.
- > Richtlijnen voor te gebruiken onderzoeksmethoden dienen te worden vastgesteld en gehanteerd, zodat de uitkomsten van onderzoek onderling vergelijkbaar zijn. Onder meer dient duidelijkheid te worden verschaft over de robuustheid van (de resultaten van) het onderzoek.
- > Het principebesluit om een interventie al dan niet uit collectieve middelen te vergoeden, dat volgt uit de assessmentfase, dient gebaseerd te worden op een drempel voor de ziektelast en een plafond voor de kosten van een interventie per DALY per jaar.

4.3 Proportionele investeringen voor domein II

In domein II en dus onder het kantelpunt is in proportionele zin een bedrag 'beschikbaar' voor de verbetering van perronveiligheid. Risico's die in dat opzicht aandacht behoeven zijn dan valrisico's op en rondom stijgpunten en val van perron die aan drukte te wijten zijn.

Als uitgangspunt voor die investeringen hanteren we de eigen opgave van NS Stations/ProRail, zie tabel 2, en ook bijlage 2. Deze database van alle gemelde omgevallen op stations bestrijkt de periode 2008 – september 2023 (dus 15 jaar ongeveer) en is gevuld door de opgave van medewerkers zelf. Bij de beschrijving is een aantal keren als oorzaak 'drukke' aangegeven. Medewerkers zijn niet opgeleid om drukte als oorzaak te herkennen maar we gaan uit van hun intuïtieve herkenning. Merk overigens op dat geen van onze internationale gesprekspartners een dergelijke database beschikbaar heeft.

Tabel 2 Overzicht transferongevallen perrons.

Type incident	Totaal	Drukte	%
Primair ongeval - Overig - Transferongeval - Val op traverse	25	1	4,0%
Primair ongeval - Overig - Transferongeval - Val van perron	125	5	4,0%
Primair ongeval - Overig - Transferongeval - Val tussen trein en perron	526	6	1,1%
Primair ongeval - Overig - Transferongeval - Door werkzaamheden	101	1	1,0%
Primair ongeval - Overig - Transferongeval - Val bij in-uitstappen trein	653	5	0,8%
Primair ongeval - Overig - Transferongeval - Val op perron	1683	11	0,7%
Primair ongeval - Overig - Transferongeval - Val van trap	1552	7	0,5%
Primair ongeval - Overig - Transferongeval - Val van roltrap	2070	7	0,3%
Primair ongeval - Overig - Transferongeval - Verwonding aan object	316	1	0,3%
Primair ongeval - Overig - Transferongeval - Val in hal	796	2	0,3%
Primair ongeval - Overig - Transferongeval	543	1	0,2%
Primair ongeval - Overig - Transferongeval - Door persoonlijke toestand	631	1	0,2%
Primair ongeval - Overig - Transferongeval - Val in tunnel	103	0	0,0%
Primair ongeval - Overig - Transferongeval - Vertrekprocedure/klem	389	0	0,0%
Totaal	9513	48	0,5%

In deze fase zal het kantelpunt niet worden bereikt, maar gebeuren ongelukken als gevolg van lokale drukte (waar dus lokaal de 2 p/m² wordt overschreden) bij een stijgpunt of treindeuren. Vanwege het lokale karakter leidt dit niet tot het domein III risico dat één of meerdere mensen (zie ook paragraaf 4.4) op het spoor terecht komen. En we bespraken al eerder (in hoofdstuk 2) dat specifiek voor het risico van de val het perron in de spoorbak de wereldwijde afwezigheid van (dodelijke) ongevallen suggereert dat mensen risico-compenserend gedrag vertonen op de momenten dat er een trein aankomt: mensen vallen wel van het perron, in enkele gevallen zelfs door drukte, maar niet voor een aankomende trein.

Merk op dat voor het risico dat er structureel ongevallen plaatsvinden als gevolg van drukte rondom stijgpunten geen harde data beschikbaar is. Dit ondanks de zorgen hierover bij de experts van ProRail en NS Stations. Mogelijk dat de maatregelen die door hen genomen zijn op bijvoorbeeld een 'voor dit risico gevoelig' perron op Utrecht Centraal het risico hebben gemitigeerd voordat het echt structureel kon worden.

Onze internationale interviews geven een soortgelijk beeld: er bestaan veel zorgen over incidenten in zowel domein II als domein III. De maatregelen die genomen worden variëren maar geen van de experts die we gesproken hebben heeft data beschikbaar die het risico onderbouwt. In Zwitserland bijvoorbeeld bestaat een lange termijn programma om de capaciteit van stations te vergroten waar in het ontwerp nadrukkelijk aandacht is voor dit type risico's maar daar wordt aan de andere kant op dit moment op enkele

stations het huidige risico zonder extra maatregelen geaccepteerd (en zonder een opvallend aantal ongevallen).¹⁵

De database laat 48 ongevallen in 15 jaar vanwege drukte zien, dat zijn er dus ongeveer 3 per jaar. Het letsel van de slachtoffers varieert van onbekend via geschrokken tot naar het ziekenhuis. In de database zijn geen registraties van dodelijke ongevallen opgenomen.

Om tot een proportionele bovengrens aan aanvullende investeringen voor beheersing van de risico's in domein II te komen gaan we (dus) uit van de volgende aannames:

- > We gaan uit van ziekenhuisopname van alle slachtoffers
- > Volgens regulier gebruik bij verkeersveiligheid gaan we ervan uit dat elke ziekenhuisopname gemiddeld één verloren gezond levensjaar (DALY) betekent
- > We gaan uit van een maximale proportionele investering van € 75.000,- per gezond levensjaar (DALY).

Dan is de maximale proportionele jaarlijkse investering als alle 3 drukte-ongevallen per jaar daarmee zouden kunnen worden voorkomen in totaal dus ongeveer € 225.000,- per jaar. Met deze maatregelen dienen alle ongevallen op alle perrons voorkomen te worden. Bij maatregelen met een permanente aard (zoals infra aanpassingen) kan de investering worden afgeschreven gedurende de 'levensduur' van de maatregel.

Let wel: dit is dus **bovenop het huidige veiligheidsbeleid** en **bij gelijkblijvend risico** dus gelijkblijvende passagiersaantallen.

Maatregelen voor de domein II risico's moeten dus smart zijn: denk bijvoorbeeld aan maatregelen die ook internationaal genomen zijn of overwogen worden: sturende belijning bij stijgpunten, weghalen perronmeubilair, het organiseren van 'live' terugkoppeling door zicht te hebben op het perron in combinatie met een inschatting van het aantal mensen dat meegenomen kan worden in de volgende trein, een voldoende hoge frequentie van treinen (reizigersspreiding) en voorkomen dat mensen de angst hebben dat ze de laatste trein niet halen.

¹⁵ Gesprek Ernst Bosina, 10 november 2023.

4.4 Proportionele investeringen voor domein III

We hebben geen statistische data voor het risico boven de kantelpunten.

Internationaal wordt het getal van 2 p/m² door de meeste respondenten herkend als een waarde die (met name lokaal) kan voorkomen maar ook dat deze in de praktijk zelden gehaald wordt. Bij verstoringen die ook internationaal regelmatig plaatsvinden, lijkt het forensenpubliek zich aan het risico aan te passen door perrons boven een bepaalde bezettingsgraad (onder de 2 p/m²) niet langer op te gaan.

Onze internationale respondenten stellen, zonder harde data, dat bij evenementen met een 'ongetraind en ongedisciplineerd' publiek de 2 p/m² mogelijk wel gehaald zou worden zonder maatregelen. In Zwitserland werd gesteld dat er bij evenementen zoals voetbalwedstrijden geen crowd control gericht op de beheersing van het perronveiligheidsrisico plaatsvindt.

Hierna maken we een afschatting van wat een redelijke bovengrens is voor investeringen om incidenten in domein III te voorkomen. Voor het afschatten van deze bovengrens richten we ons op het risico met het op basis van de analyse in hoofdstuk 3 grootste te verwachten effect; het risico op een val in de spoorbak. We nemen daarvoor een **worstcase-scenario** als basis:

- > Bij overschrijden kantelpunt zullen er 5 personen van het perron op het spoor geduwd worden. Ons simulatiemodel liet zien dat dit een redelijke aanname is omdat de effecten van een duw zich verspreiden door de menigte.
- > Personen die door een onverwachtse duw in de spoorbak belanden zullen daardoor zwaar letsel oplopen.
- > Zwaar letsel leidt tot chronisch gezondheidsverlies dat gelijk staan aan een gemiddeld verlies van 10 DALY's.
- > Bij doorgaande treinen (aannee in 10% van de situaties) gaan we uit dat een derde van de reizigers door de trein getroffen wordt en overlijdt.
- > Een dodelijk slachtoffer staat gelijk aan een gemiddeld verlies van 40 DALY's.

Een worstcasescenario staat daarmee gelijk aan een incident waarbij 5 personen van het perron op het spoor geduwd worden. Dat is een verlies van $0,9 * 5 * 10 + 0,1 * 1/3 * 5 * 40 + 0,1 * 2/3 * 5 * 10 = 55$ DALY's

Een cruciale aanname is vervolgens dat bij elke situatie boven het kantelpunt het risico zich ook echt manifesteert. In dat geval zou dus elke situatie boven het kantelpunt een totale investering van $55 * € 75.000,- = € 4,1$ miljoen rechtvaardigen in het voorkomen ervan. Dit zou, onder deze aannames, betekenen dat de huidige evenementenvoorbereiding proportioneel is.¹⁶ In het theoretische geval dat voorkomen wordt dat eenmaal per jaar het kantelpunt optreedt, is voor de komende 10 jaar (bij

¹⁶ De kosten voor een crowd control operatie bij Bijlmer Arena zijn ongeveer €30k.

gelijkblijvend aantal verloren DALY's) proportioneel gezien een bedrag van $10 * € 4,1$ miljoen beschikbaar.

De tweede aanname over de dodelijke slachtoffers die optreden bij (alleen) doorgaand verkeer betekent overigens dat er $5 * € 75.000,- = € 375.000$ proportioneel zou zijn voor het niet laten doorrijden van treinen langs evenementenperrons per evenement. Daarmee zouden dus 'alle' doden worden voorkomen (dus 10 DALY's) terwijl het aantal gewonden dan met 1 (en dus 5 DALY's) toeneemt.

Merk nogmaals op dat bij het kantelpunt de dichtheid van meer dan 2 p/m² gehaald wordt op het hele voor reizigers bruikbare perron.

Afsluitend op dit punt merken we op dat hoewel een val op/van (of in het uitloopegebied van) stijgpunten weliswaar kan leiden tot een domino-effect, de impact van een dergelijk incident waarschijnlijk wordt beperkt door de aanwezigheid van stopknoppen op de stijgpunten. Daardoor zullen slechts een beperkt aantal mensen kunnen vallen en wordt langdurige opeenstapeling van mensen (en dus 'abnormaal' letsel) voorkomen. Verder geldt dat het ontstaan van een dergelijke wachtrij pas voor komt wanneer het hele perron geblokkeerd is door een hoge lokale dichtheid en dus het kantelpunt voor het risico op een val in de spoorbak is overschreden.

4.5 Implicaties voor proportioneel perronveiligheidsbeleid

Op voorhand moet duidelijk zijn dat het gebrek aan harde data in Nederland en daarbuiten een 'reguliere' kosten-batenanalyse van beleidsopties onmogelijk maakt. Daarom geeft de onderstaande beschouwing hoogstens een richting voor de gedachtenvorming over proportioneel beleid.

Het voorgaande laat tenminste zien dat op basis van de uitkomsten en aannames van dit onderzoek in proportionele zin een bedrag van (bij een gelijkblijvend aantal verloren DALY's) in totaal (dus voor alle stations) € 225.000,- per jaar beschikbaar is voor verdere beheersing van het risico in domein II, bovenop het huidige beleid en uitgaande van het huidige risicobeeld. Zoals altijd is het alsnog plaats kunnen vinden van incidenten daarbij niet uitgesloten. Daarnaast geldt wederom dat maatregelen voor de komende 10 jaar proportioneel gezien een bedrag van $10 * € 225.000,-$ rechtvaardigen. Merk op dat dit bedrag in proportionele zin beschikbaar is voor de beheersing van de risico's in domein II en dat er altijd redenen denkbaar zijn (comfort, beleving, toegankelijkheid, etc.) om andere investeringen in perrons te doen.

Heel praktisch is hier alleen voor het jaarlijkse ongeval vanwege drukte op de stijgpunten als maatregel bijvoorbeeld extra begeleiding denkbaar om het vrijmaken van het uitloopegebied bij de stijgpunten te bevorderen, zoals nu al op enkele drukke bekende perrons gebeurt. Overigens zou het kunnen dat deze tamelijk recent genomen maatregel al succesvol is, dit kan immers nog niet uit de data blijken.

Om het risico op het optreden van een kantelpunt te voorkomen zou onder onze worstcase-aannames gelden dat € 4,1 miljoen beschikbaar is voor elke situatie waarin het kantelpunt wordt overschreden. De data en de internationale experts die wij hebben gesproken suggereren dat die dichtheid van meer dan 2 p/m² niet snel behaald zal worden in reguliere situaties.

Maatregelen die als altijd maatwerk vereisen maar passen bij domein III, voorbij het kantelpunt, zouden bijvoorbeeld (en zijn deels al gebruikelijk) kunnen zijn:

- > Geen doorgaande treinen bij te vol perron.
- > Aanpassen dienstregeling.
- > Instroom beperken (bijvoorbeeld met crowd control) zodra de 2 p/m² bereikt dreigt te worden.
- > Uitbreiden vervoercapaciteit.
- > Infrastructurele maatregelen

Dat betekent dat crowd management maatregelen die momenteel rondom evenementen worden gehouden proportioneel lijken te zijn. Theoretisch zou het helpen om bij drukte richting de natuurlijke wachtdichtheid de gevarenzone vrij te houden om het absorptievermogen op het perron te vergroten, maar in de praktijk zal dit juist bij hogere dichtheden niet uitvoerbaar zijn.

Merk op dat deze berekeningen aangeven dat *vanwege* het *huidige* risico het niet proportioneel is om infrastructuur aan te passen vanwege de hoge kosten die daarmee gemoeid zijn. Wanneer echter toch de infrastructuur gewijzigd wordt dan kan met veel minder geld een veiliger situatie worden verkregen. Vergelijk het Bouwbesluit dat voor nieuwbouw strengere veiligheidsnormen kent dan voor bestaande bouw. Proportioneel veiligheidsbeleid voor het drukte-*risico* betekent dan ook vooral vooruit kijken en gebruik maken van geplande infrastructuur wijzigingen.

Maatwerk naar oplossingen

Voor de huidige situatie geldt voor het risico in domein III dat monitoring van risicosituaties (zoals verstoringen en evenementen) een uitkomst kan bieden. Als aannemelijk wordt dat het kantelpunt bereikt gaat worden, is van belang om snel maatregelen te nemen zoals het afsluiten van het perron.

Als op basis van de toekomstige dienstregeling (bijvoorbeeld 10 jaar vooruit) voor *toekomstige* reguliere situaties wordt voorspeld dat het kantelpunt structureel overschreden zal worden, is nader onderzoek nodig naar de implicaties voor die specifieke locatie daarvan. Op basis van dat onderzoek kunnen dan proportionele (bijvoorbeeld infrastructurale) maatregelen genomen worden. Natuurlijk moet dan rekening worden gehouden met de tijd die nodig is voor de implementatie van infrastructurale (en/of andere maatwerk-)maatregelen.

4.6 Relatie met bestaande normen

We plaatsen het kantelpunt en dit handelingsperspectief ook in het daglicht van de bestaande (en immer in ontwikkeling zijnde) veiligheidsnormeringen. We hebben de belangrijkste verschillen en aandachtspunten op een rij gezet, in bijlage 6 van dit rapport gaan we hier dieper op in. De belangrijkste bevinding is dat ontwerpnorm, zelfredzaamheidsnorm en afkeurnorm onder het kantelpunt liggen.

De zelfredzaamheid van reizigers en de daarmee samenhangende dichtheidsnormen worden gebruikt om de veiligheid bij perrondrukke te beoordelen. Zelfredzaamheid komt binnen de normeringen in het geding wanneer reizigers onvrijwillig in de gevarenzone moeten verblijven. Onvrijwillig gebruik van de gevarenzone valt onder het domein II risico en leidt dus niet noodzakelijkerwijs tot overschrijding van het kantelpunt. De dichtheids grenswaarden voor zelfredzaamheid zijn daarom lager dan die van het kantelpunt.

De verdeling van reizigers over het perron binnen de normering hangt samen met de indeling in primaire, secundaire en tertiaire zones, wat de effectieve perronoppervlakte beïnvloedt. Richting het bereiken van het kantelpunt wordt een gelijkmatige spreiding van reizigers binnen deze zones bewerkstelligd, wat verschilt van de aanname in de normdocumenten van ProRail.

De risico's die verbonden zijn aan de uitloopgebieden van roltrappen worden erkend, waarbij een dichtheid groter dan 1,11 p/m² als onveilig wordt beschouwd door ProRail. Wij zien dit echter niet als een apart kantelpunt, maar als een risicofactor binnen het domein II van perronveiligheid.

5 Samenvatting en conclusies

5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk formuleren we op basis van de voorgaande hoofdstukken een conclusie voor (toekomstig) perronveiligheidsbeleid in Nederland. Daarbij staan we onder meer stil bij onze onderzoeksaanpak, de geïdentificeerde risico's en risicoprofielen, de (gevolgen van) kantelpunten en de implicaties daarvan voor de proportionaliteit van perronveiligheidsmaatregelen.

5.2 Onderzoeksaanpak

De volgende vier onderzoeksvragen hebben de basis gevormd voor ons onderzoek:

- 1) Wat zijn de perronveiligheidsrisico's die tot incidenten kunnen leiden?
- 2) Wat zijn de kantelpunten als gevolg waarvan een individueel perronveiligheidsrisico plotseling sterk kan toenemen?
- 3) Hoe verhouden deze kantelpunten zich tot geldende normeringen en ontwerpvoorschriften?
- 4) Wat zijn mogelijke handelingsperspectieven op basis van de verkregen inzichten?

Om de hierboven genoemde onderzoeksvragen te beantwoorden, hebben we ons onderzoek als volgt aangepakt. We hebben (kort gezegd):

- > Op basis van literatuuronderzoek en werksessies met experts van het ministerie van IenW, NS Stations en ProRail acht perronveiligheidsrisico's geïdentificeerd.
- > De geïdentificeerde risico's kwalitatief geanalyseerd door de verkeerskundige processen in kaart te brengen en het (risicomijdende) gedrag te beschrijven.
- > De voorwaarden onderzocht waarbij door drukte een 'normale' situatie (dus een 'lineaire' toename van een risico door drukte) een kantelpunt bereikt en er plotseling sprake is van een 'exponentieel' oplopende kans op perronveiligheidsincidenten.
- > Wetenschappelijke literatuur en perronveiligheidsdata gebruikt om kwantitatieve analyses uit te voeren van de omstandigheden die randvoorwaardelijk zijn voor het optreden van kantelpunten.
- > Een simulatiemodel ontwikkeld om specifiek voor perrons het risico op het vallen in de spoorbak door drukte te modelleren en daar op een andere wijze het kantelpunt uit te halen.
- > Gesprekken gevoerd met internationale experts op het gebied van perronveiligheid om beter inzicht te krijgen in de internationale aanpak van perronveiligheidsrisico's.
- > Beschreven hoe proportioneel perronveiligheidsbeleid vormgegeven kan worden, waaruit een handelingsperspectief volgt.

5.3 Geïdentificeerde risico's en bijbehorende risicoprofielen

Voor de acht door ons geïdentificeerde perronveiligheidsrisico's hebben we drie risicodomeinen voor perronveiligheidsincidenten beschreven; de belangrijkste risico's op basis van onze kwantitatieve en kwalitatieve analyse zijn valincidenten op en nabij stijgpunten (trappen en roltrappen), en een val in de spoorbak. We hanteren op basis daarvan de hypothese dat er drie domeinen zijn waarin deze risico's zich in meer en mindere mate kunnen voordoen.

Kort gezegd bevat domein I de risico's die in een rustige situatie voorkomen waarbij drukte geen rol speelt; hier is alleen sprake van een individueel basisrisico. In domein II kan drukte een oorzaak zijn van het risico en neemt het individueel risico 'lineair' toe met de drukte. In domein III nemen risico's, na het overschrijden van het kantelpunt, 'exponentieel' toe als gevolg van de toename van drukte. In de domeinen II en III spelen de interactie tussen reizigers, human factors en verkeerskundige processen een rol. Het kantelpunt markeert de overgang van domein II naar domein III en is het punt waarop de een plotselinge verandering in gedrag en verkeerskundige processen leidt tot een sterk toenemend risico op een perronveiligheidsincident.

De incidenten die horen bij de verschillende domeinen verschillen voor de types risico's. Kenmerkend is dat de mogelijke incidenten in domein II doorgaans een enkele reiziger betreft, terwijl de incidenten in domein III ook meerdere reizigers kan treffen. Bovendien is de kans dat zo'n incident optreedt in domein III aanzienlijk groter dan in domein II.

De verschillen tussen domein II en domein III heeft een belangrijke relatie met reizigers gedrag en human factors. In domein II kunnen reizigers risicomijdend gedrag uitvoeren, die voortkomt uit de zogenaamde *risicothmostaat* van de reizigers. In domein III is het zo druk dat er geen ruimte meer is om dit gedrag uit te voeren, en daarom worden domino-effecten bijvoorbeeld mogelijk.

5.4 Kantelpunten van risico's en hun gevolgen

Voor alle meest relevante risico's, die dus betrekking hebben op een val op of nabij een stijgpunt of een val in de spoorbak, hebben we één kantelpunt geïdentificeerd. Het gaat daarbij om de natuurlijke wachtdichtheid: een globale maat voor het aantal reizigers op het perron waarbij reizigers nog steeds spreiden.

Het door ons geïdentificeerde kantelpunt wordt bereikt als gevolg van een combinatie van een steeds hoger wordende dichtheid waardoor verstoringen niet meer geabsorbeerd worden. Boven de globale natuurlijke wachtdichtheid (dus op het hele bruikbare perronoppervlak), die we op 2 p/m^2 inschatten binnen de bandbreedte van $1,75$ tot $2,25 \text{ p/m}^2$ neemt het risico op incidenten 'exponentieel' toe, want voorbij die grens verwachten we dat er snel lokale dichtheden optreden tot boven de 3 tot $4,5 \text{ p/m}^2$. Boven die hoge lokale dichtheden zijn reizigers niet meer in staat om risicomijdend gedrag te vertonen waardoor een val van één of meerdere reizigers bijna onoverkomelijk wordt. Omdat het risico 'exponentieel' toeneemt, moeten situaties boven de globale natuurlijke wachtdichtheid voorkomen worden. Het kantelpunt op een perron

is daarmee het maximale aantal reizigers waarmee een globale dichtheid van 2 p/m² bereikt wordt. Belangrijke noot hierbij is dat we bij lagere globale dichtheden, geen extreem hoge lokale dichtheden (> 3) op het perron observeren. Merk op dat we de natuurlijke wachtdichtheid niet met zekerheid hebben kunnen vaststellen vanwege de beschikbare data, maar dat we op basis van onze analyse verwachten dat deze binnen de bandbreedte 1,75 – 2,25 p/m² ligt.

Belangrijk om te noemen is dat we in de huidige praktijk geen situaties hebben geobserveerd met een dichtheid op of boven dit kantelpunt. De registraties van ongevallen geven ook geen indicatie dat het kantelpunt momenteel wordt overschreden. Daarnaast moet opgemerkt worden dat de incidentendatabase van ProRail onvoldoende datapunten bevat om een significante uitspraak te doen over de relatie tussen drukte en het individueel risico. Vanwege dit gebrek aan empirische data kunnen we het perronveiligheidsrisico boven het kantelpunt niet kwantificeren.

Incidenten voorbij het kantelpunt horende bij het risico van een val in de spoorbak kenmerken zich door de mogelijkheid dat meerdere reizigers daar struikelen en dat dit een grote valpartij teweegbrengt. Op basis een simulatiestudie zijn de mogelijke effecten hiervan geïllustreerd. Bij lokaal hoge dichtheden is de kans dat een reiziger geen corrigerende stap kan zetten steeds hoger; bij dichtheden boven de 4,5 p/m² laten modelsimulaties zien dat deze mogelijkheid er überhaupt niet is.

Een incident voorbij het kantelpunt van een val op/van (of in het uitloopegebied van) stijgpunten kan leiden tot een domino-effect, met mogelijke valpartij van meerdere reizigers. Hier geldt dat de impact van een dergelijk incident waarschijnlijk wordt beperkt door de aanwezigheid van stopknoppen op de stijgpunten. Er is daarnaast ook geen harde data beschikbaar dat bij drukte rondom het stijgpunt structureel ernstige ongevallen plaatsvinden.

Hoewel risico's 'exponentieel' toe zullen nemen wanneer de globale natuurlijke wachtdichtheid van 1,75 tot 2,25 personen per vierkante meter (p/m²) wordt overschreden, hebben we de exacte mechanismen en de precieze momenten waarop kantelpunten zich manifesteren niet kunnen vaststellen. Enerzijds komt dat dus door een gebrek aan experimentele data, anderzijds is de precieze bijdrage van factoren zoals halteerposities van treinen, treinlengtes, positie van stijgpunten en obstakels op het perron voor een deel onduidelijk. Ook hebben we niet precies kunnen vaststellen hoe groot de kans is op incidenten in domein III, omdat we deze situaties zich in de praktijk tot op heden niet op die wijze hebben geobserveerd. Wel wordt het getal van 2 p/m² herkend door de meeste van onze internationale respondenten als een waarde die (met name lokaal) kan voorkomen maar ook dat deze in de praktijk zelden gehaald wordt. Bij verstoringen die ook internationaal regelmatig plaatsvinden, lijkt het forensenpubliek zich aan het risico aan te passen door perrons boven een bepaalde bezettingsgraad niet langer op te gaan.

5.5 Implicaties voor de proportionaliteit van perronveiligheidsmaatregelen

Het EU-spoorbeleid is dat de lidstaten hun nationaal beleid zo inrichten dat een constante verbetering van de spoorveiligheid wordt nagestreefd volgens het ALARP-principe (*as low as reasonably practicable*). Dit betekent dat de investeringen in verbetering in verhouding moeten staan tot de bereikte verhoging van de veiligheid. In dit rapport hebben we hiervoor de in het Nederlandse veiligheidsbeleid breed gebruikte investeringsnorm van € 75.000 per DALY gebruikt. Dit vereist transparante kosten-batenanalyses. Het beleid moet daarbij rekening houden met de eigen verantwoordelijkheid van de samenleving en streven naar een optimale besteding van overheidsmiddelen waarbij kosten en baten met elkaar in evenwicht zijn. Merk op dat het gebrek aan harde data een 'reguliere' kosten-batenanalyse van beleidsopties onmogelijk maakt. Onderstaande geeft hoogstens een richting voor de gedachtenvorming over proportioneel beleid.

Voor domein II is (bij een gelijkblijvend aantal verloren DALY's) op basis van onze berekeningen en daarin gehanteerde aannames in proportionele zin €225.000 per jaar een redelijke bovengrens voor extra investeringen. Voor domein III is, onder worstcase-aannames, tot €4,1 miljoen per situatie waarin het kantelpunt wordt overschreden een proportionele investering.

Merk dus op dat er in proportionele zin relatief vrij weinig geld beschikbaar is voor de beheersing van perronveiligheidsrisico's die plaatsvinden voordat het kantelpunt wordt bereikt. Maatregelen die als altijd maatwerk vereisen maar passen bij domein III, voorbij het kantelpunt, zouden bijvoorbeeld (en zijn deels al gebruikelijk) kunnen zijn:

- > Geen doorgaande treinen bij te vol perron.
- > Aanpassen dienstregeling.
- > Instroom beperken (bijvoorbeeld met crowd control) zodra de natuurlijke wachtdichtheid bereikt dreigt te worden.
- > Uitbreiden vervoercapaciteit.
- > Infrastructurele maatregelen

Als op basis van de toekomstige dienstregeling (bijvoorbeeld 10 jaar vooruit) voor *toekomstige* reguliere situaties wordt voorspeld dat het kantelpunt structureel overschreden zal worden, is nader onderzoek nodig naar de specifieke situatie op het perron en de implicaties daarvan. De 2 p/m² kan dan als eerste indicator worden gebruikt, en daarna is maatwerk onderzoek nodig. Op basis van dat onderzoek kunnen dan proportionele (bijvoorbeeld infrastructurale) maatregelen genomen worden.. Natuurlijk moet dan rekening worden gehouden met de tijd die nodig is voor de implementatie van infrastructurale (en/of andere maatwerk-)maatregelen.

5.6 Slotsom

Met deze studie bieden we een opzet van een risicoprofiel op basis van domeinen dat een onderverdeling maakt van de omstandigheden waarbij perronveiligheidsincidenten optreden en waar het kantelpunt ligt. Dit biedt de mogelijkheid om op een gestructureerde manier het veiligheidsbeleid te benaderen. Daarbij identificeren het kantelpunt voor wachtters, dat optreedt bij het overschrijden van de natuurlijke dichtheid, waarboven een ander handelingsperspectief geldt door toegenomen risico's..

Evident is daarom ook dat op proportionele wijze voorkomen moet worden dat deze kantelpunten in de praktijk behaald worden. Heel concreet is het van belang om bij een vermoeden van het optreden van kantelpunten gedetailleerd onderzoek te doen naar bijvoorbeeld de omvang van de massa en het spreidinggedrag van individuen, om op basis daarvan gericht maatregelen te nemen per situatie.

Bijlage 1: Literatuurstudie naar risico's op het perron

Deze bijlage bevat inzichten over risico's op perrons op basis van wetenschappelijke literatuur. Eerst kijken we welke risico's er geïdentificeerd worden (kwalitatief). Vervolgens kijken we welke incidenten er echt met regelmaat voorkomen (kwantitatief). In het derde deel kijken we naar oorzaken die worden genoemd voor incidenten op het perron: drukte is er een van maar dit hoeft niet de belangrijkste factor te zijn. Tot slot kijken we naar de mogelijkheid om tot 'kantelpunten' te komen.

1. Welke risico's kunnen er worden geïdentificeerd?

Op hoofdlijnen hebben wij een zestal risico's geïdentificeerd:

1.1 Het vallen in de bak

Het vallen in de spoorbak is een vee genoemd risico in de literatuur, daar gaat het dan om mensen die zich bewust in de spoorbak werpen als mensen die er onbewust in vallen (van den Heuvel, 2022; Cynk e.a., 2014). In dit onderzoek gaat het evident om het 'onbewust' vallen in de spoorbak en nadrukkelijk niet om incidenten die ontstaan door (een poging tot) zelfmoord of het bewust overtreden van de regels door op het spoor te lopen.

Op twee manieren kan er een incident ontstaan (van den Heuvel, 2022; Santoso e.a., 2013):

- Een persoon kan op het spoor vallen zonder dat, of (vlak) voordat, een trein arriveert.
- Een persoon kan tussen het perron en de trein vallen op het moment dat de trein aan het arriveren is of er al staat (dit kan ook ontstaan bij in- en uitstappen, zie paragraaf 1.2).

Deze nuance is van belang omdat vallen op zichzelf ook een risico is (Kyriakidis e.a., 2012): *However, the distinction between a precursor and a top event is less clear: If a person standing on a platform falls onto the track, he or she may be injured or killed by a train. Similarly, a trip or fall can be potentially fatal.*

x

1.2 Incidenten tijdens in- of uitstappen

Vaak wordt in- en uitstappen als een aparte categorie van relatief veel voorkomende incidenten gezien (RSSB, 2006; Cynk e.a., 2014; Leitner, 2017). Tevens kunnen reizigers bij het in- of uitstappen tussen het perron en de trein vallen (Leitner, 2017; Hunter-Zaworksi, 2017).

Een ander risico bij het in- of uitstappen dat kan ontstaan door drukte is het vast komen te zitten tussen de treindeuren (RSSB, 2005; 2006; Traub e.a., 2013; Cynk e.a., 2014). Dit zal logischerwijs eerder te maken hebben met drukte in de trein dan met drukte op het perron.

1.3 Vallen of struikelen op of om het perron

De 'Rail Safety and Standards Board' (RSSB) heeft risico's op het perron door drukte geïdentificeerd en deze voorgelegd aan diverse stakeholders (RSSB, 2005). De stakeholders zagen het risico op vallen, struikelen en uitglijden als de relatief grootste risico's. Daarbij maken zij onderscheid tussen vallen op het perron (on level) en vallen van trappen en roltrappen. Vooral dit laatste wordt als een relatief groot risico gezien.

Hunter-Zaworksi et al. (2017) geven aan dat algemene struikelgevallen en het vallen van trappen en roltrappen de meest voorkomende incidenten zijn, in tegenstelling tot de 'platform-vehicle incidents'. Ook Daniel et al. (2009) trekken deze conclusie: de meerderheid van de incidenten zijn 'non-gap' incidenten.

Voor roltrappen en potentiële wachtrijen aan het eind daarvan vormen een risicobron en daarmee 'een van de gevaarlijkste plekken op een station' (Kim e.a., 2018; van den Heuvel, 2022; Antos e.a., 2017; Kyriakidis e.a., 2012).

1.4 Geraakt door trein op het perron

Het geraakt worden door een trein terwijl je aan het wachten bent op het perron wordt ook genoemd als mogelijk risico door de RSSB (2005), maar zij vond geen relatie tussen drukte op het perron en dit risico. Ook Santoso e.a. (2013) en Kyriakidis e.a. (2012) noemen dit als mogelijk (relatief groot) risico.

1.5 Verdrukking

Verdrukking kan gevoelsmatig ook een risico zijn maar wij hebben (nog) geen relevante literatuur gevonden die wijst dat drukte op perrons leidt tot incidenten. In de literatuur over risico's op perrons die wij hebben geraadpleegd, wordt dit niet als factor genoemd. Ook Hunter-Zaworski (2017) geeft aan dat zij wel indicaties heeft gevonden dat *pushing* en *crowding* tot slachtoffers heeft geleid maar dat er geen direct verband is aangetoond.

Een verklaring kan de conclusie van Lee et al. (2005) zijn dat in ieder geval 'vertrappen' niet gebeurt in een statische menigte zoals je die aantreft op perrons: *In a moving crowd*,

trampling will occur before crushing, but trampling does not occur in a static crowd. Als kritische waarde geven zij voor 'vertrappen' circa 5 p/m² en voor 'verdrukking' circa 10 p/m².

'Te drukke' stations kunnen natuurlijk ook leiden tot moeite met het evacueren van alle reizigers bij grootschalige incidenten waar hulpdiensten nodig zijn. Dit is echter geen focus van dit literatuuronderzoek.

1.6 Verspreiding virussen en stress

De RSSB (2005) ziet ook *illness* als een hoog risico (op de tweede plek qua prioriteit, na vallen en struikelen maar voor 'platform-train interface incidents'). Zij maakt hier onderscheid tussen het grotere risico op verspreiding van virussen en bacteriën onder passagiers en personeel en andere fysieke klachten (bijvoorbeeld stress) die kunnen ontstaan door drukte.

Echter, de kans op een besmetting 'binnen' is veel groter dan een besmetting 'buiten' (zie voor een overzicht van studies bijvoorbeeld Helsloot et al. (2020)). De kans om 'binnen' in een trein besmet te raken met een virus is dus veel groter dan de kans om 'buiten' op het perron besmet te raken.

2. Welke risico's komen het meeste voor op het perron?

In onderstaande paragrafen lichten we de twee relatief grootste risicobronnen uit die blijken uit (inter)nationaal bijgehouden ongevalsstatistieken.

2.1 Vallen of uitglijden op het perron of van de (rol)trap

Kim et al. (2018) laten zien dat de meeste incidenten op metrostations voortkomen uit 'vallen' (65%), gevolgd door uitglijden of vastzitten in de trein (23%). Het beklemd zitten tussen perron en trein omvat 5% van de ongelukken. Bij conventionele spoorwegincidenten omvatten val-incidenten slechts 10% van het totaal. De grootste risicofactoren zijn hier 'jumping in front of oncoming train' (45%), uitglijden of vastzitten in de trein (17%) en vallen in de spoorbak (10%).

Volgens statistiek van Hunter-Zaworski (2017) komt 39% van de incidenten waarbij mensen gewond raken voort uit het vallen van roltrappen en trappen en 31% uit het vallen of uitglijden op het perron of station.

Dit is in lijn met Daniel et al. (2009) die ook laten zien dat 'gap-injuries' slechts 25% van het totaal vormen. De 'non-gap-injuries' vormen daarmee 75% van het totaal.

2.2 Platform-Train Interfaces (PTI)

Volgens statistiek van Hunter-Zaworski (2017) komt 9% van de incidenten waarbij mensen gewond raken voort uit het vast komen te zitten tussen deuren en 9% door 'gap-platform interfaces'.

Bij 'Platform-Train interface' (PTI) incidenten is onderscheid aan te brengen in vier type incidenten die het vaakst voor komen:

- > Een passagier die tussen het perron en de trein valt (22%).
- > Letsel dat ontstaat bij het uitstappen uit een stilstaande trein (22%).
- > Een passagier die beklemd raakt tussen de deuren van de trein (21%).
- > Letsel dat ontstaat bij het instappen in een stilstaande trein (16%).

In Nederland zijn in tussen 2017 en 2021 ook ongevalsstatistieken bijgehouden (ILT, 2022), zie tabel 3 (dit is een andere bron dan in bijlage 2 gebruikt is). De cijfers lijken in grote lijnen op de Amerikaanse cijfers die Hunter-Zaworski presenteert. De meeste incidenten worden veroorzaakt door een val op het perron, station of op de stijgpunten (zoals (rol)trappen).

Tabel 3 Transferongevallen in Nederland.

Categorie	Aard ongeval	Gemiddeld aantal 2017-21	Percentage
Overig	Persoonlijke toestand	61,2	9%
Overig	Werkzaamheden	3,8	1%
PTI	Val bij in-/ uitstappen trein	45,4	7%
Val	Val in hal, tunnel, traverse	63,6	10%
Val	Val op perron	96,2	15%
PTI	Val tussen trein en perron	28	4%
Val	Val van roltrap	178,4	27%
Val	Val van trap	97	15%
PTI	Vertrekprocedure/ klem	15,6	2%
PTI/overig	Verwonding aan object	29,6	4%
PTI	Val van perron	10	2%
Overig	Overig	31	5%
Totaal		659,8	100%

Merk op dat deze cijfers alleen de *transferongevallen* van reizigers op het station laten zien, zonder dat daar een rijdend spoorvoertuig bij betrokken is. Of er (een) situatie(s) is/zijn waarbij een persoon in de bak valt en wordt aangereden door een trein, valt niet uit deze cijfers op te maken.

Let op: de frequentie van incidenten zegt op zichzelf nog niks over het risico zolang het effect van dergelijke incidenten onbekend is. Zo komt 'vallen en uitglijden' relatief vaak voor maar heeft dit incident als effect evident een andere dan 'het vallen in de bak'. Hunter-Zaworski et al. stellen daarover (2017): *The platform/ guideway and*

platform/vehicle interface incidents may not be the most common; however, many of the incidents result in serious or fatal injuries.

Santoso et al. (2013) stellen bijvoorbeeld dat 20% van de overlijdensgevallen en (gewogen) letselgevallen ontstaan door PTI-incidenten en dat PTI-risico's zorgen voor 38% van de overlijdensgevallen onder reizigers.

In Nederland zijn er tussen 2017 en 2021 geen incidenten bekend waarbij een PTI-incident tot slachtoffers met ernstig letsel of een fataliteit heeft geleid (ILT, 2022). Wel hebben een persoonlijke toestand (1 zwaargewonde), een val op het perron (2 zwaargewonden) en een overig incident (1 fataliteit) tot perronveiligheidsincidenten geleid met ernstige gevolgen. Vallen in de spoorbak of tussen de trein en het perron vallen leiden, ondanks dat het respectievelijk gemiddeld 10 en 28 keer per jaar voorkomt, niet tot incidenten met ernstig of fataal letsel.

3. Welke oorzaken worden genoemd voor perronveiligheidsincidenten?

3.1 Drukke

Drukke is een van de factoren die wordt genoemd als oorzaak voor perronveiligheidsincidenten (RSSB, 2005; Cynk et al., 2014; Santoso et al., 2013; Hunter-Zaworski, 2017; Antos et al., 2017). De RSSB (2005) stelt dat 1% tot 6% van de 'slips, trips or falls on the level in stations' komt door drukke.

Ueda et al. (2015) noemen 'collisions with other passengers' als een van de oorzaken voor 'unintentional falls onto train tracks' (maar voor slechts 1%).

Diverse statistieken laten verder zien dat de meeste incidenten gebeuren tijdens spitsuren (o.a. Daniel et al., 2009). Een significant verband tussen drukke en perronveiligheidsincidenten is echter niet aangetoond. Bovendien zijn op diverse (metro)perrons afscheidingen geplaatst waardoor incidenten als 'vallen in de bak' (al dan niet door drukke) voorkomen worden (Ueda et al., 2015).

Schneider et al. (2021) tonen aan dat een hogere 'passagiers dichtheid' correleert met het aantal overschrijdingen van de gevarenszone. Bovendien laten hun kwalitatieve observaties zien dat drukke op het perron ervoor zorgt dat de gevarenszone gezien kan worden als 'fast line' om je sneller over het perron te begeven.

3.2 Slipstream

Een 'slipstream' wordt ook genoemd als oorzaak van een incident op (drukke) perrons. Door een slipstream van een snel passerende trein kunnen personen hun evenwicht verliezen (van den Heuvel, 2022; Baker e.a., 2006; RSSB, 2007).

In het Verenigd Koninkrijk zijn er tussen 1972 en 2005 25 slipstream-gerelateerde incidenten gerapporteerd (RSSB, 2007). Bij 13 van deze incidenten was een kindwagen

betrokken (10 werden veroorzaakt door een goederentrein en 3 door een gewone passagierstrein). Deze incidenten hebben niet tot een fataliteit geleid.

3.3 Onder invloed

Een andere oorzaak voor (ernstige) perronveiligheidsincidenten is van drank en/of drugs onder invloed zijnde personen die het perron betreden (Lin et al., 2009; Ueda et al., 2015; Silla et al., 2012; Anderson et al., 2015; Yamada et al., 2014). Cijfers wijzen uit dat veel slachtoffers van incidenten op en rond het spoor onder invloed waren. Ueda et al. (2015) stellen dat 80% van de passagiers die (in Japan) op het spoor vielen onder invloed waren van drank.

3.4 Afleiding

Ueda et al. (2015) noemen 'inattention' ook als een van de oorzaken voor 'unintentional falls onto train tracks' (maar voor slechts 13%). Anderson et al. (2015) stellen daarnaast: *And distracted and intoxicated passengers are much more likely to be injured or killed than those who are aware of their surroundings.*

Uit kwalitatieve observaties van Schneider et al. (2021) blijkt ook dat onoplettendheid, door bijvoorbeeld smartphonegebruik, leidt tot overschrijdingen van de gevarezone ook wanneer het minder druk (en dus vol) is op een perron.

3.5 Ouderdom en kinderen

Ook leeftijd (en meer specifiek ouderdom en jeugdigheid) worden als factor genoemd. Daniel et al., 2009; Kim et al., 2018). Kyriakidis et al. (2012) adviseren dan ook om ouderen, kinderen en zwangere vrouwen aan te moedigen om de lift te nemen in plaats de stijgpunten (zoals roltrappen).

Bij PTI-incidenten wordt deze relatie overigens niet gelegd (Silla et al., 2012; Daniel et al., 2009).

4. Kantelpunten

4.1 Waarom het moeilijk is om kantelpunten te bepalen

Ten eerste is het moeilijk om kantelpunten te bepalen omdat reizigers zich niet evenredig over het station verspreiden, het lastig te voorspellen is hoe zij zich zullen bewegen en er kunnen allerlei obstakels op het perron zijn (Thurau e.a., 2020; Bosina e.a., 2017). De diversiteit aan passagiersstromen zorgt ervoor dat er geen cijfermatig antwoord gegeven kan worden op de vraag wanneer iets wel of niet meer veilig is.

Daarnaast zijn er perronkenmerken (lengte, breedte, aantal aankomende en passerende treinen) die drukte en onveiligheid lastig te voorspellen en dus te generaliseren maken (Yamada e.a., 2014; Terabe e.a., 2019).

Tot slot zijn er ook persoonlijke factoren die voor een belangrijk deel onveiligheid (op drukke perrons) veroorzaken, zoals het onder invloed zijn van drank en/of drugs (zie vorige paragraaf). Dit maakt gedrag en dus onveilig gedrag moeilijk te voorspellen is.

4.2 Wat laten de maatregelen zien?

ProRail en NS Stations hebben de afgelopen jaren diverse maatregelen genomen om drukte te verminderen (DECISIO, 2017) maar ook om drukte op het perron beter te spreiden:

- > Crowd control (Utrecht centraal, Schiphol en Amsterdam Zuid).
- > Geautomatiseerde omroepberichten op trappen (Utrecht centraal).
- > Weergegeven drukte informatie op informatieborden (Helsloot e.a., 2020).

Wij hebben geen evaluaties van deze maatregelen om drukte op het perron te spreiden gevonden waardoor wij nog niet weten:

- > Of er voor deze locaties (vooral Amsterdam Zuid, Schiphol en Utrecht) gekozen is o.b.v. een 'kwantitatief' kantelpunt of dat het alleen gevoelsmatig 'te druk' was.
- > Of deze maatregelen hebben gezorgd voor een verbetering van de situatie en hierdoor 'het kantelpunt' vermeden wordt.

Daarnaast zijn er uiteraard ook grote en kleine infrastructurele aanpassingen geweest op verschillende stations. Denk daarbij aan het verwijderen van meubilair, het aanpassen/vervangen van stijpunten tot aan het aanpassen van het gehele station.

5. Literatuurlijst

Anderson D., & Hunter-Zaworski, K. (2015). Platform Edge Detection and Protection Effects on Platform–Train Interface Safety. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2534), 24–30.

Antos, J. D., Jia, W., & Parker, J. H. (2017). Is It Too Crowded in Here?: In Search of Safety Standards for Pedestrian Congestion in Rail Stations. *Transportation Research Record*, 2648(1), 126–133.

Baker, C. J., Sterling, M., Figura-Hardy, G., Johnson, T., Free, P., Munley, G., Bowman, I., Pope, C., & Gawthorpe, R. (2006). The effect of train slip- streams on passengers and trackside workers. In *Proceedings of the 7th World Congress on Railway Research, Montreal*.

Bosina, E., Meeder, M., & Weidmann, U. (2017). Pedestrian flows on railway platforms. In *Swiss Transport Research Conference* (Vol. 17).

Cynk, S., Tong, S., Kinnear, N., Weare, A., Delmonte, E., Hutchins, R., & Parkes, A. (2014). Qualitative study of platform-train interface incidents. Technical report, Transport Research Laboratory.

Daniel, J., G Rotter, N., & Nichnadowicz, V. F. (2009). Customer behavior relative to gap between platform and train. Technical report, New Jersey Department of Transportation.

DECISIO (2017). Evaluatie Programma Vervoercapaciteit NS.

Helsloot, I., Groenendaal, J., & Vis, J. (2020). Literatuuronderzoek. Wat weten we nu eigenlijk van het coronavirus?

Helsloot, I., & Vis, J. (2020). Review risicomodel 2.0 perronveiligheid.

Hunter-Zaworski, K., Anderson, D., Rutenberg, U., Tomaszewska, E. & McConnell, J. (2017). Manual to improve rail transit safety at platform/vehicle and platform/guideway interfaces.

Hunter-Zaworski, K. (2017). Analysis of passenger incident data from five rail transit systems. *Safety*, 3(3), 21.

Inspectie Leefomgeving en Transport (ILT) (2022). Veiligheid van de spoorwegen: Jaarverslag Spoorwegveiligheid 2021.

Kim, J. H., Young Jeong, J., Wook Kim, J., & Kyung Oh, J. (2016). A factor analysis of urban railway casualty accidents and establishment of preventive response systems. *Procedia-social and behavioral sciences*, 218, 131-140.

Kyriakidis, M., Hirsch, R., Majumdar, A. (2012). Metro railway safety: An analysis of accident precursors. *Safety science*, 50(7), 1535-1548.

Lee, R. S., & Hughes, R. L. (2005). Exploring trampling and crushing in a crowd. *Journal of transportation engineering*, 131(8), 575-582.

Leitner, B. (2017). A general model for railway systems risk assessment with the use of railway accident scenarios analysis. *Procedia engineering*, 187, 150-159.

Lin, P. T. & Gill, J. R. (2009). Subway train-related fatalities in New York City: Accident versus suicide. *Journal of forensic sciences*, 54(6), 1414-1418.

NS (z.d.). Safety during your journey. Geraadpleegd op 30 mei 2023 via <https://www.ns.nl/>.

ProRail (2020). ProRail meet drukte op grote stations met sensoren. Geraadpleegd op 30 mei 2023 via <https://www.prorail.nl/>.

Rail Safety and Standards Board (RSSB) (2005). *Health and safety effects of crowding. Research Programme Management.*

Rail Safety and Standards Board (RSSB) (2006). *Minimisation of accidents at the train/platform interface. Research Programme Operations.*

Rail Safety and Standards Board (RSSB) (2007). *Effective management of risk from slipstream effects at trackside and platforms. Research Programme Engineering.*

Santoso, D. S., Mahadthai, S., Jahed, A. B., & Tun, N. (2013). How safe is the rail platform? a study of Bangkok Mass Transit System (BTS). In *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, volume 9.

Schneider, A., Krueger, E., Vollenwyder, B., Thureau, J., & Elfering, A. (2021). Understanding the relations between crowd density, safety perception and risk-taking behavior on train station platforms: A case study from Switzerland. *Transportation research interdisciplinary perspectives*, 10, 100390.

Silla, A. & Luoma, J. (2012). Main characteristics of train–pedestrian fatalities on Finnish railroads. *Accident Analysis & Prevention*, 45, 61–66.

Terabe, S., Kato, T., Yaginuma, H., Kang, N., & Tanaka, K. (2019). Risk assessment model for railway passengers on a crowded platform. *Transportation research record*, 2673(1), 524-531.

Thureau, J., & Keusen, N. (2020). Influence of obstacles on the use of the danger zone on railway platforms. *Collective Dynamics*, 5, 505-507.

Ueda, M., Sawada, Y. & Matsubayashi, T. (2015). The effectiveness of installing physical barriers for preventing railway suicides and accidents: evidence from Japan. *Journal of affective disorders*, 178, 1–4.

Van den Heuvel, J. (2022). Mind your passenger! The passenger capacity of platforms at railway stations in the Netherlands. TRAIL Research School.

Yamada, S., Terabe, S., & Kasai, M. (2014). *Safety performance measures for railway stations* (No. 14-1868).

Bijlage 2: Analyse incidentrapportage

In deze bijlage analyseren we in welke mate de toedracht van (verschillende soorten) incidenten in relatie kan worden gebracht met drukte in de trein, in het station of op het perron. Hiervoor is de database met ongevallenregistraties van ProRail gebruikt.

1. Identificatie meldingen incidenten met relatie drukte

Op grond van de rapportages voor ieder van de van hieronder getoonde type incidenten zogenaamde *Wordclouds* gemaakt.

- 1) Primair ongeval - Overig - Transferongeval
- 2) Primair ongeval - Overig - Transferongeval - Door persoonlijke toestand
- 3) Primair ongeval - Overig - Transferongeval - Door werkzaamheden
- 4) Primair ongeval - Overig - Transferongeval - Val bij in-uitstappen trein
- 5) Primair ongeval - Overig - Transferongeval - Val in hal
- 6) Primair ongeval - Overig - Transferongeval - Val in tunnel
- 7) Primair ongeval - Overig - Transferongeval - Val op perron
- 8) Primair ongeval - Overig - Transferongeval - Val op traverse
- 9) Primair ongeval - Overig - Transferongeval - Val tussen trein en perron
- 10) Primair ongeval - Overig - Transferongeval - Val van perron
- 11) Primair ongeval - Overig - Transferongeval - Val van roltrap
- 12) Primair ongeval - Overig - Transferongeval - Val van trap
- 13) Primair ongeval - Overig - Transferongeval - Vertrekprocedure/klem
- 14) Primair ongeval - Overig - Transferongeval - Verwonding aan object

De gedachte van deze Wordcloud was te zien hoe in de rapportages melding is gemaakt van drukte en in hoeverre die überhaupt regelmatig voorkomt. Een voorbeeld van zo'n Wordcloud is in onderstaande figuur weergegeven. Opvallend voor dit voorbeeld is dat in de Wordcloud voor dit type ongeval "val van trap" geen termen staan die naar drukte refereren.

- Primair ongeval - Overig - Transferongeval - Val van trap

NS-meldingssoort



Figuur 8 Wordcloud gebaseerd op de kolom "Omschrijving" in de incident rapportage van ProRail.

We hebben voor de vervolganalyses ervoor gekozen om gebruik te maken van zoektermen in de omschrijving van het incident. Hierbij is gezocht naar de volgende woorden “drukke”, “erg druk” en “gedrang”. Na handmatige controle blijken er 48 meldingen te zijn die refereren naar drukke als (mogelijke) oorzaak van het incident.

Onderstaande tabel geeft een overzicht van deze incidenten. De tabel laat zien dat het percentage aan drukte gerelateerde incidenten beperkt is, in totaal niet meer dan 0,5%. Voor sommige typen incidenten loopt dit op tot 4%: van de 125 keer dat er sprake was van een val van het perron zijn 5 incidenten gerelateerd aan drukte. Uiteindelijk bleken 6 van de gemelde incidenten niet relevant voor ons onderzoek naar kantelpunten.

Tabel 4 Overzicht aantallen incidenten al dan niet in relatie tot drukte of gedrang. In de tabel zijn de voor het kantelpuntenproject relevante incidenttypen in blauw aangegeven. Periode: 2008 – september 2023

Type incident	Totaal	Drukke	%
Primair ongeval - Overig - Transferongeval - Val op traverse	25	1	4,0%
Primair ongeval - Overig - Transferongeval - Val van perron	125	5	4,0%
Primair ongeval - Overig - Transferongeval - Val tussen trein en perron	526	6	1,1%
Primair ongeval - Overig - Transferongeval - Door werkzaamheden	101	1	1,0%
Primair ongeval - Overig - Transferongeval - Val bij in-uitstappen trein	653	5	0,8%
Primair ongeval - Overig - Transferongeval - Val op perron	1683	11	0,7%
Primair ongeval - Overig - Transferongeval - Val van trap	1552	7	0,5%
Primair ongeval - Overig - Transferongeval - Val van roltrap	2070	7	0,3%
Primair ongeval - Overig - Transferongeval - Verwonding aan object	316	1	0,3%
Primair ongeval - Overig - Transferongeval - Val in hal	796	2	0,3%
Primair ongeval - Overig - Transferongeval	543	1	0,2%
Primair ongeval - Overig - Transferongeval - Door persoonlijke toestand	631	1	0,2%
Primair ongeval - Overig - Transferongeval - Val in tunnel	103	0	0,0%
Primair ongeval - Overig - Transferongeval - Vertrekprocedure/klem	389	0	0,0%
Totaal	9513	48	0,5%

2. Verdeling incidenten over stations

In drukke stations gebeuren meer incidenten en – door de bank genomen – ook meer incidenten die aan drukte kunnen worden gerelateerd. Onderstaande tabel laat dit voor de top 35 (van het aantal incidenten in de rapportage) zien.

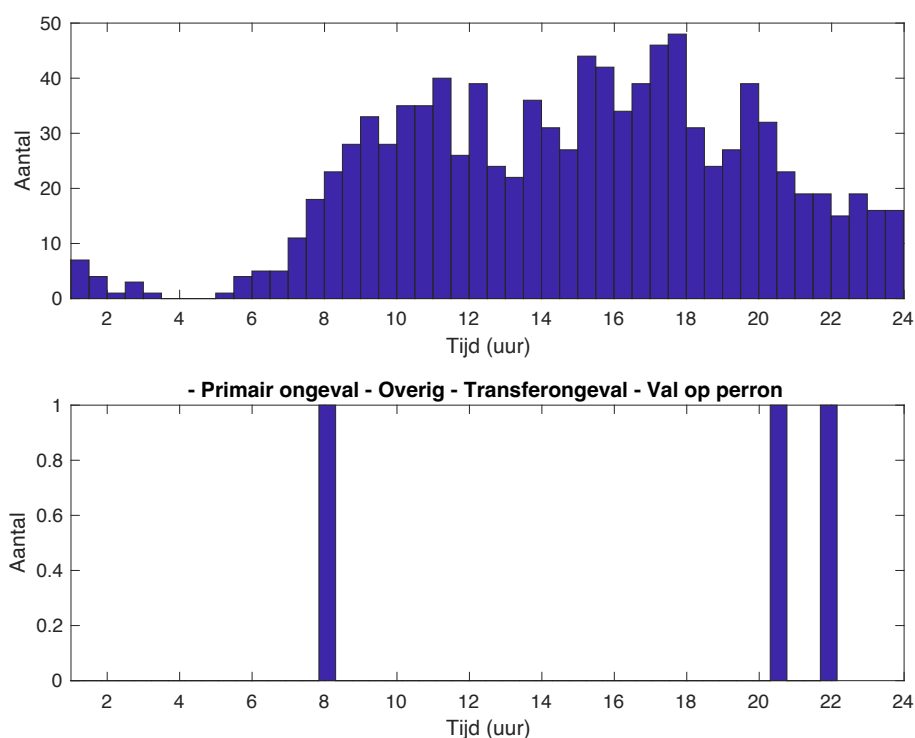
Kijken we echter naar het risico per reiziger, dan zien we grote verschillen: zo is Schiphol relatief veilig (3,1 incidenten in 5 jaar / 1000 reizigers) en Zwolle relatief risicovol (10,44 incidenten in 5 jaar / 1000 reizigers). Verklaringen voor dergelijke verschillen zijn divers: verschillen in type reizigers (e.g., relatief veel oudere reizigers), lay-out van stations, relatieve drukte in het station naar oppervlak, etc. Een nadere analyse is nodig om hier kwantitatieve uitspraken over te doen.

Tabel 5 Top 35 stations naar totaal aantal incidenten, i.r.t. aantal reizigers (2022) o.b.v. dashboard NS.

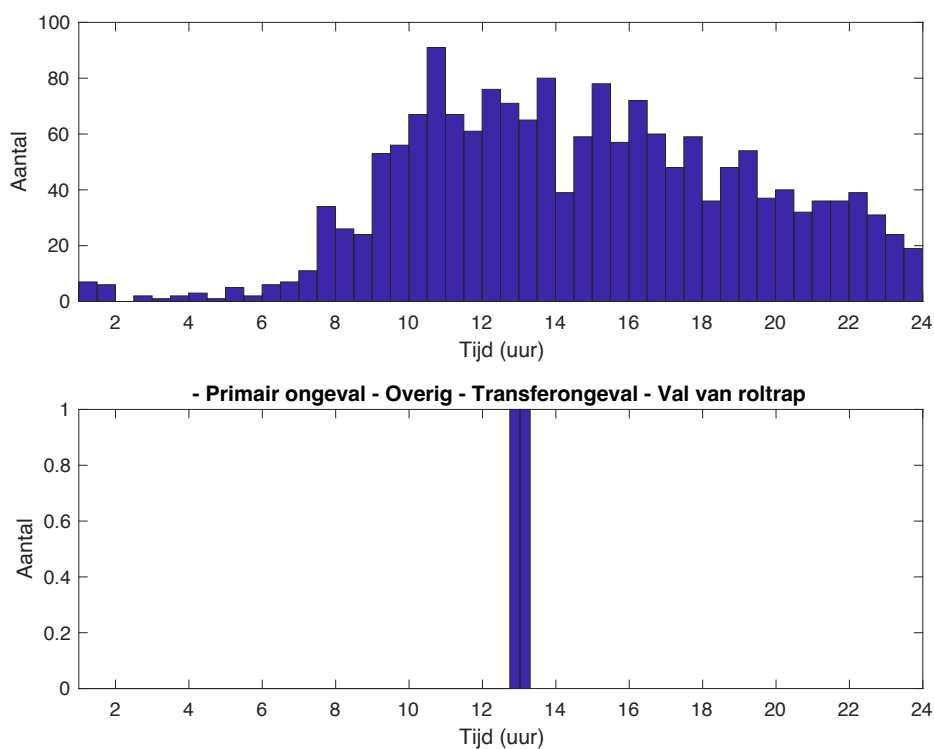
Station	Totaal	Drukte	%	Reizigers (x1000)	Incidenten/ 1000 reiziger	Drukteincl./ 1000 reiziger
Utrecht Cs	1430	4	0,3%	189	7,57	0,021
Amsterdam Centraal	1182	5	0,4%	151	7,83	0,033
Rotterdam Cs	726	2	0,3%	89	8,16	0,022
Zwolle	407	4	1,0%	39	10,44	0,103
Den Haag Centraal	375	0	0,0%	69	5,43	0,000
Eindhoven	353	0	0,0%	56	6,30	0,000
's-Hertogenbosch	331	6	1,8%	48	6,90	0,125
Amersfoort Centraal	329	2	0,6%	40	8,23	0,050
Arnhem Centraal	299	3	1,0%	37	8,08	0,081
Leiden Centraal	285	0	0,0%	72	3,96	0,000
Breda	239	1	0,4%	33	7,24	0,030
Schiphol Airport	226	4	1,8%	73	3,10	0,055
Nijmegen	150	1	0,7%	36	4,17	0,028
Dordrecht	135	1	0,7%	19	7,11	0,053
Almere Centrum	134	0	0,0%	24	5,58	0,000
Tilburg	131	3	2,3%	29	4,52	0,103
Amsterdam Sloterdijk	126	0	0,0%	46	2,74	0,000
Gouda	124	1	0,8%	25	4,96	0,040
Alkmaar	105	1	1,0%	15	7,00	0,067
Haarlem	88	0	0,0%	33	2,67	0,000
Den Haag HS	86	1	1,2%	30	2,87	0,033
Deventer	81	1	1,2%	18	4,50	0,056
Groningen	79	1	1,3%	14	5,64	0,071
Hilversum	79	0	0,0%	22	3,59	0,000
Roosendaal	78	1	1,3%	11	7,09	0,091
Amsterdam Zuid	78	0	0,0%	50	1,56	0,000
Sittard	67	0	0,0%	7	9,57	0,000
Apeldoorn	56	0	0,0%	11	5,09	0,000
Hengelo	56	0	0,0%	5	11,20	0,000
Maastricht	55	0	0,0%	10	5,50	0,000
Amsterdam Bijlmer	48	1	2,1%	21	2,29	0,048
Amsterdam Amstel	45	0	0,0%	23	1,96	0,000
Venlo	43	0	0,0%	3	14,33	0,000
Lelystad Centrum	39	1	2,6%	10	3,90	0,100
Leeuwarden	38	0	0,0%	8	4,75	0,000
Totalen	8103	44				

3. Verdeling incidenten over tijd van de dag

Tot slot hebben we gekeken naar de verdeling van de incidenten over de loop van de dag. De figuur hieronder toont een voorbeeld van het incidenttype "Val op perron". Het aantal incidenten volgt globaal de drukteverdeling over de dag. Dit patroon zien we ondanks kleine verschillen voor nagenoeg alle type incidenten.



Figuur 9 Verdeling van incidenten "val op perron" als functie van de tijd van de dag. NB: veel incidenten hebben geen tijdregistratie en zijn derhalve niet in de figuur opgenomen.



Figuur 10 Verdeling van incidenten "val van roltrap" als functie van de tijd van de dag. NB: veel incidenten hebben geen tijdregistratie en zijn derhalve niet in de figuur opgenomen

4. Conclusies

Op grond van de eerste analyses kunnen we de volgende conclusies trekken:

- > Er gebeuren incidenten als gevolg van drukte. In de rapportage worden 48 incidenten gemeld (vanaf pakweg 2009), waarvan er 42 relevant zijn voor het onderzoek naar kantelpunten. We kunnen concluderen dat drukte (soms) een oorzaak is voor een incident.
- > In verhouding tot de overige incidenten, die niet direct aan drukte kunnen worden gerelateerd (op grond van de omschrijving van het incident) komen de bovengenoemde relatief erg weinig voor: het gaat om slechts 0,5% van alle incidenten.
- > Wel zijn er behoorlijke verschillen per locatie: voor sommige stations is het aandeel aan drukte gerelateerde incidenten 2% of meer. Het risico op een incident verschilt sowieso sterk per station.
- > We zien grote verschillen per incidenttype: van de 125 gemelde incidenten waarbij een reiziger van het perron is gevallen, is in 4% drukte aangegeven als (mogelijke) oorzaak.

Bijlage 3: Natuurlijke wachtdichtheid.

Om een beter begrip te krijgen van het wachtgedrag van reizigers op perrons, hebben we uitgebreide observaties en analyses uitgevoerd. Bij ProRail zijn camerabeelden bekeken van drukke momenten in april en mei 2023. Hierbij is onder andere gekeken naar koningsdag en drukke forenzenspitsen. Daarnaast hebben de onderzoekers in juni 2023 meegelopen bij een crowd control operatie op station Bijlmer Arena. Tenslotte is gebruik gemaakt van 'smart station data' van drie verschillende stations: Eindhoven (spoor 2/3), Utrecht Centraal (spoor 5) en Amsterdam Bijlmer Arena (sporen 1, 2/3, 8). Deze gegevens waren belangrijk om inzicht te verkrijgen in de natuurlijke verspreiding en dichtheid van wachtende reizigers op deze drukke locaties.

Observaties en hypothesevorming

Onze observaties op drukke perrons toonden aan dat reizigers, zelfs onder drukke omstandigheden, hun weg vonden naar minder drukke gedeeltes van het perron. De meest uit het oog springende observatie was koningsdag 2023 op station Breda. Het perron was vrij druk en vanaf de trap kwamen steeds meer reizigers aan. Het viel op dat nagenoeg alle reizigers doorliepen naar het einde van het perron waar nog wel ruimte was. Er was een 'olifantenpaadje' ontstaan tussen de wachtende reizigers door. Dat pad liep langs een windscherm dat haaks op de perronrand stond.

Op iets minder drukke perrons en tijdens de crowd control operatie op Bijlmer Arena zagen we vergelijkbaar gedrag, waarbij sommige nieuwe wachtende reizigers toch een relatief rustige plek vonden om te wachten. Dit gedrag leidde tot de hypothese dat er een 'natuurlijke wachtdichtheid' bestaat. Volgens deze hypothese zullen, zolang de globale dichtheid op het perron onder deze natuurlijke grens blijft, de lokale dichtheden op de drukste delen van het perron begrensd zijn en dat minder gebruikte delen van het perron benut worden.



Figuur 11 Impressie van de menigte die staat te wachten om het station te betreden en de drukte op het perron tijdens de crowd control operatie.

Analyseproces

Voor het toetsen van de hypothese hebben we analyses uitgevoerd op de smart station data. Deze bestonden uit twee delen: een 'visuele' beoordeling van de spreiding van de wachtende reizigers en een statistische analyse van het wachtgedrag. Voor de 'visuele' beoordeling hebben we gekeken naar hoe wachtende reizigers zich verspreiden over het perron, gebruikmakend van analysetools: visualisaties van de data. De statistische analyse richtte zich meer op de numerieke aspecten van het wachtgedrag.

Voor de analyse hebben we ons geconcentreerd op de drukste momenten, d.w.z. haltingen met meeste wachtende reizigers, op de stations. Voor Utrecht hadden we specifieke halteringsgegevens van ProRail, terwijl we voor de andere stations haltingen afleidden door toenames van mensen in de gevarenzone te observeren bij het arriveren van een trein. Deze methode hielp ons om de halteringsmomenten nauwkeurig te identificeren.

Visuele Analyse

De analysefiguren die aan het eind van deze bijlage zijn opgenomen tonen aan dat zodra een bepaalde lokale dichtheid in de loop- of wachtzone wordt bereikt, deze niet meer structureel toeneemt. Aan de randen van het perron werd echter wel een toename van de dichtheid waargenomen. Nieuw arrivinge reizigers kozen er vaak voor om verderop een wachtplek te zoeken, waardoor de globale dichtheid van het perron onder de 2 p/m^2 bleef.

We zien dat lokale dichtheden in de loopzone op sommige plaatsen oplopen tot 3 p/m^2 . Dat is op de drukste momenten in Eindhoven het geval. Er is dan echter nog veel ruimte in de wachtzone achter deze reizigers beschikbaar. Uit de analysefiguren blijkt dat het wachtgedrag verschilt per perron en per situatie. Bijlmer Arena heeft bij de uitloop van evenementen een hoge lokale dichtheid langs de perronrand, waarbij er structureel in de gevarenzone wordt gewacht. Ook bij Eindhoven is dat het geval in de late avonduren, waarbij we ook vermoeden dat er evenementen zijn geweest. Bij reguliere spitsen zien we dat reizigers meer afstand tot de perronrand houden.

Statistische Analyse

Voor de statistische analyse hebben we de globale dichtheid, berekend volgens de methode in bijlage 5, afgezet tegen de lokale dichtheid. Ook deze figuren zijn opgenomen aan het eind van deze bijlage. We gebruikten segmenten van 5 meter, zonder de oppervlakte van de gevarenzone mee te tellen. Om een onderschatting van de dichtheid te voorkomen, 'verplaatsten' we reizigers die in de gevarenzone stonden naar het meetvak. De dichtheden zijn weergegeven in histogrammen en de relatie ertussen is vergeleken met scatterplots. Daarnaast wordt de maximale lokale dichtheid per segment bekeken, geclassificeerd op basis van de maximale globale dichtheid.

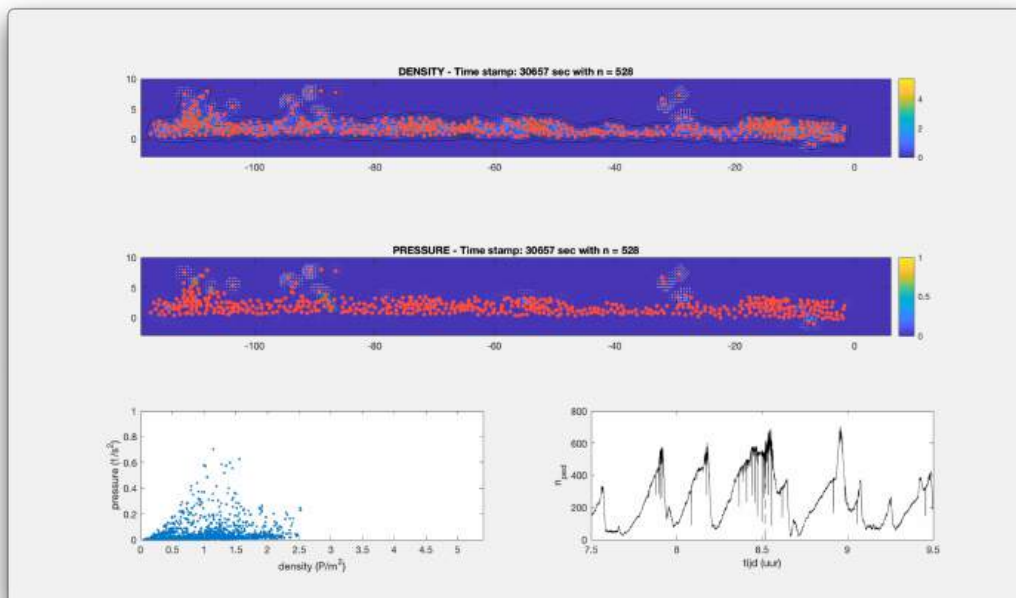
Onze analyses wijzen op het volgende:

- > **Bijlmer Arena (spoor 1 en 8):** Beperkte data beschikbaar (maar over 15 meter van het perron), waardoor we geen globale dichtheid kunnen meten en we geen uitspraken kunnen doen over de spreiding. De getoonde maximale globale dichtheid is niet de daadwerkelijke globale dichtheid, maar ook een lokale indicator.
- > **Bijlmer Arena (spoor 2 en 3):** Er is hier een sprake van een opgeknijpt meetveld. Er zijn drie meetsegmenten die zich verder op het perron bevinden. De lokale dichtheden bereikten maximaal 2,5 p/m² bij globale dichtheden tussen 1 en 1,5 p/m², waarbij verder gelegen segmenten onderbenut bleven. We komen hier globaal gezien dus niet in de buurt van de natuurlijke wachtdichtheid.
- > **Eindhoven (spoor 3):** Dit deel van het perron bleef relatief rustig.
- > **Eindhoven (spoor 4):** De meeste halteringen lieten globale dichtheden tot net boven 1 p/m² zien, met enkele uitschieters naar 1,7 p/m². Lokaal wordt op de perron de hoogste dichtheid bereikt, met pieken tot 3 p/m². Hierbij geldt dat de maximale lokale dichtheid ook bij de lagere globale dichtheden tot 2 p/m² (en in sommige gevallen zelfs 3 p/m²) uitkomt. Het is dus niet noodzakelijk een hoge globale dichtheid te hebben om een hoge lokale dichtheid te realiseren. De lokale dichtheid is wel begrensd. De maximale lokale dichtheid per segment toont bovendien aan dat de verder weg gelegen segmenten pas goed gebruikt worden wanneer de globale dichtheid hoog is.
- > **Utrecht (spoor 5):** De globale dichtheid steeg sporadisch tot 1,5 p/m². Actief crowd management speelt hier een rol. De lokale dichtheden bereiken in een aantal gevallen de 2 p/m², dat gebeurt ook in een paar situaties waarbij de globale dichtheid nog onder 1 p/m² is. Omdat er op dit perron meerdere stijgpunten zijn, zien we dat de verdeling over de segmenten minder afhangt van de globale dichtheid

De resultaten bevestigen onze hypothese over de natuurlijke wachtdichtheid, die we vaststellen op 2 p/m². Hoewel er incidentele situaties waren met hogere dichtheden, leken deze geen ernstige problemen te veroorzaken. De lokale dichtheid overschreed zelden de 3 p/m², een drempel waarbij in bijlage 4 een verhoogd risico op een domino-effect wordt aangegeven.

Aanvullende observatie

Om te analyseren of in het verleden zich geen situaties voorbij het kantelpunt voor hebben gedaan, hebben we een aanvullende observatie gedaan bij een aantal pre-corona spitsen. Hiervoor is de smart station data van perron 5 van Utrecht Centraal gebruikt. Het gaat om dagen in september en november 2019. In onderstaande figuur is de lokale dichtheid (op basis van Gaussische kernel smoothing) bepaald op het perron. Tevens is de druk tussen reizigers weergegeven (niet relevant voor dit onderzoek). De scatterplot linksonder toont de druk en dichtheid voor iedere reiziger. Daaruit komt naar voren dat de lokale dichtheid niet boven de 2,5 p/m² uitkomt in dit snapshot. Dat geldt zo voor de gehele duur vóór aankomst van de trein. Ook hier observeren we dus geen situatie voorbij het kantelpunt.



Figuur 12 Lokale dichtheid op perron 5 Utrecht Centraal

Onzekerheid rondom het kantelpunt.

Het vaststellen van de natuurlijke wachtdichtheid op 2 p/m^2 is gedaan op alle beschikbare informatie, waarbij de belangrijkste informatie is dat 2 p/m^2 de geobserveerde bovengrens van globale dichtheid is. Bovendien schatten we in dat deze grens overeenkomt met de geobserveerde drukke momenten op Breda en tijdens de crowd control operatie. Echter kunnen we de grens niet eenvoudig met een gegeven significantie en bijbehorende onzekerheidsmarge vaststellen. In deze paragraaf zullen we de natuurlijke wachtdichtheid vanuit een ander perspectief benaderen om toch iets over de onzekerheid te kunnen zeggen.

Hiervoor gaan we gebruik maken van fundamentele diagrammen van loopstromen, zoals ook gepresenteerd aan het eind van sectie 3.2. Een fundamenteel diagram (FD) beschrijft de wetmatige relaties tussen snelheid, intensiteit en dichtheid. Zo'n diagram is geldig voor specifieke lokale situaties, zoals tegengestelde stromen in een corridor, of een stroom op een trap. Uit een FD is een capaciteitspunt af te leiden. Dat is de dichtheid waarbij de doorstroming maximaal is. Als de dichtheid voorbij dat punt gaat, zal de intensiteit van reizigers afnemen. Voor het perron zijn geen specifieke FD's afgeleid omdat daar interactie is tussen wachtende reizigers en lopers; een FD zou dan toegespitst zijn op een specifieke verhouding tussen wachtters en lopers. Het capaciteitspunt is dan ook niet direct van toepassing op natuurlijke wachtdichtheid waarbij we op zoek zijn situaties waar opstoppen optreden. Dat heeft twee redenen: (1) het FD is niet gericht op de mix tussen wachtters en lopers zoals dat voorkomt op perrons, en (2) het is voor een perron waar de natuurlijke wachtdichtheid geldt prima

mogelijk dat er lokale situaties zijn waarbij die voorbij het capaciteitspunt zijn; de snelheid is dan wat lager, maar er is nog steeds doorstroming.

Voor onze analyse hebben we daarom ook de wetmatige relaties op een anders schaalniveau nodig, namelijk die van het hele perron (dus een 'globaal' perspectief). Op dit schaalniveau worden die relaties beschreven met Netwerk Fundamenteel Diagrammen (NFD, ook wel macroscopische fundamenteel diagrammen genoemd). NFD beschrijven de relaties tussen globale dichtheid, spreiding in dichtheid, instroom naar het perron en snelheid.¹⁷ De relaties tussen maximale lokale dichtheid en de globale dichtheid die we eerder in deze bijlage bespraken kan gezien worden als een soort NFD. Analoog aan het capaciteitspunt bij FD's is er bij NFD's ook een omslagpunt, vanaf wanneer de prestatie slechter wordt bij toenemende dichtheden. Kenmerkend voor dit omslagpunt is dat spreiding van dichtheden dan plots flink toeneemt. Dat is gelijk aan het gedrag dat wij verwachten bij het passeren van het kantelpunt op het perron. Het omslagpunt van een NFD voor perrons en het kantelpunt zijn dus gelijk aan elkaar.

Dit geeft ons een andere manier om het kantelpunt af te leiden, namelijk als we het omslagpunt van het NFD kennen. Helaas (of gelukkig) observeren we het omslagpunt van NFD's op het perron niet. Echter, omdat zowel het FD en het NFD wetmatigheden beschrijven is het mogelijk om deze analytisch aan elkaar te koppelen. Het is mogelijk om het NFD te formuleren als een combinatie van onderliggende, lokaal geldende, FD's. Op die manier ontstaat er ook een verband tussen de capaciteitspunten van FD's en het omslagpunt van het NFD (en dus het kantelpunt). Daarbij geldt dat de spreiding rondom het gemiddelde ongeveer gelijk blijft, maar dat het gemiddelde (dus het punt zelf) naar boven verschuift.¹⁸

In onderstaande figuur tonen we de spreiding van capaciteitspunten (hier maximale dichtheden genoemd) van FD's op basis van verschillende empirische onderzoeken.¹⁹ Het gemiddelde ligt hier ongeveer op 1,85 p/m² en de qua spreiding liggen ze in de bandbreedte tussen de 1,6 en 2,1 p/m².

¹⁷ Dit paper geeft een goede introductie hiertoe: Hoogendoorn, S. P., Daamen, W., Knoop, V. L., Steenbakkers, J., & Sarvi, M. (2018). Macroscopic fundamental diagram for pedestrian networks: theory and applications. *Transportation research part C: emerging technologies*, 94, 172-184.

¹⁸ Zie ook Hoogendoorn, S. P., Daamen, W., Knoop, V. L., Steenbakkers, J., & Sarvi, M. (2018). Macroscopic fundamental diagram for pedestrian networks: theory and applications. *Transportation research part C: emerging technologies*, 94, 172-184.

¹⁹ Bron: van den Heuvel, J. (2022). Mind your passenger!: The passenger capacity of platforms at railway stations in the Netherlands.



Figuur 13 Maximale dichtheden van voetgangersvoorzieningen

Wanneer we aannemen dat we onze inschatting van het kantelpunt het gemiddelde betreft, kunnen we afleiden dat, gegeven gelijke spreiding, het kantelpunt in de range tussen de 1,75 en 2,25 p/m² ligt.

Figuren visuele analyse

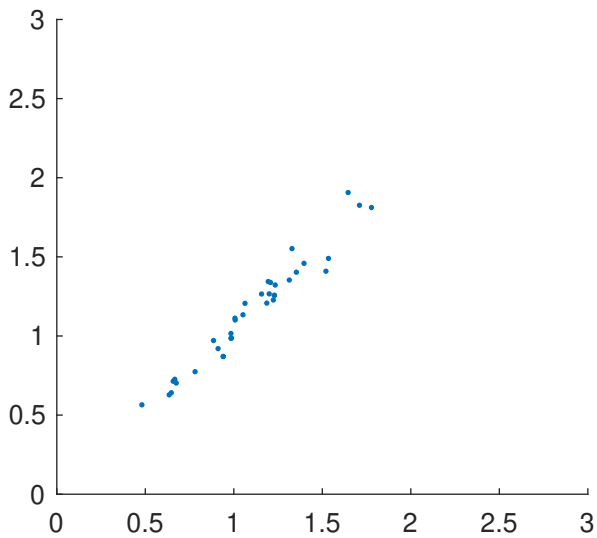
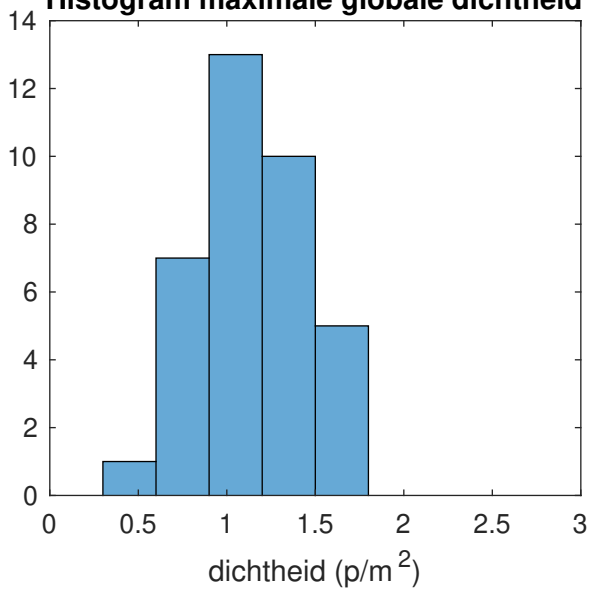
Per haltering is een plot beschikbaar. In de losse bijlages is een selectie (waar de analyses in dit hoofdstuk op zijn gebaseerd), alsmede een pdf met alle figuren opgenomen. Links in elke plot staat voor een verschillende zone de dichtheid over de tijd weergegeven. De y-as is de lengte van het perron, waarbij de eenheid lengtedelen van 5 meter betreft. We onderscheiden de volgende zones: gevarenzone (gz), loopzone (lz), wachtzone (wz), totaal (tot), en voor Eindhoven specifiek nog de wachtzone + loopzone (wzlz). Met de blauwe getallen wordt de maximale minuut-dichtheid in de getoonde periode weergegeven. Voor Eindhoven en Bijlmer is dat tussen de twee verticale strepen; voor Utrecht alles links van de rode verticale streep. We berekenen de dichtheid dus alleen voor de minuten vóór de trein aankomt.

De cijfers boven de dichtheden tonen het maximaal aantal reizigers aanwezig vóór haltering over alle segmenten in de zone.

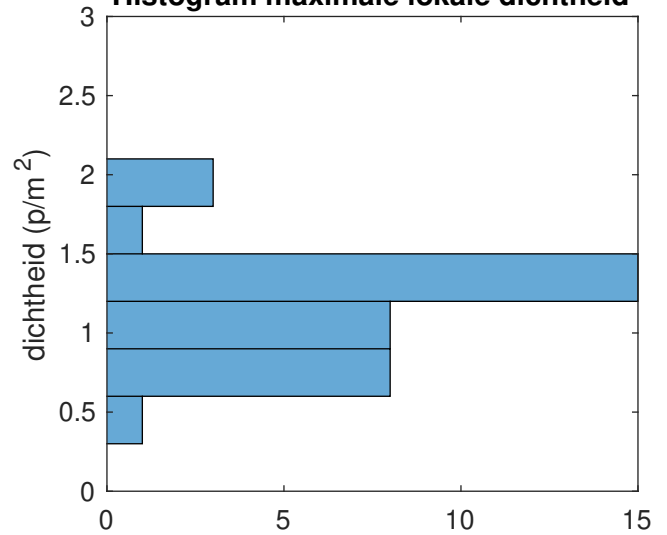
Daarnaast wordt in kleur de afgeleide van de dichtheid weergegeven. Blauwe tinten zijn toename van dichtheid en gele tinten een afname.

Bijlmer Arena s1

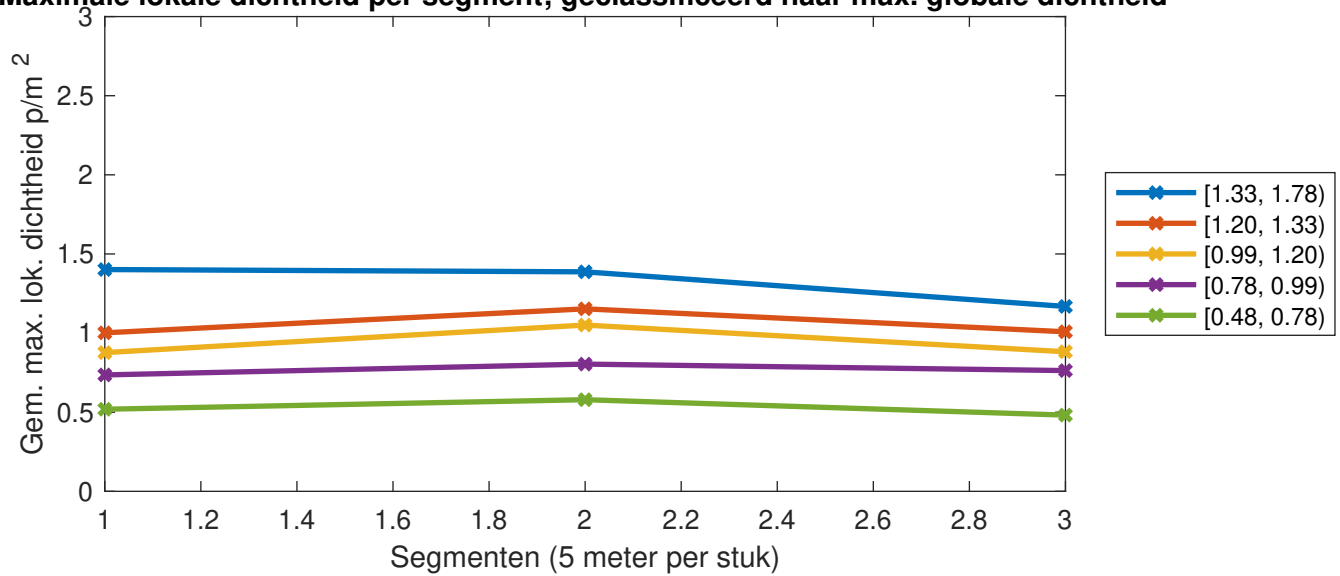
Histogram maximale globale dichtheid



Histogram maximale lokale dichtheid

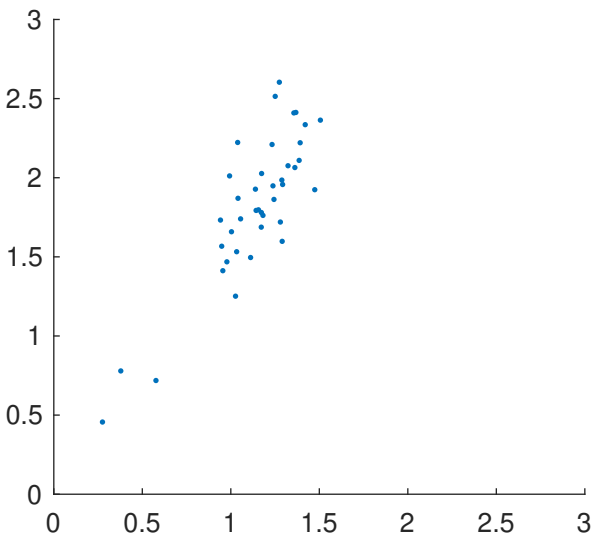
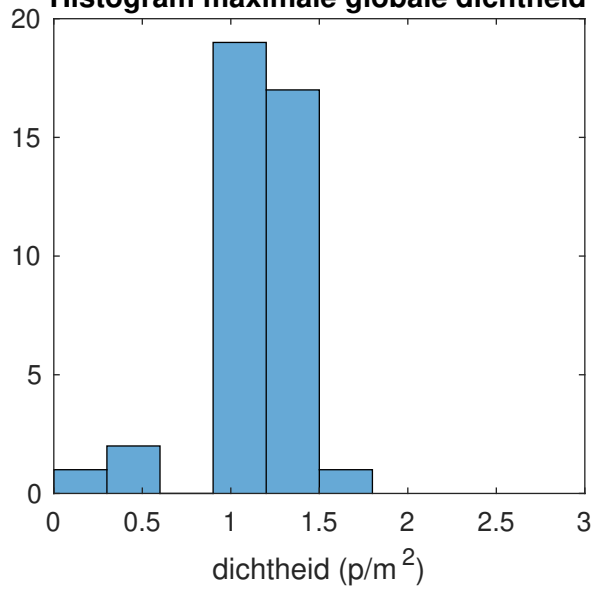


Maximale lokale dichtheid per segment; geclassificeerd naar max. globale dichtheid

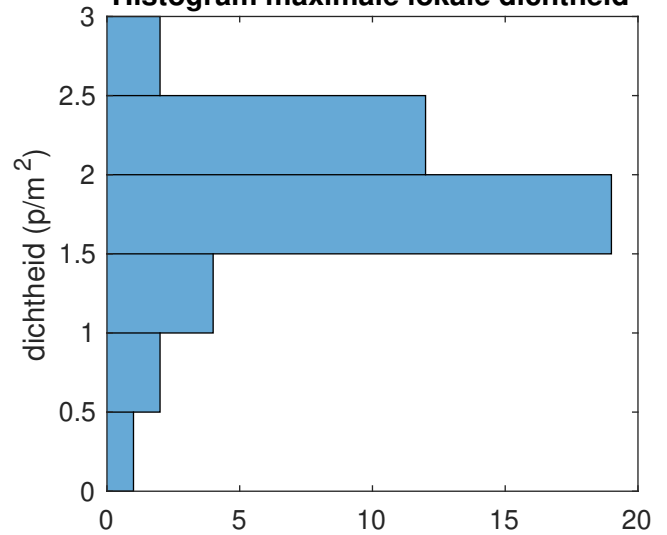


Bijlmer Arena s2

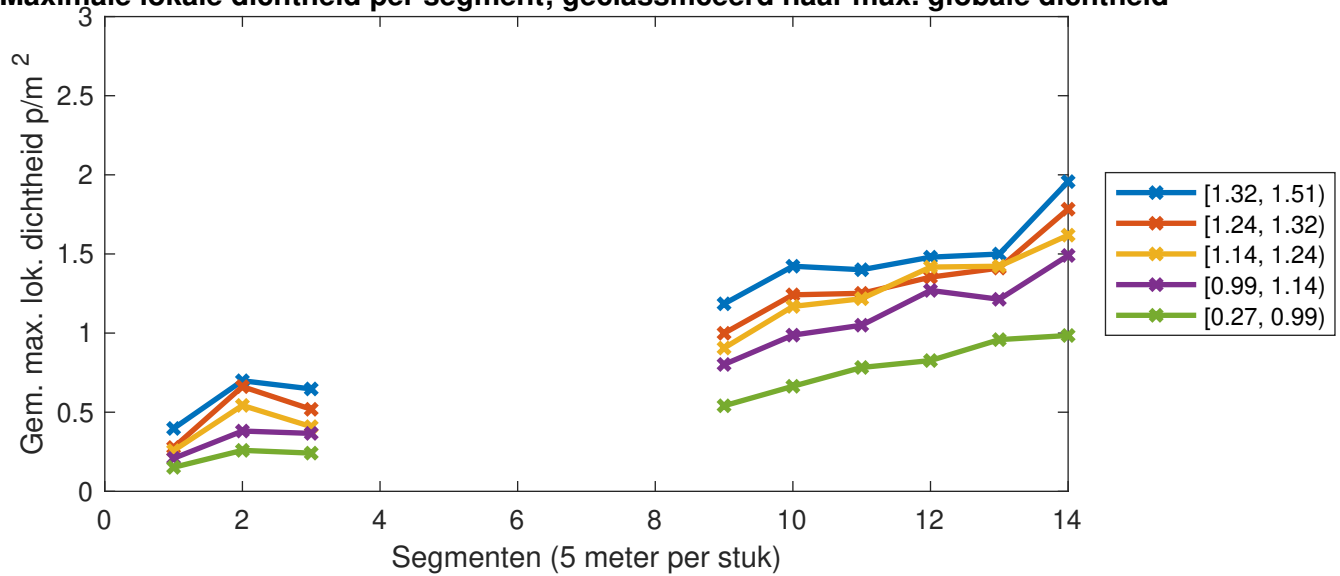
Histogram maximale globale dichtheid



Histogram maximale lokale dichtheid

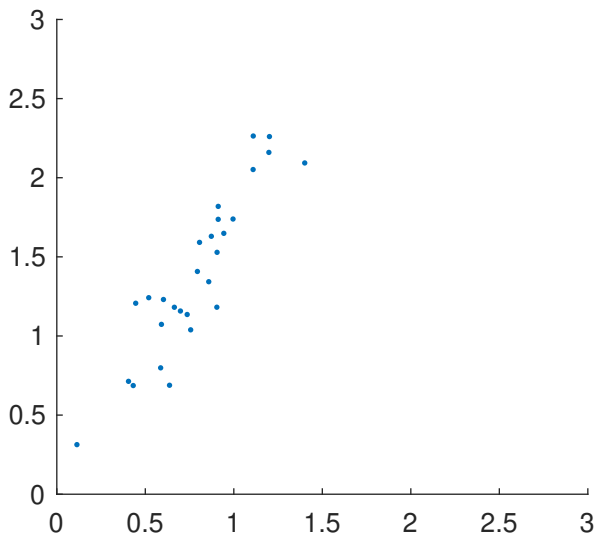
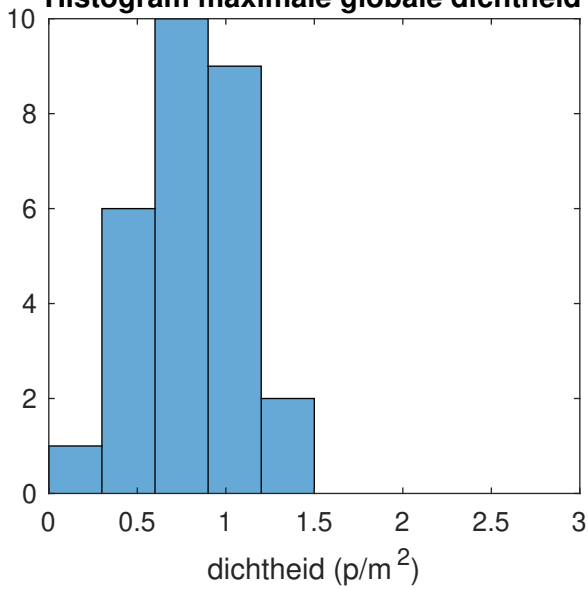


Maximale lokale dichtheid per segment; geclassificeerd naar max. globale dichtheid

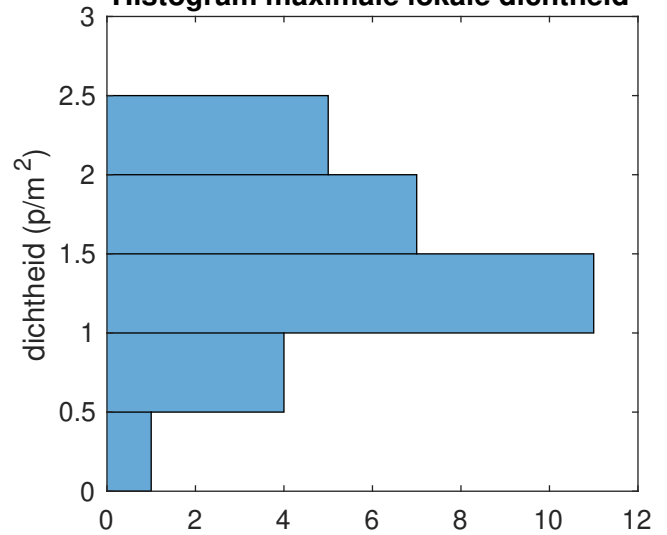


Bijlmer Arena s3

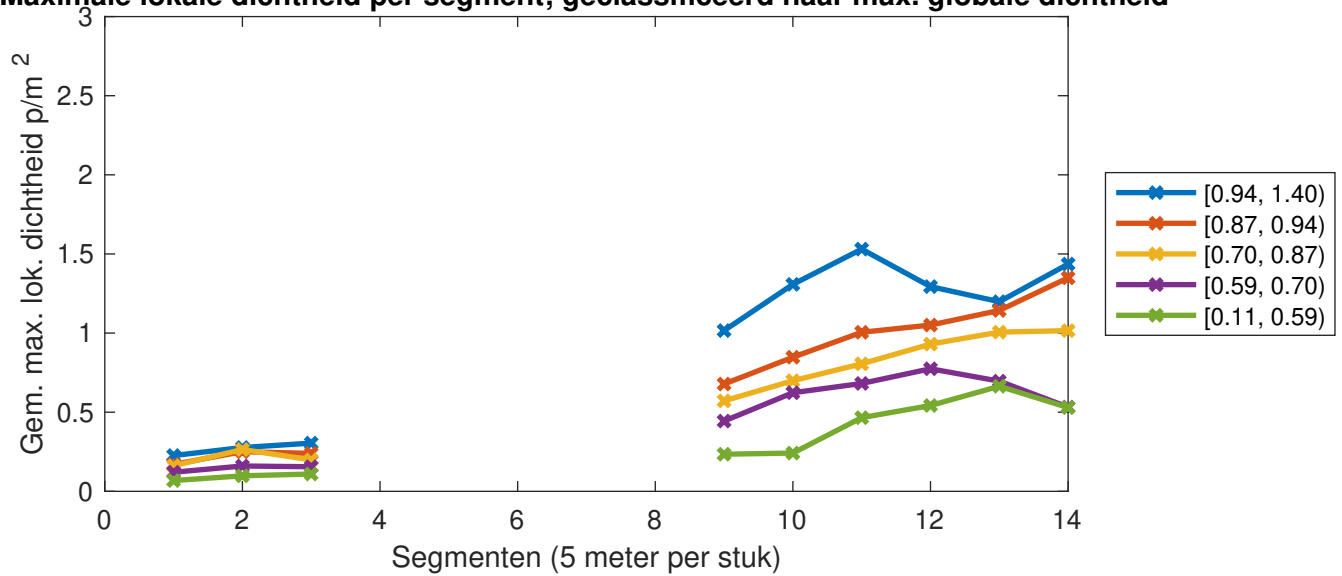
Histogram maximale globale dichtheid



Histogram maximale lokale dichtheid

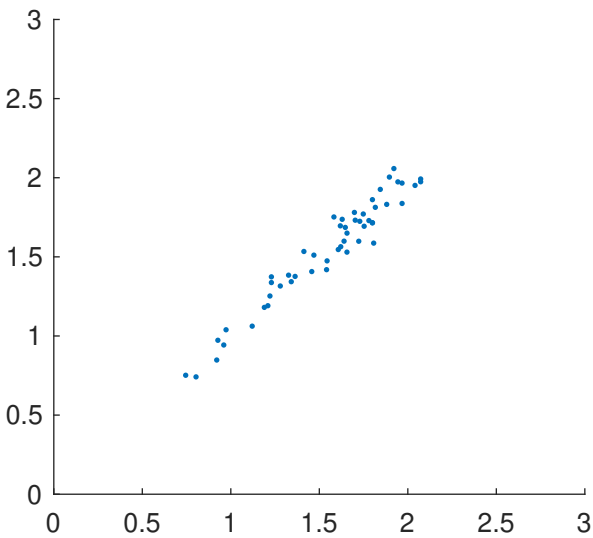
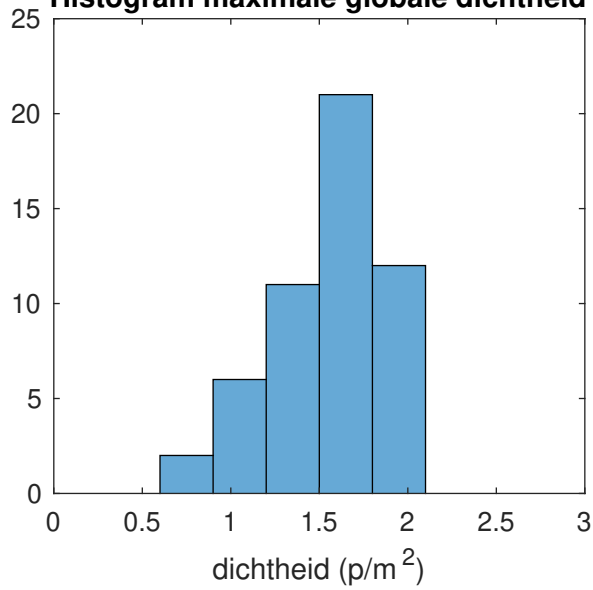


Maximale lokale dichtheid per segment; geclassificeerd naar max. globale dichtheid

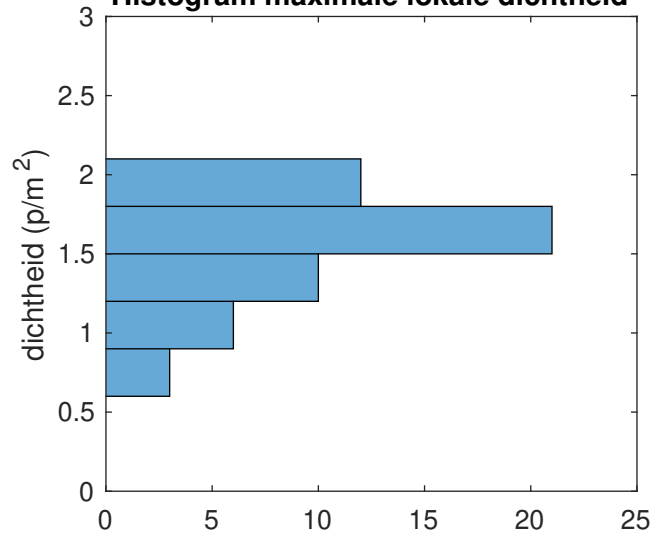


Bijlmer Arena s8

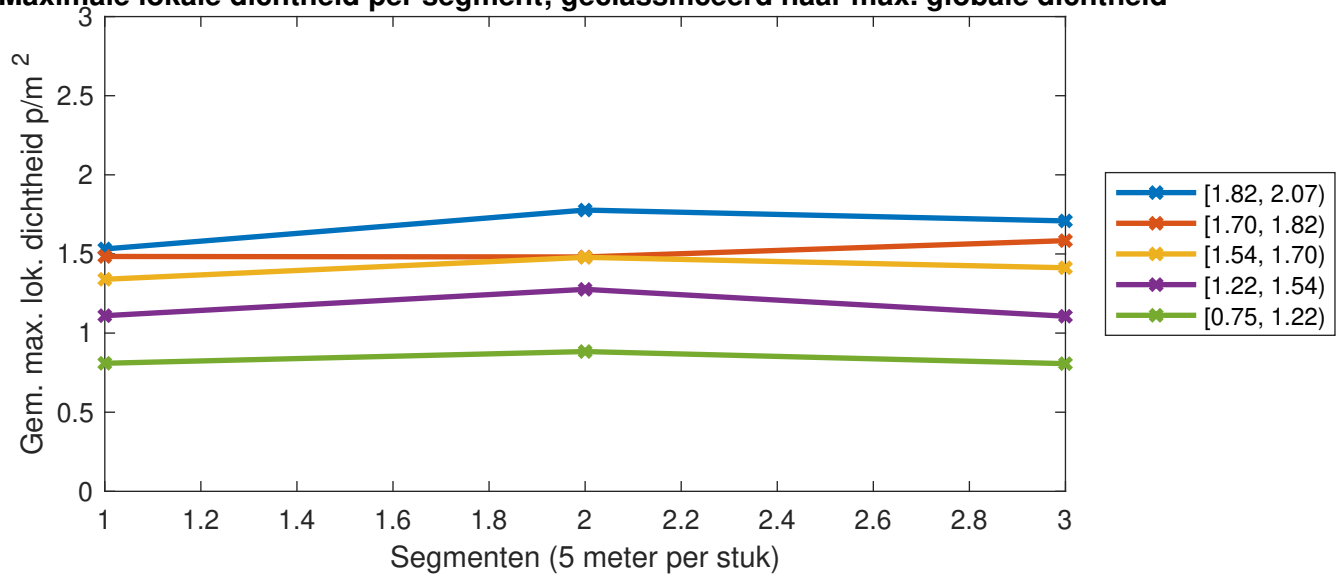
Histogram maximale globale dichtheid



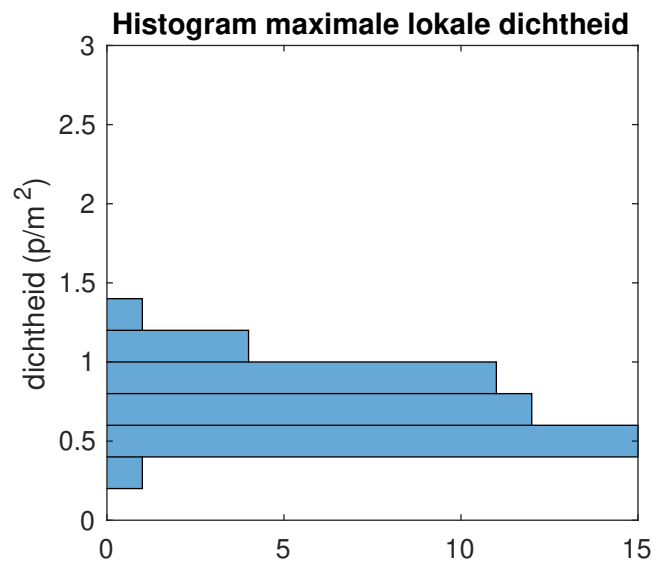
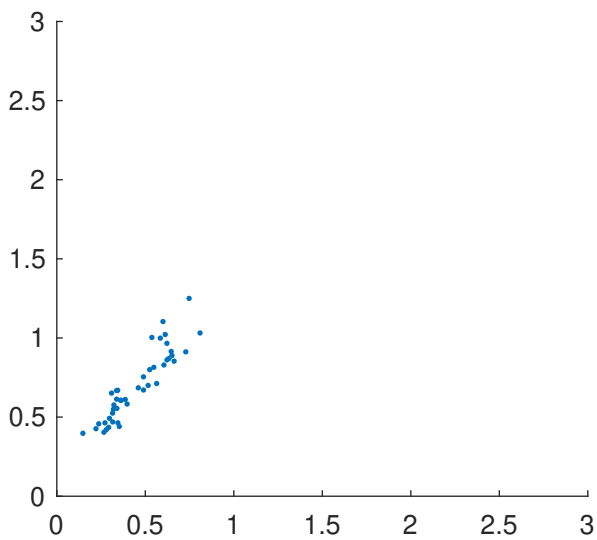
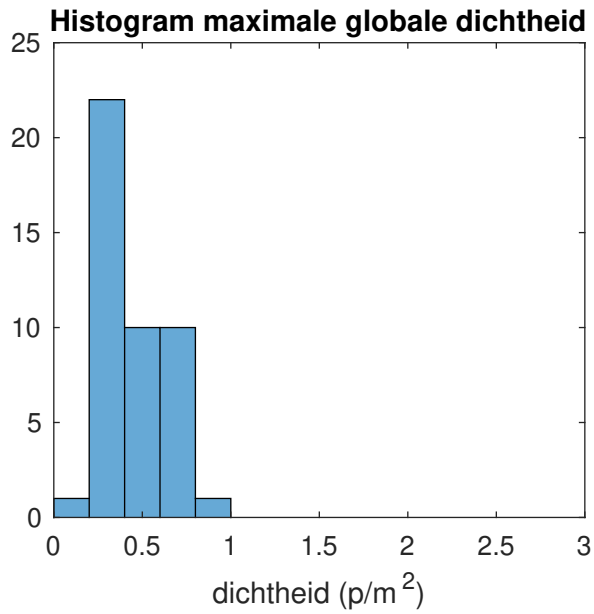
Histogram maximale lokale dichtheid



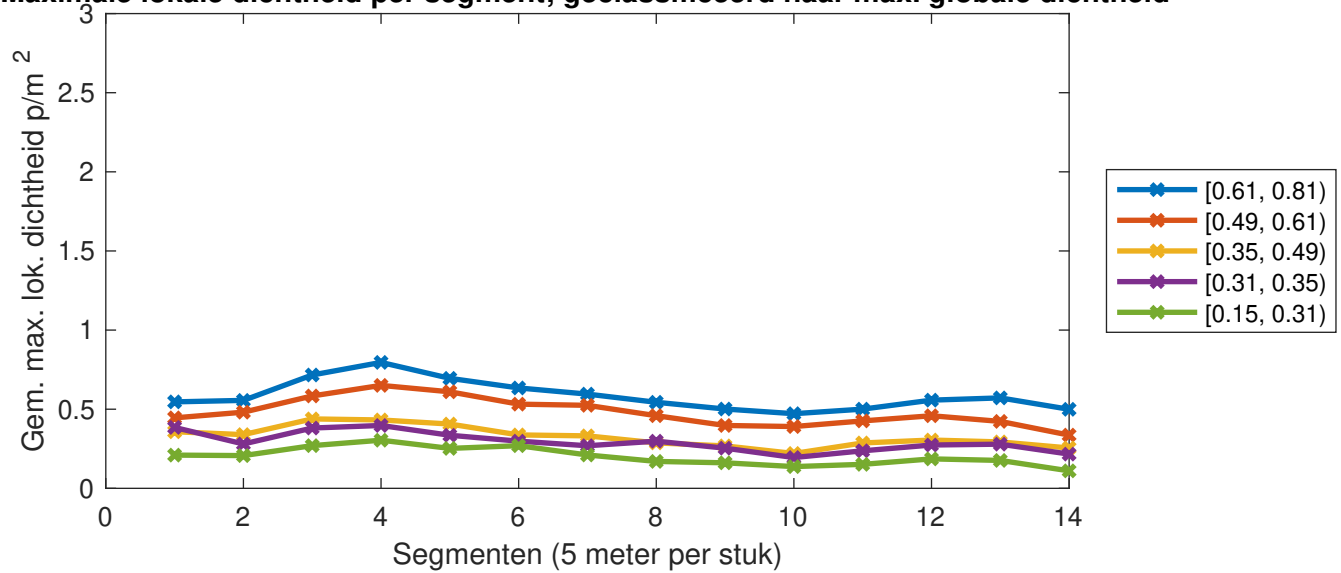
Maximale lokale dichtheid per segment; geclassificeerd naar max. globale dichtheid



Eindhoven s3

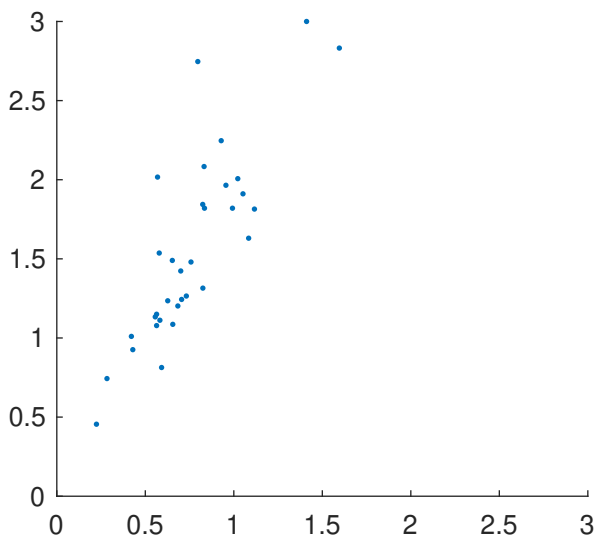
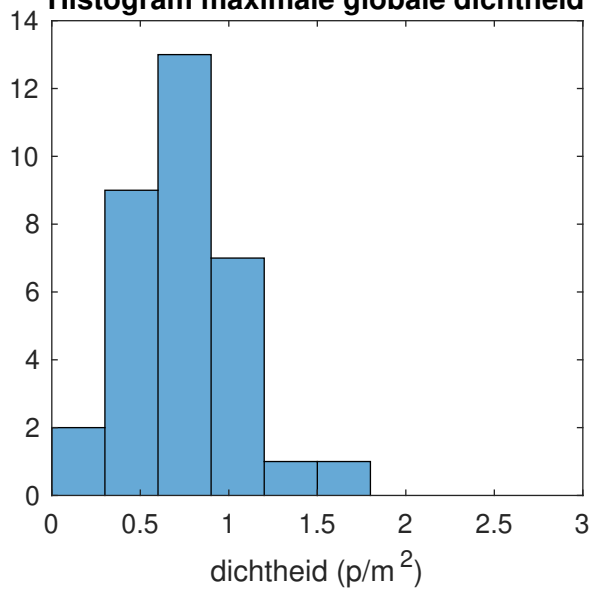


Maximale lokale dichtheid per segment; geclassificeerd naar max. globale dichtheid

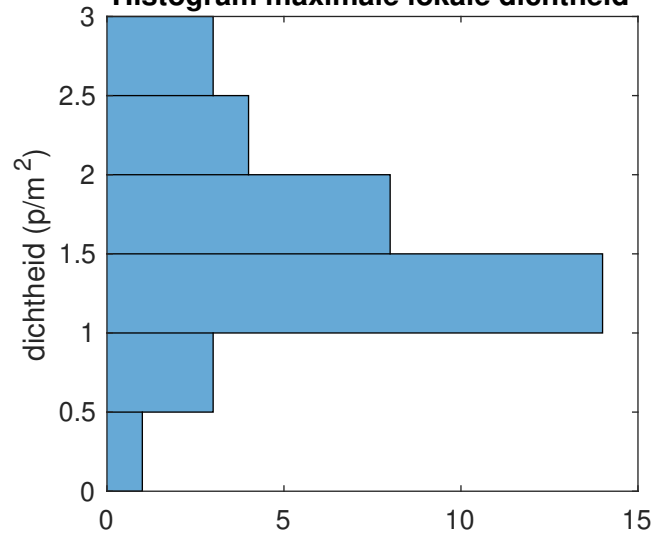


Eindhoven s4

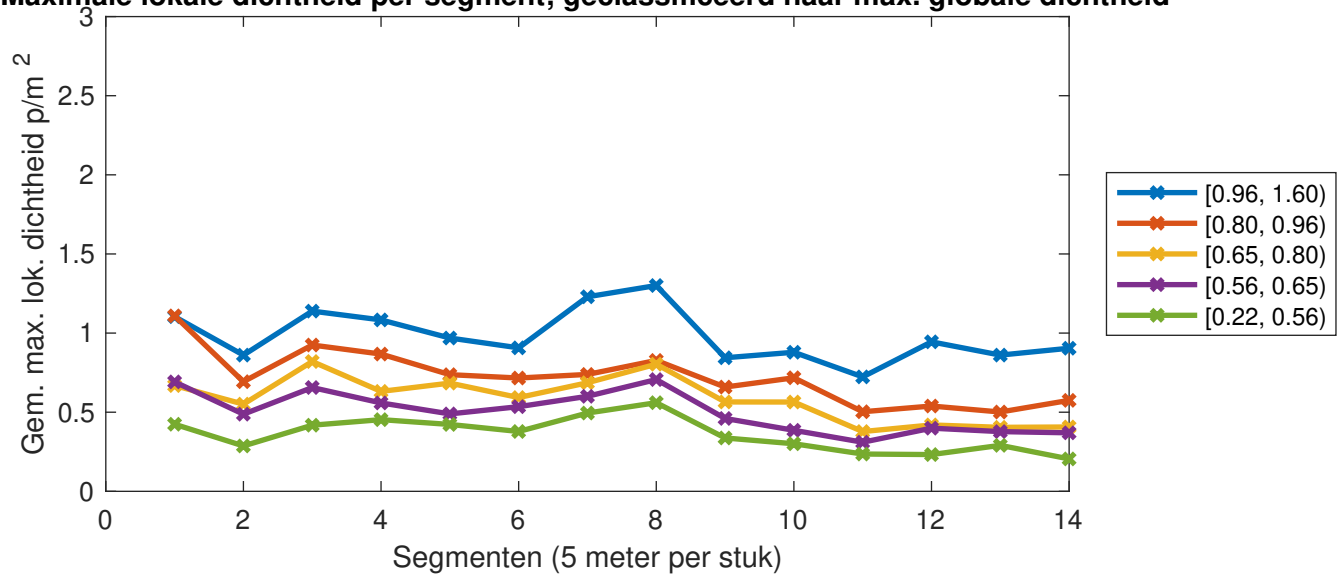
Histogram maximale globale dichtheid



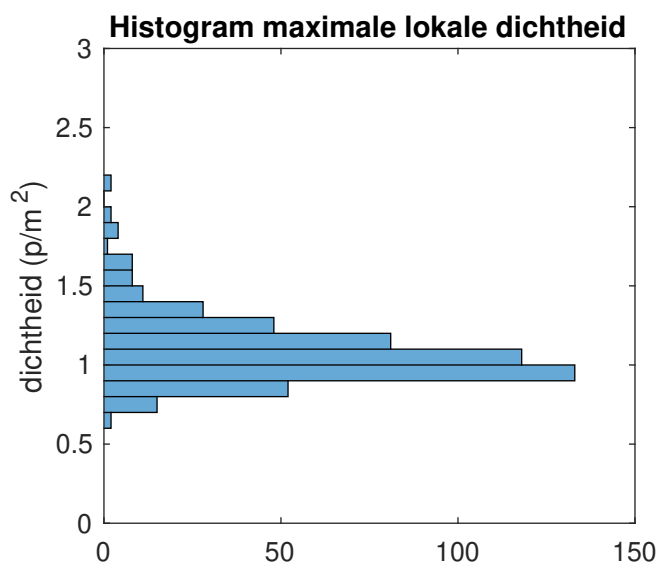
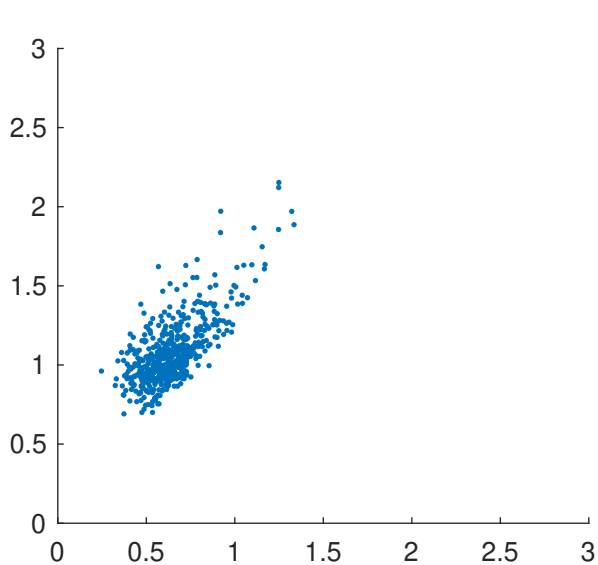
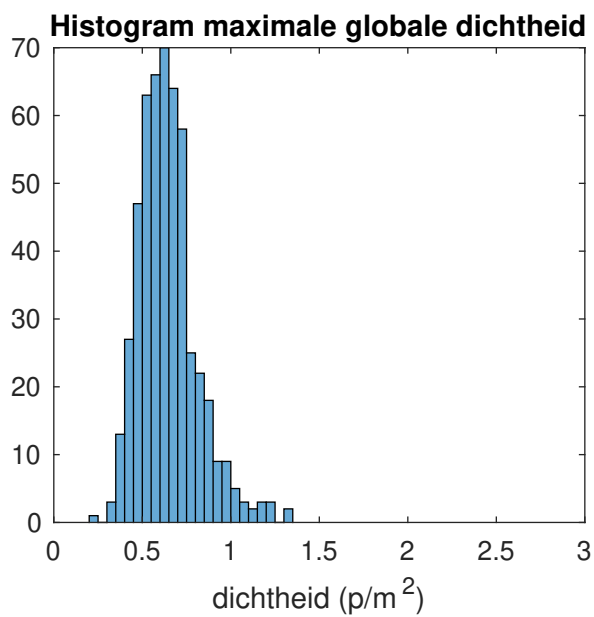
Histogram maximale lokale dichtheid



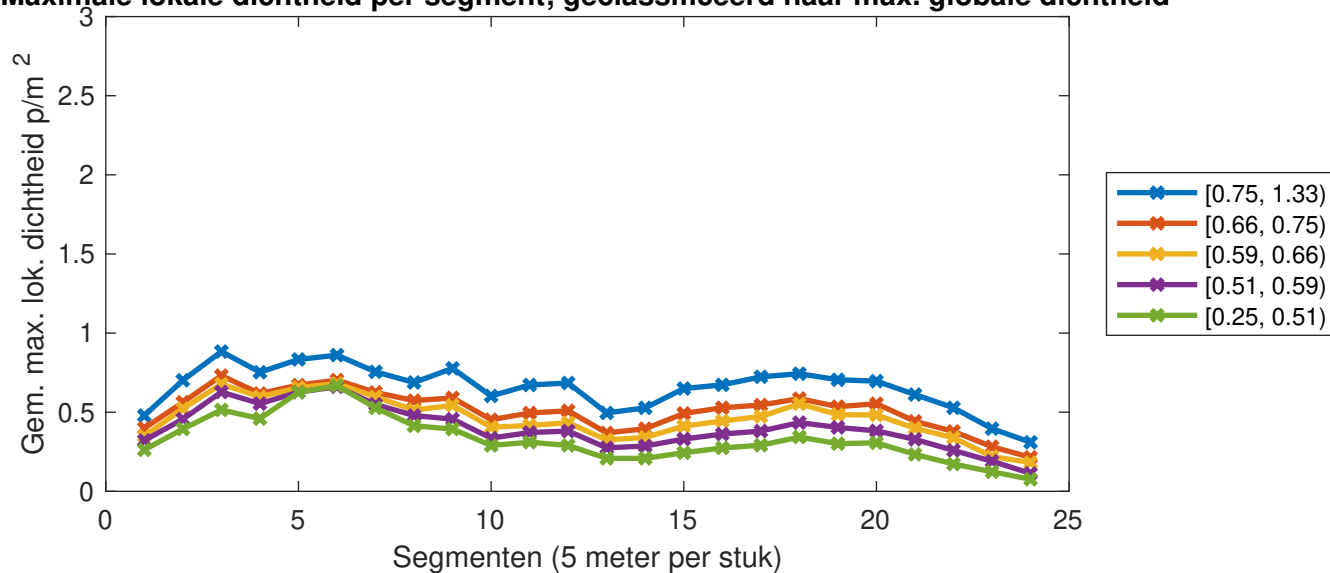
Maximale lokale dichtheid per segment; geclassificeerd naar max. globale dichtheid



Utrecht s5



Maximale lokale dichtheid per segment; geclassificeerd naar max. globale dichtheid



Bijlage 4: Simulatie - mogelijke incidenten bij hoge lokale dichtheden

Wanneer de globale dichtheid het kantelpunt overschrijdt kan de lokale dichtheid sterk oplopen. Dit gebeurt dan als een olievlek vanuit het punt waar reizigers het perron betreden. De lokale dichtheid stijgt dan veel sneller dan in domein II. Vanuit de loopstroomtheorie is bekend dat risico's toenemen bij hogere dichtheden. We onderzoeken in deze bijlage de hypothese dat kans op een domino-effect waarbij meerdere wachtende reizigers in spoorbak vallen kan optreden bij hogere dichtheden. De vraag is vanaf welke dichtheid een domino-effect kan ontstaan als er iemand 'in de menigte' wordt geduwd.

Wetenschappelijk onderzoek naar dit mechanisme is nog zeer beperkt. Feldmann & Adrian (2023)²⁰ bestuderen het domino-effect waarbij 5 personen in een rijtje staan. Deze studie geeft een eerste inzicht in hoe elementen als de onderlinge afstand en de kracht van de initiële duw beïnvloeden hoever de beweging zich door het rijtje verplaatst. Afhankelijk van de onderlinge afstand kan het bijvoorbeeld zo zijn dat alleen de eerste persoon in het rijtje, die de duw krijgt, moet bewegen om de duw op te vangen. Maar het kan ook zo zijn dat de duw zich door het hele rijtje verplaatst en dat ook de laatste persoon in het rijtje nog aanzienlijk moet verplaatsen om de duw op te vangen. In dit laatste geval is er dus sprake van een domino-effect.

Omdat de bovenstaande studie zich beperkt tot de 1-D situatie, één rijtje mensen, geeft deze studie helaas beperkt inzicht in het domino-effect dat plaats kan vinden op een vol perron. Hier is namelijk sprake van een 2-D situatie. Om meer inzicht te krijgen bij welke dichtheden op een perron er domino-effecten kunnen gaan optreden, hebben we een nieuw type voetgangersmodel ontwikkeld. In de rest van dit stuk wordt dit model in detail besproken en wordt de kalibratie van het model gepresenteerd. Verder wordt de simulatiestudie naar de afhankelijkheid van de dichtheid op het perron op het domino-effect en de resultaten beschreven. Dit geeft inzicht in de mogelijke incidenten bij hoge dichtheden.

²⁰ Feldmann, S., & Adrian, J. (2023). Forward propagation of a push through a row of people. *Safety science*, 164, 106173.

1. Het nieuwe voetgangersabsorptievermogen model

Het nieuwe voetgangersabsorptievermogen model is een microscopisch voetgangersmodel waarbij elke voetganger afzonderlijk wordt gemodelleerd. In het model worden de voetgangers als cirkels gemodelleerd. Het model gaat uit van wachtende voetgangers die stilstaan (i.e. zowel hun snelheid als acceleratie zijn 0) op hun wachtplek en alleen bewegen als je hiertoe gedwongen worden door fysiek contact.

Op elke voetganger werken twee krachten. Een duwkracht die bij fysiek contact de beweging van een voetganger overbrengt naar de andere voetganger. En een dempingskracht die de duwkracht tegen probeert te werken. Kortom, de dempingskracht wordt gebruikt om te modelleren dat een voetganger zal proberen op zijn/haar plek te blijven staan bij een duw en dus zal proberen de duw te absorberen door bijvoorbeeld een stapje te zetten; het zoeten "remmen". Het kan ook zo zijn dat een voetganger valt door de duw en geen stap kan zetten ter compensatie. In dit geval zal de dempingskracht juist bijdragen aan de duwkracht doordat er tijdens het vallen van de voetganger potentiële energie wordt omgezet in kinetische energie. Deze kinetische energie zal, wanneer de vallende voetganger tegen zijn/haar voorganger aanvalt, deels worden overgegeven naar de voorganger via het fysieke contact.

Het overbrengen van een kracht door fysiek contact tussen twee voetgangers wordt gemodelleerd op basis van inelastische botsingen. Dat wil zeggen de wet van behoud van moment geldt en dus dat het totale moment vóór de botsing gelijk is aan het totale moment na de botsing. Voor elke tijdsstap in het model worden zowel de duwkracht als de dempingskracht berekend en op basis van deze krachten worden de resulterende acceleraties, snelheden en verplaatsingen berekend.

Opgesomd, zijn dit zijn de belangrijkste eigenschappen van het model:

- > **Val-Impuls:** Elke reiziger krijgt een val-impuls wanneer hij geduwd wordt. Dit betekent dat potentiële energie wordt omgezet in kinetische energie door het vallen.
- > **Beperkte potentiële energie:** Iedere reiziger beschikt over een beperkte hoeveelheid potentiële energie. Dit begrenst de mate van de val-impuls die elke reiziger kan krijgen.
- > **Remmen:** Reizigers proberen te remmen om te stoppen. Echter, dit is alleen succesvol als er niemand direct voor hen staat, want dan kan er geen stap gezet worden
- > Afstand en contact:
 - > Bij minder dan 40 cm afstand tussen reizigers is er volledig contact.
 - > Boven de 40 cm afstand begint het contact lineair af te nemen.
 - > Bij 60 cm afstand is het contact nul.
- > **Zijdelings contact:** Wanneer er zijdelings contact is tussen reizigers, wordt de kracht aangepast zodat deze in de richting van de normaal (de loodlijn) tussen de reizigers werkt.

2. Technische specificatie van het model

Het model volgt een aantal stappen om de impact van een duw op de posities van wachtende voetgangers te modelleren. De stappen zijn uiteengezet in **Fout!**

Verwijzingsbron niet gevonden.. Zoals deze pseudocode laat zien wordt als eerste (regel 1) het model geïnitieerd waarbij een X aantal voetgangers in een bepaald wachtpatroon worden gezet en een voetganger één willekeurige voetganger een initiële snelheid krijgt toegewezen. Dit is de persoon die de beweging in de wachtende groep reizigers veroorzaakt.

Pseudocode 1: De pseudocode van het absorptiemodel

```
1 Initialize the model
2 For each timestep
3   For each pedestrian i
4     For each other pedestrian j
5       Compute distance  $d_{ij}$  (eq. 1)
6       If distance  $\leq$  physical distance
7         Compute relative speed  $\Delta v_{j \rightarrow i}$  (eq. 2)
8         If relative speed  $> 0$ 
9           Update push force of pedestrian j (eq. 3)
10          Update push force of pedestrian i (eq. 10)
11        Compute dampening force for pedestrian i (eq. 13)
12      End For
13    End For
14  For each pedestrian i
15    Compute the new acceleration of the pedestrian (eq. 18)
16    Compute the new velocity of the pedestrian (eq. 19)
17    Compute the new position of the pedestrian (eq. 20)
```

Vervolgens doorloopt het model een aantal tijdsstappen om te kunnen modeleren hoe deze initiële beweging van de voetganger zich gaat voortbewegen door de groep wachtende reiziger (dit zijn de regels 2 t/m 17). Als eerste wordt voor elke voetganger de duw- en dempingskracht berekend.

De duwkracht voor voetganger wordt berekend volgens regels 4 t/m 11). Voor elke voetganger j waar voetganger i fysiek contact mee heeft (regel 6) en waarbij de voetganger i naar voetganger j beweegt (regel 9) wordt de duwkracht bijgewerkt op basis van de interactie. Hierbij wordt de afstand tussen de twee voetganger berekend volgens vergelijking (1) en de relatieve snelheid tussen de twee voetgangers volgens vergelijking (2). Hierbij zijn $\mathbf{p}_i$ en $\mathbf{p}_j$ respectievelijk de posities van voetgangers i en j en is $\mathbf{v}_i$ de snelheidsvector van voetganger i.

$$d_{ij} = \|\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_i\| \quad (1)$$

$$\Delta v_{i \rightarrow j} = \frac{\mathbf{v}_i \cdot (\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_i)}{d_{ij}} \quad (2)$$

Wanneer voetganger i voetganger j duwt moet voor bij voetgangers de duwkracht bijgewerkt worden (regel 10). Voor voetganger j, de ontvanger van de duw, wordt dat

door middel van vergelijkingen 3 t/m 8 berekend. Vergelijking (3) laat zien dat de duwkracht op voetganger j de huidige duwkracht ($f_{push;j}$) is plus de duwkracht veroorzaakt door voetganger i ($f_{push;i \rightarrow j}$) plus f_{div} ; een divergente kracht tussen voetgangers als deze zeer dicht op elkaar staan.

$$f_{push;j} = f_{push;j} + f_{push;i \rightarrow j} - f_{div} \quad (3)$$

De duwkracht van voetganger i op voetganger j wordt berekend volgens vergelijkingen 4 t/m 8. Hier is m_j de massa van voetganger j, T_{coll} de duur van de duw en D_{phys} de fysieke afstand vanaf wanneer de duw, en daarmee de krachtoverdracht start.

$$f_{push;i \rightarrow j} = 0.5 * f_{push;i \rightarrow j} + 0.5 * \frac{f_{push;j \rightarrow i} \cdot (p_j - p_i)}{(p_j - p_i) \cdot (p_j - p_i)} * (p_j - p_i) \quad (4)$$

$$f_{push;i \rightarrow j} = \frac{m_j * (v_{ij} - v_j)}{T_{coll}} \quad (5)$$

$$v_{ij} = \frac{m_{i,eff} * v_i + m_{j,eff} * v_j}{m_{i,eff} + m_{j,eff}} \quad (6)$$

$$m_{j,eff} = \begin{cases} m_j & \text{if } d_{ij} < \frac{2}{4} * D_{phys} \\ m_j \left(1 + \left(3 - \frac{4}{D_{phys}} \right) * \left(d_{ij} - \frac{2}{4} * D_{phys} \right) \right) & \text{if } d_{ij} > \frac{2}{4} * D_{phys} \text{ AND } d_{ij} \leq \frac{3}{4} * D_{phys} \\ m_j \left(1 - \frac{4}{D_{phys}} * \left(d_{ij} - \frac{3}{4} * D_{phys} \right) \right) & \text{if } d_{ij} > \frac{3}{4} * D_{phys} \text{ AND } d_{ij} \leq D_{phys} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

$$m_{i,eff} = \begin{cases} m_i & \text{if } d_{ij} < \frac{2}{3} * D_{phys} \\ m_i \left(1 - \frac{3}{D_{phys}} * \left(d_{ij} - \frac{2}{3} * D_{phys} \right) \right) & \text{if } d_{ij} > \frac{2}{3} * D_{phys} \text{ AND } d_{ij} \leq D_{phys} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

f_{div} wordt vervolgens berekend volgens vergelijking (9) waar F_{div} een hoge divergerende kracht is en $D_{div;thres}$ de ondergrens in afstand is vanaf wanneer deze geldt.

$$f_{div} = \begin{cases} -F_{div} * (D_{div;thres} - d_{ij}) * \frac{(p_j - p_i)}{d_{ij}^2} & \text{if } d_{ij} < D_{div;thres} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

Wanneer voetganger i voetganger j duwt beïnvloedt dit ook de kracht die op voetganger i werkt dus ook deze kracht moet bijgewerkt worden (regel 11). Dit wordt gedaan door

middel van een vergelijkbare set vergelijkingen als de berekening van de kracht van i op j, vergelijkingen 10 t/m 12.

$$\mathbf{f}_{push;i} = \mathbf{f}_{push;i} + \mathbf{f}_{push;j \rightarrow i} + \mathbf{f}_{div} \quad (10)$$

$$\mathbf{f}_{push;j \rightarrow i} = 0.5 * \mathbf{f}_{push;j \rightarrow i} + 0.5 * \frac{\mathbf{f}_{push;j \rightarrow i} \cdot (\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_i)}{(\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_i) \cdot (\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_i)} * (\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_i) \quad (11)$$

$$\mathbf{f}_{push;j \rightarrow i} = \frac{m_{i,eff} * (\mathbf{v}_{ij} - \mathbf{v}_i)}{T_{coll}} \quad (12)$$

De dempingskracht wordt vervolgens ook voor iedere voetganger berekend (regel 12). Vergelijking (13) laat zien dat er voor de dempingskracht 5 verschillende domeinen worden geïdentificeerd. Het eerste domein is het geval waarbij de voetganger valt of aan het vallen is. In dit geval is de dempingskracht positief en draagt de dempingskracht bij aan de versnelling van de voetganger in plaats van de vertraging. In het tweede geval remt de voetganger met een constante remkracht nadat deze in een val is geweest. In het derde geval staat hij na een val bijna stil en neemt de remkracht ook langzaam af (om 'doorschieten' te voorkomen). In het vierde geval is er nog geen val geweest en is een natuurlijk rembeweging.

Ten slotte, wanneer de voetganger niet in beweging is zal de dempingskracht 0 zijn.

$$\mathbf{f}_{damp;i} = \begin{cases} F_{fall} * \mathbf{n}_i & \text{if } v_i > v_{fall} \text{ AND } p_{fall,i} > F_{fall} * \Delta t \\ -F_{break} * \mathbf{n}_i & \text{if } Y=1 \text{ AND } v_i > 0.1 \\ -F_{break} * \mathbf{v}_i & \text{if } Y=1 \text{ AND } v_i \leq 0.1 \\ -0.1 * F_{break} * \mathbf{v}_i & \text{if } Y=0 \text{ AND } v_i > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

$$y = \begin{cases} 1 & \text{if } v_i > 0 \text{ AND } t_{push,i} > T_{push,max} \text{ AND } (d_{front} > 0.4 \text{ OR } t_{push,i} > 0.2) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

$$v_i = \|\mathbf{v}_i\| \quad (15)$$

$$\mathbf{n}_i = \frac{\mathbf{v}_i}{\|\mathbf{v}_i\|} \quad (16)$$

$$t_{push,i}(t) = t_{push,i}(t-1) + \Delta t \quad (17)$$

Hierbij is $p_{fall,i}$ de resterende impuls van de val van een reiziger. Bij de initialisatie krijgt iedere reiziger een potentiële "val-impuls". Na iedere tijdstap neemt de valimpuls af, en de reiziger stopt met vallen als de impuls leeg is. Met deze formule neemt de impuls iedere stap af:

$$p_{fall,i} = p_{fall,i} - F_{fall} * \Delta t \quad (18)$$

Wanneer de krachten voor alle voetgangers zijn berekend kan voor elke voetganger de acceleratie ($\mathbf{a}_i(t)$), de snelheidsvector ($\mathbf{v}_i(t)$) en de nieuwe positie ($\mathbf{p}_i(t)$) worden berekend.

$$a_i(t) = \frac{f_{push;i}(t) + f_{damp;i}(t)}{m_i} \quad (19)$$

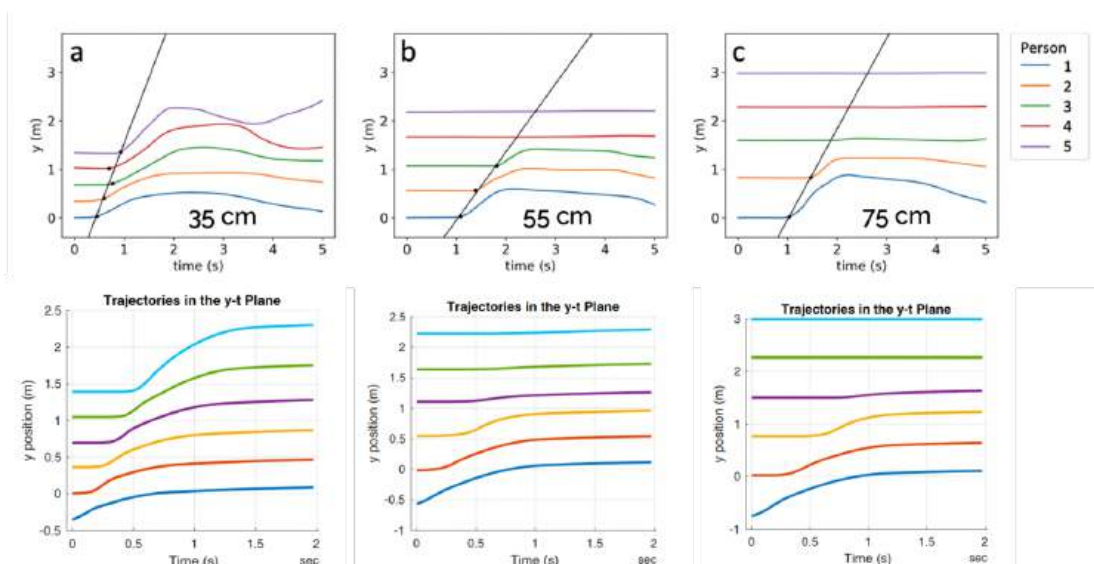
$$v_i(t) = v_i(t-1) + a_i(t) * \Delta t \quad (20)$$

$$p_i(t) = p_i(t-1) + v_i(t) * \Delta t \quad (21)$$

3. Kalibratie

Het model bevat meerdere parameters en om de waarde van deze parameters te bepalen in het model gekalibreerd. Deze kalibratie is uitgevoerd op basis van de data die verzameld is in Feldmann & Adrian (2020) en vrij beschikbaar is op de Pedestrian Data Archive²¹. Tijdens de kalibratie zijn, net als in de experimenten, vijf personen op een rijtje gezet met een bepaalde afstand tussen de mensen. Vervolgens zijn simulaties gedraaid met verschillende parameter sets en zijn de resultaten van de simulaties vergeleken met de resultaten van de experimenten.

Figuur 15 geeft de resultaten weer van zowel de experimenten (bovenste drie grafieken) voor 3 verschillende interpersonele afstanden [Figuur uit Feldmann & Adrian (2020)] als van de simulatie voor de best passende parameter set (onderste drie grafieken). Deze grafieken laten zien dat het nieuwe model de resultaten van de experimenten goed kan reproduceren wat vertrouwen geeft in de opzet van het model. Bij de kalibratiesimulatie staat de eerste persoon op y positie = 0. De blauwe lijn daaronder is het gesimuleerde stootblok.

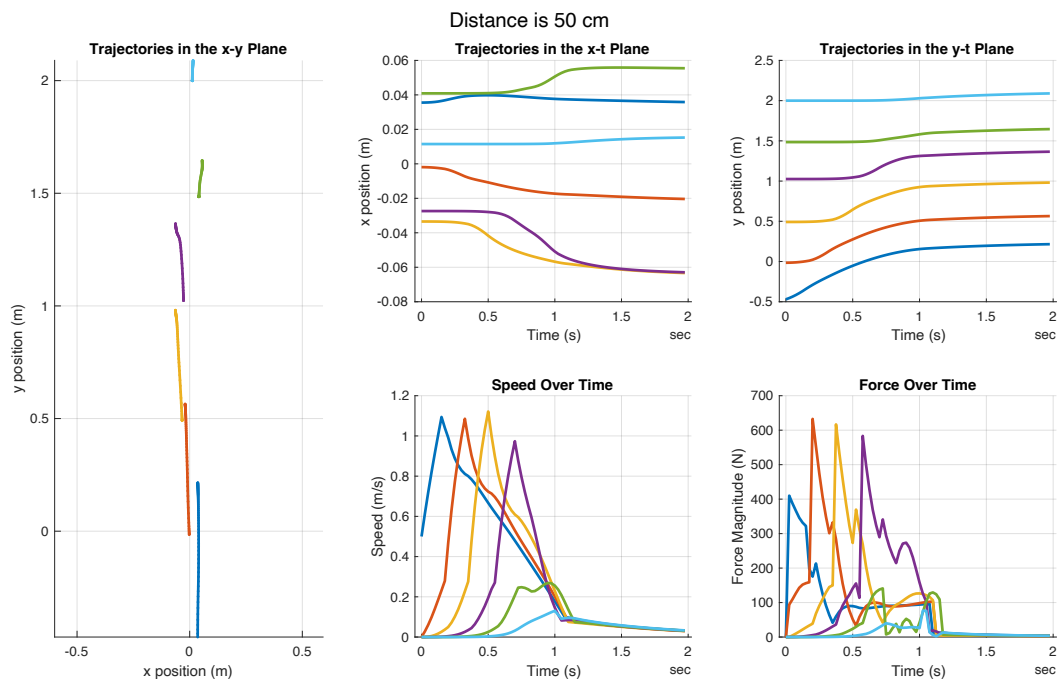


Figuur 14: De resultaten van de modelkalibratie

²¹ http://ped.fz-juelich.de/da/2022pushing_five_people

Zowel in de herhaalde experimenten als in de simulatie zien we grote verschillen tussen iedere uitvoer. Stochasticiteit en gedrag leiden soms tot een domino-effect en soms niet. Een reiziger moet met voldoende 'energie' geduwd worden om zelf ook te vallen. Het wel of kunnen zetten van een stap speelt daarbij ook een rol. Met name bij de afstand van 55 cm zijn grote verschillen zichtbaar.

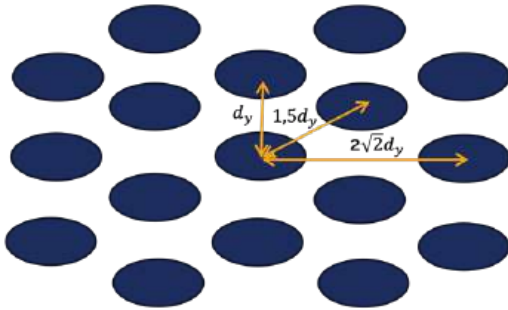
Tenslotte, om tot de kalibratie te komen is per simulatie een analysetool met meer informatie. De figuur hieronder is daar een voorbeeld van.



Figuur 15 Voorbeeld analysetool per simulatie

4. Simulatiestudie en de resultaten

Op basis van het gekalibreerde model is een simulatiestudie uitgevoerd om te onderzoeken hoe het absorptievermogen van een groep wachtende reizigers op het perron afhangt van de dichtheid, en wat voor incidenten er dan kunnen ontstaan. Er is een perronsegment van 5x3,5 meter gesimuleerd waar reizigers in een versprongen wachtpatroon staan te wachten tot aan de perronrand. Figuur 17 geeft dit patroon weer en geeft ook de onderlinge hart-op-hart afstanden tussen de reizigers als functie van de laterale afstand tussen twee voetgangers (d_y).



Figuur 16: Het versprongen wachtpatroon waarin reizigers staan te wachten met de onderlinge afstanden aangegeven als functie van de laterale afstand tussen twee voetgangers (d_y)

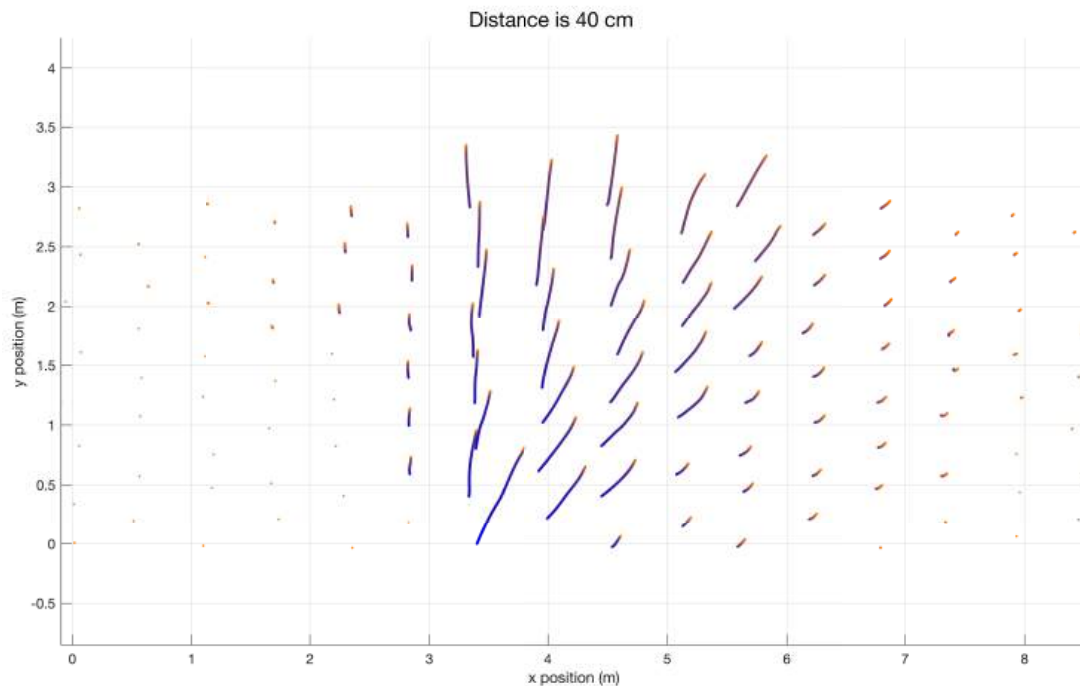
Om te testen hoe de dichtheid invloed heeft op het absorptievermogen worden verschillende scenario's getest waarbij de afstand d_y wordt gevarieerd. Onderstaande tabel geeft de verschillende geteste waarden weer. Verder wordt de positie van alle voetgangers bij het initialiseren van het scenario licht verschoven op een willekeurige manier. Dit zorgt voor een variatie in de wachtpatronen. Bij het beginnen van de simulatie krijgt de voetganger die achteraan en in het midden (ten opzichte van de lengte richting van het perron) een snelheid van 1,5 m/s in een schuine richting van de perronrand toegewezen.

Vervolgens start de simulatie en modelleert het model hoe de verstoring, veroorzaakt door deze voetganger, zich door de wachtende mensenmassa beweegt. Vanwege de smalle willekeurige verplaatsing moeten er meerdere simulaties gedraaid worden voor ieder scenario. We gaan er steeds vanuit dat de voorste reizigers op korte afstand van de perronrand staan, in de gevarenzone. Als deze reizigers vallen komen ze in de spoorbak terecht.

Tabel 6 Gesimuleerde waarden van d_y en d_x

d_y	d_x	oppervlakte
0,3	0,42	7,86
0,35	0,49	5,77
0,4	0,57	4,42
0,45	0,64	3,49
0,5	0,71	2,83
0,55	0,78	2,34
0,6	0,85	1,96
0,65	0,92	1,67
0,7	0,99	1,44
0,75	1,06	1,26
0,8	1,13	1,10
0,48	0,68	3,07

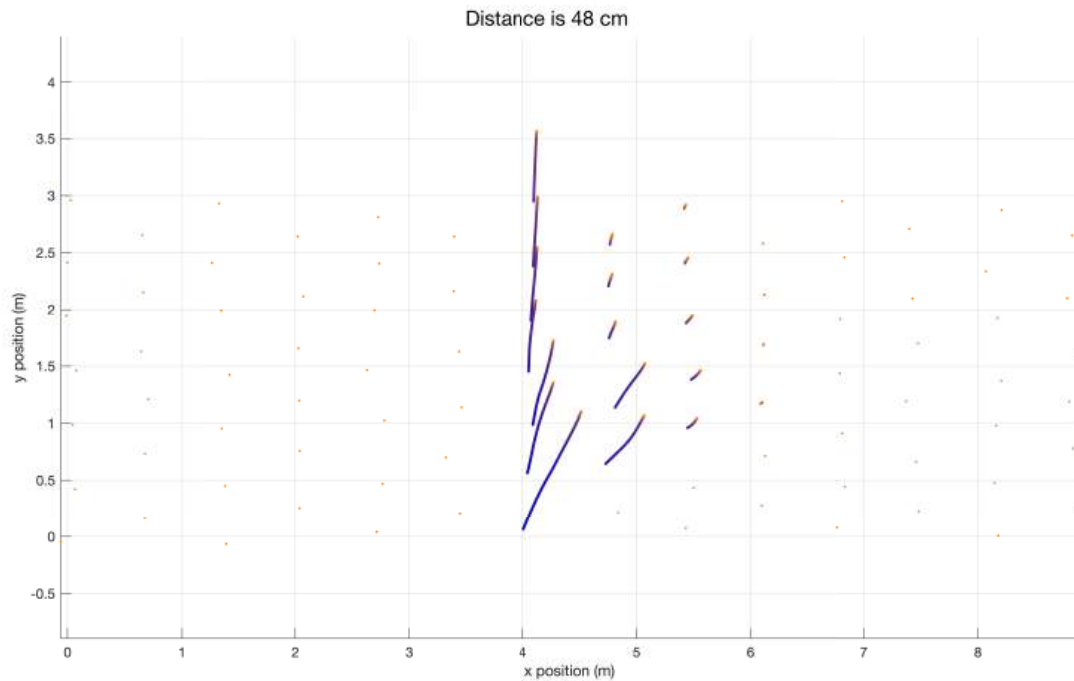
Voor ieder van bovenstaande dichtheden zijn modelruns beschikbaar. De afstand van 48 centimeter is toegevoegd omdat deze met een dichtheid van ongeveer 3 p/m² overeen komt. Van bovenstaande dikgedrukte simulaties willen we aantal runs doornemen.



Figuur 17 Resultaten modelrun met $dx = 40$ cm en dichtheid 4,42 p/m²

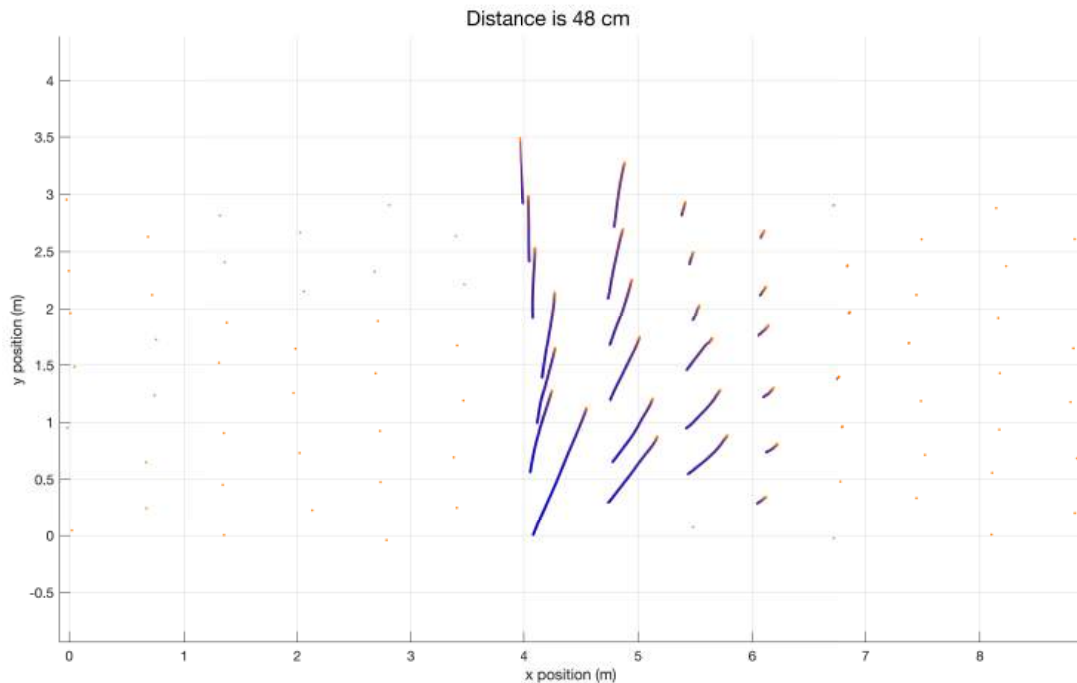
Om te beginnen bovenstaande run waar de dichtheid 4,42 p/m² is. Er is duidelijk sprake van een domino-effect. Uiteindelijk kunnen 5 reizigers in de spoorbak terecht komen. Ook bij herhaalde runs treedt het domino-effect bijna altijd op. Een lokale dichtheid van 4,42 p/m² leidt in potentie dus tot een groot incident.

Nu rijst de vraag bij welke dichtheid het domino-effect met enige zekerheid optreedt. We zien dat bij een dichtheid van 2,8 p/m² er geen domino-effect optreedt waarbij meerdere mensen in de spoorbak vallen. Meestal valt 1 persoon (degene die 'voor in het rijtje' van de geduwde persoon staat) in de spoorbak, zoals hieronder in het figuur van 48cm (de dichtheid is ruim 3 p/m²). Dit zien we ook steeds terug bij lagere dichtheden. Reden hiervoor is dat de snelheid van de initiële botsing in de simulatie vrij hoog is (hoger dan die in de kalibratie); de reiziger loopt met 1,5 m/s, valt en accelereert dan tot net boven de 2 m/s voor de botsing.



Figuur 18 Resultaten modelrun met $dx = 48$ en dichtheid $> 3 \text{ p/m}^2$ (voorbeeld 1)

Wanneer de dichtheid boven de 3 p/m^2 komt zien we dat bijna altijd minimaal 1 persoon in de spoorbak valt en dat het domino-effect ook regelmatig optreedt. In figuur 19 en 20 worden twee voorbeelden van zulke simulaties getoond. In beide voorbeelden is tevens duidelijk te zien dat de energie zich verspreid en de val dempt wanneer deze zijwaarts gaat.



Figuur 19 Resultaten modelrun met $dx = 48$ en dichtheid $> 3p/m^2$ (voorbeeld 2)

Op grond van deze resultaten concluderen we dat bij een lokale dichtheid onder de $3 p/m^2$ geen domino-effect optreedt en dat bij een dichtheid hoger dan $4,5 p/m^2$ altijd een domino-effect optreedt. Daartussen neemt kans op een domino-effect met geleidelijke schaal toe. Bij lagere dichtheden is het wel mogelijk dat 1 persoon in de spoorbak valt, omdat 'een rijtje' reizigers valt. Dit valt onder het domein II risico.

Kanttekening bij deze simulatieresultaten is dat we 1 specifiek scenario uitgewerkt hebben. Er is een val ruim 3,5 meter van de perronrand; reizigers wachten in een specifiek patroon; de val is onder een specifieke hoek. Echter, het doel van de simulatie – aantonen hoe incidenten kunnen voorkomen bij hoge lokale dichtheden – is behaald.

5. Conclusies

Variatie in Scenario's

Er is aanzienlijke variatie waargenomen tussen verschillende simulaties. In sommige gevallen treedt er een domino-effect op, terwijl in andere gevallen dit effect uitblijft. Dit duidt op de aanwezigheid van specifieke omstandigheden die het optreden van het domino-effect beïnvloeden.

Kantelpunt-incident

Uit de analyse blijkt dat er een kritieke omstandigheden bestaan waarbij opeenvolgende valpartijen niet meer effectief geabsorbeerd kunnen worden. Na dit punt is de kans op een opeenvolging van valpartijen aanzienlijk groter, wat wijst op een systematische kwetsbaarheid onder bepaalde condities. Bij een lokale dichtheid boven de $4,5 \text{ p/m}^2$ is de kans op een kantelpunt-incident als gevolg van een ongelukkige val 100%. Onder 3 p/m^2 zal er niet meer dan 1 reiziger in de spoorbak vallen. In het bereik daartussen neemt de kans met een geleidelijke schaal toe.

Risico's bij lagere Dichtheden

In situaties met lagere dichtheden is er een risico dat vooral de voorste reiziger in de spoorbak kan vallen. Dit type incident valt onder de categorie van 'domein II' risico's, wat wijst op een ander soort gevaar dat afhankelijk is van de positie van individuen binnen een menigte.

Invloed van zijwaartse krachtverdeling

De verdeling van krachten in zijwaartse richting binnen een groep heeft een aanzienlijk dempend effect op de kettingreactie van vallen.

Bijlage 5: Rekenmethode

In deze bijlage beschrijven we hoe de natuurlijke wachtdichtheid berekend wordt en hoe een overschrijding van het kantelpunt hieruit kan worden afgeleid. Het kantelpunt op een perron wordt bereikt wanneer het totaal aantal personen op een perron (N_{perron}) maal de correctiefactor (f) groter is dan de effectief bruikbare perronoppervlakte (O_{eff}) maal een dichtheid van 2 personen per vierkante meter.

$$N_{perron} * f > O_{eff} * 2$$

De effectief bruikbare perronoppervlakte is het gedeelte van het perron waar de reizigers redelijkerwijs kunnen en zullen wachten. Dit is gegeven de fysieke infrastructuur van het perron (locatie stijgpunten, faciliteiten en obstakels) en de lengte en halteerlocatie van de volgende te halteren trein. De correctiefactor wordt gebruikt om te corrigeren voor eventuele grote bagage (koffers, kinderwagens, fietsen) die reizigers bij zich hebben die ervoor zorgt dat een enkele reiziger meer ruimte dan gemiddeld inneemt.

In de volgende twee secties wordt in detail uitgelegd hoe de correctiefactor en het effectief bruikbare perronoppervlakte worden bepaald.

1. Correctiefactor

Bij het bepalen van de natuurlijke wachtdichtheid van 2 personen per vierkante meter is uitgegaan van reizigers zonder significante bagage. Een handtas, rugzak of werktas valt niet onder de significante bagage en hoeft niet los te worden meegenomen.²² Wanneer er verwacht wordt dat een significant deel van de reizigers reiskoffers of grotere backpacks bij zich heeft zal de gemiddelde ruimte die een reiziger inneemt op een perron groter zijn.

Reizigers met een middelgrote bagage (middelgrote rugzak of koffer) zijn grofweg 1,5 keer zo diep als normaal en nemen, bij aanname dat de ellips ook 1,5 zo diep is, 1,5 keer zo veel ruimte in. Reizigers met een grote koffer of grote backpack nemen ongeveer 2 keer zoveel ruimte in.

Wanneer we stellen dat f_M de fractie reizigers is met middelgrote bagage en f_G de fractie reizigers is met een grote bagage, dan wordt de correctiefactor f als volgt bepaald:

²² Bij het bepalen van de natuurlijke wachtdichtheid zijn deze reizigers al meegenomen.

$$f = (1 - f_M - f_G) + 1,5f_M + 2f_G$$

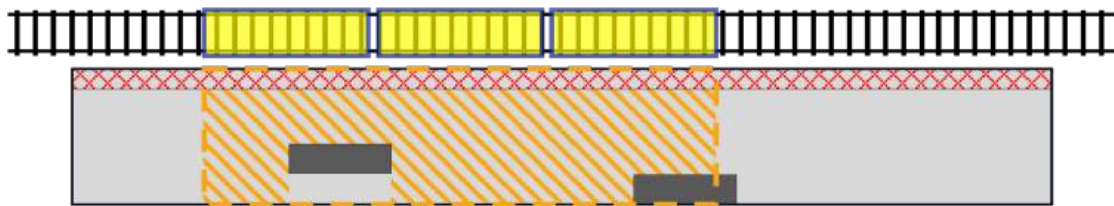
2. Berekening effectief bruikbare oppervlakte en kantelpunt

De effectief bruikbare perronoppervlakte (vanaf nu de effectieve perronoppervlakte genoemd) omvat alle stukken perron waar reizigers voor een trein wachten. Hierbij wordt de gevarenzone niet meegerekend aangezien dit geen oppervlakte is waar reizigers zouden moeten wachten en worden de oppervlaktes die obstakels innemen, ook als dit bijvoorbeeld bankjes zijn, niet meegenomen. Ook wordt verwacht dat reizigers niet achter obstakels zullen wachten. De effectieve perronoppervlakte, en daarmee het kantelpunt, wordt voor eilandperrons en zijperrons verschillend bepaald en berekend. Voor beide types perron wordt dit door middel van een voorbeeld uitgelegd.

Zijperron

Figuur 20 geeft een zijperron weer. De halteringspositie van de eerstvolgende trein is ook weergegeven, de obstakels zijn weergegeven (in het donkergrijs) en de gevarenzone langs de rand van het perron is in het rood met kruizen gemarkeerd.

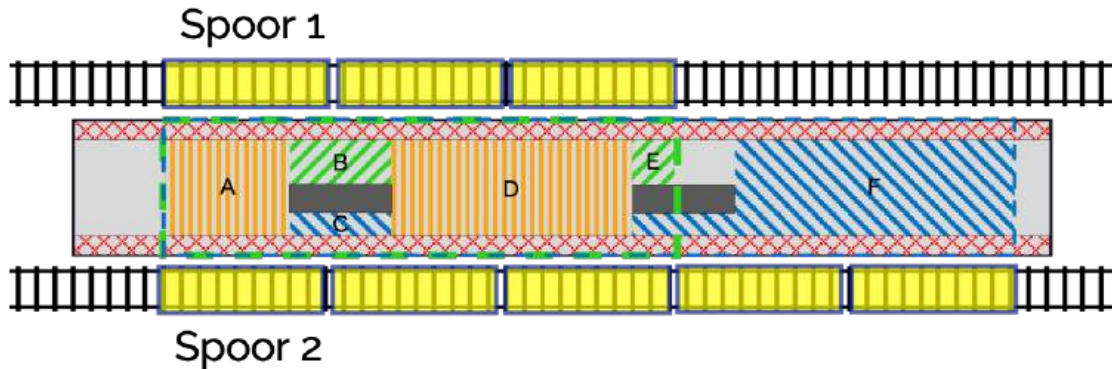
De totale perronoppervlakte die wordt beschouwd is gemarkeerd door de oranje rechthoek. Op basis van het ontwerp van het perron en de halteringslocatie van de volgende trein is dit het gebied waarvan redelijkerwijs verwacht kan worden dat de bulk van de reizigers zal wachten. Het diagonaal oranje gestreepte gebied is de effectieve perronoppervlakte die reizigers zullen gebruiken. Dit is dus de oppervlakte zonder de gevarenzone, de obstakels en ruimte achter de obstakels.



Figuur 20: Voorbeeld van de berekening van de effectieve perronoppervlakte van een zijperron

Eilandperron

Figuur 21 geeft een eilandperron weer en wederom zijn de verschillende onderdelen, de halteringsposities van de eerstvolgende treinen per spoor, de obstakels en de gevarenzone weergegeven. Ook de totale perronoppervlaktes die per spoor worden beschouwd zijn gemarkeerd. Voor spoor 1 is dit gebied gemarkeerd door de groene rechthoek en voor spoor 2 door de blauwe rechthoek. Deze twee rechthoeken overlappen wat betekent dat er delen van het perron zijn die door zowel reizigers voor spoor 1 als 2 gebruikt kunnen en zullen worden.



Figuur 21: Voorbeeld van de berekening van de effectieve perronoppervlakte van een eilandperron

Om de het kantelpunt te bepalen en de effectieve perronoppervlaktes moet het perron verdeeld worden in 3 effectieve perronoppervlaktes:

1. O_1 : De perronoppervlakte die alleen door reizigers voor de trein op spoor 1 zal worden gebruikt.

$$O_1 = O_B + O_E$$

2. O_2 : De perronoppervlakte die alleen door reizigers voor de trein op spoor 2 zal worden gebruikt.

$$O_2 = O_C + O_F$$

3. O_g : De perronoppervlakte die door gedeeld is en door alle reizigers zal worden gebruikt.

$$O_g = O_A + O_D$$

Het kantelpunt wordt bepaald op basis van het vereiste dat er voor beide sporen genoeg oppervlak is voor de reizigers gegeven dat sommige oppervlaktes gedeeld worden. De twee vergelijkingen hieronder geven dit weer.

De eerste vergelijking stelt dat het aantal reizigers voor de trein op spoor 1 ($N_1 * f_1$) kleiner of gelijk moet zijn aan de natuurlijke wachtdichtheid (2) maal de som van de effectieve perronoppervlakte voor spoor 1 (O_1) en de gedeelde effectieve perronoppervlakte (O_g). De tweede vergelijking stelt hetzelfde maar dan voor reizigers voor spoor 2. De derde vergelijking stelt tenslotte dat ook het totaal aantal reizigers van spoor 1 en 2 bij elkaar kleiner of gelijk moet zijn dan de totaal effectieve perron oppervlakte.

$$N_1 * f_1 \leq 2(O_1 + O_g)$$

$$N_2 * f_2 \leq 2(O_2 + O_g)$$

$$N_1 * f_1 + N_2 * f_2 \leq 2(O_1 + O_2 + O_g)$$

Wanneer voor 1 of meer van de 3 vergelijkingen geldt dat het beschikbare oppervlakte te klein is, is het kantelpunt op het perron bereikt.

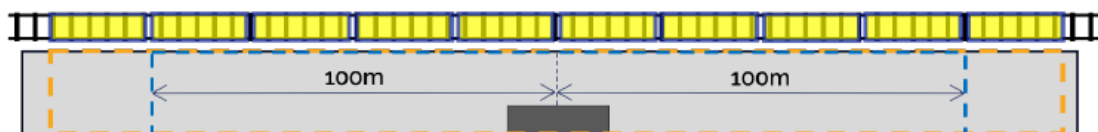
Onzekerheden en aannames

Bij het bepalen van de effectieve oppervlakte wordt ervan uitgegaan dat reizigers zich bij drukte goed verspreiden over de beschikbare oppervlakte van het perron over de gehele lengte van de trein. In Bijlage 3 wordt dit afgeleid op basis van data en observaties. Het is mogelijk dat op specifieke perrons het effectieve oppervlak kleiner of groter is. Het is niet exact bekend hoe het ontwerp van het perron het wachtproces precies beïnvloed. Zo kunnen obstakels op het perron de doorgang blokkeren waardoor de ruimte 'achter' de obstakels niet beschikbaar bereikbaar is. Bij lange treinen wordt niet de gehele halteerlengte van de trein benut. En de informatievoorziening kan reizigers sturen.

Nergens zal de spreiding ideaal zijn en dat zou betekenen dat het aantal mensen dat op het perron past volgens de definitie van het kantelpunt een overschatting is. Echter wordt er ook aangenomen dat geen enkele reiziger zich buiten de effectieve oppervlakte bevindt (dus ook niet in de gevarenzone, een kiosk of wachtruimte) of achter een obstakel wacht. Deze beide aannames kunnen juist weer leiden tot een onderschatting van het aantal mensen dat op het perron past volgens de kantelpunt definitie. Zodoende nemen we aan dat de effecten van deze aannames elkaar opheffen.

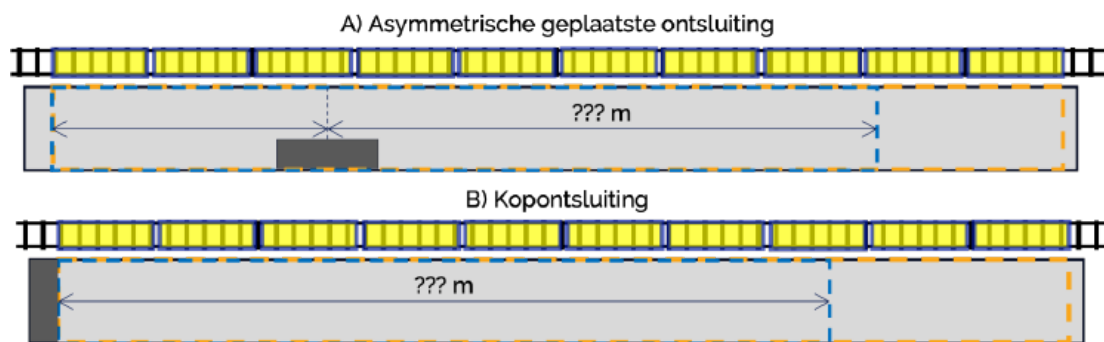
Er zijn echter ook redenen waarom bij bepaalde combinaties van een perronontwerp en een treinlengte er verwacht kan worden dat de spreiding ver van het ideale zal liggen. Zo is bijvoorbeeld de ervaring dat bij lange treinen (bijvoorbeeld een VIRM 10 van +/- 250 meter lang) en een perron met een enkele centrale ontsluiting, er beduidend minder reizigers wachten ter hoogte van de eerste en laatste bak. Om te compenseren voor deze bekende suboptimale spreiding moet de lengte van de totale perronoppervlakte, dat wordt meegenomen in de kantelpunt berekening, ingekort worden.

Figuur 20 geeft deze situatie weer waarbij de donkergrijze rechthoek in het midden onderaan het perron de perronopgang weergeeft. Wanneer van een optimale spreiding uit wordt gegaan, markeert de oranje rechthoek de totale perronoppervlakte. Echter vanwege de lengte van de trein en de centraal gelegen perronopgang wordt het gebied ingekort tot een lengte van maximaal 100 meter vanaf het centrale stijgpunt. De blauwe rechthoek is het gebied dat de te gebruiken totale perronoppervlakte markeert gegeven de observatie dat er suboptimale spreiding is.



Figuur 22: Voorbeeld aanpassing totale perronoppervlakte vanwege verwachte suboptimale spreiding

Kortom, bij de bepaling van de totale perronoppervlakte moet er een inschatting worden gemaakt, per perron en lengte van de te halteren trein, in hoeverre de aanname van ideale spreiding realistisch is. Wanneer deze als niet realistisch wordt beschouwd, moet het gebied van de totale perronoppervlakte ingekort worden om te compenseren voor de niet ideale verdeling. Voor de combinatie van een perron met een centrale opgang en lange halterende trein adviseren we het gebied in te korten tot maximaal 100 meter per kant vanaf de opgang. Bij meerdere, voldoende gebruikte entrees, kan dan 100 meter per kant van de opgang worden gebruikt. Voor andere combinaties van een lange trein en bijvoorbeeld een kopontsluiting of bijvoorbeeld een enkele asymmetrisch geplaatste ontsluiting (zie figuur 24 voor een voorbeeld) zal verder onderzoek moeten uitwijzen onder welke omstandigheden de perronoppervlakte ingekort moet worden en met welke lengte. Voor een kopontsluiting vermoeden we op basis van expert judgement dat tussen de 150m en 200m van het perron gebruikt kan worden.



Figuur 23: Voorbeelden van een perron met een lange halterende trein en een asymmetrisch geplaatste ontsluiting (A) of een kopontsluiting (B)

Het kan ook voorkomen dat reizigers zich niet goed spreiden over de breedte van een perron. Denk hierbij aan zeer brede (breder dan 5 meter) zijperrons of de gedeelde gebieden op bredere eilandperrons. Op dit moment kan er op basis van de beschikbare kennis geen vuistregel worden gegeven wanneer de perronoppervlakte 'versmald' moet worden. Voor elk perron moet dus een inschatting worden gemaakt of de aanname dat de gehele breedte van het perron goed gebruikt wordt bij grote drukte aannemelijk is. En zo niet, in hoeverre de perronoppervlakte versmald moet worden.

3. Rekenvoorbeelden

Op basis van de plattegronden vanuit het risicomodel v2 zijn hieronder 3 voorbeelden gegeven van hoe het kantelpunt berekend wordt voor verschillende soorten perrons.

Zijperron (Rotterdam Alexander spoor 1)

Station Rotterdam Alexander bevat twee zijperrons (zie figuur 25 waarbij in dit rekenvoorbeeld gekeken wordt naar het perron voor spoor 1. Dit is een zijperron met een breedte van +/- 4 meter en heeft geen significante obstakels. Voor dit rekenvoorbeeld

gaan we er vanuit dat alleen de hoofdentree wordt gebruikt en dit dus nagenoeg een kopontsluiting heeft.²³ Figuur 24 geeft de plattegrond van het perron weer. Hierbij is het perron opgedeeld in segmenten van 25 meter. Het getal bovenaan geeft het segmentnummer weer en het getal boven de groene lijn geeft de halteringslocatie weer van een trein op basis van het aantal delen van de trein. Verder is voor elk segment de oppervlakte (inclusief gevarenzone maar exclusief obstakels; voor de berekening halen we hier de gevarenzone dus nog af) weergegeven en de fractie van de overzijde van het perron dat bereikbaar is (dit is alleen relevant voor eilandperrons). Op basis van de data kan het kantelpunt voor het perron berekend worden voor verschillende lengtes van de te halteren treinen.



Figuur 24: Plattegrond van station Rotterdam Alexander

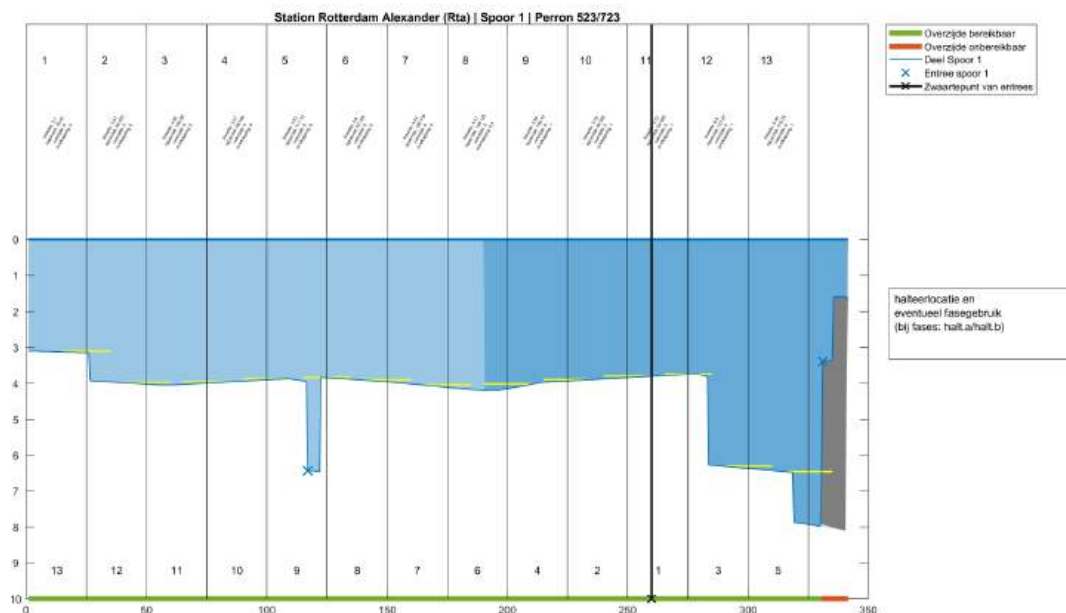
Op basis van de dienstregeling van 2024 zijn 3 verschillende scenario's gecreëerd voor het rekenvoorbeeld. Namelijk, ICM's met 3 verschillende lengtes die hier regelmatig stoppen. Verder is een correctiefactor van 1 aangenomen en dat maximaal 200 meter van het perron wordt gebruikt. Die 200 meter is een zeer optimistische aanname voor de spreiding die we gebruiken omdat we voor kopontsluitingen nog niet weten wat het daadwerkelijke bruikbare perrondeel is (we vermoeden dat dit 175 meter is, als gemiddelde tussen de 150m en 200m). In de tabel hieronder is voor alle drie scenario's de effectieve oppervlakte zonder correctie weergegeven, de gecorrigeerde effectieve oppervlakte waarbij rekening is gehouden met een maximale lengte van 200 meter en het aantal reizigers wat er op het perron past voordat er een kantelpunt optreedt.

Tabel 7 Effectieve oppervlakten Rotterdam Alexander

	Treinlengte [# delen]	Effectieve oppervlakte [m²]	Eff. oppervlakte gecorrigeerd [m²]	Kantelpunt [# reizigers]
A	3	269,1	269,1	538
B	7	664,4	664,4	1329
C	11	992,0	741,8	1484

Uit dit rekenvoorbeeld komt duidelijk naar voren dat de berekening van het kantelpunt voor een zijperron triviaal is wanneer de oppervlaktes bekend zijn. Merk op dat door de aangenomen maximum gebruikte perronlengte van 200 meter deze schatting helemaal aan de bovenkant zit.

²³ Wanneer er meerdere stijgpunten zijn, zal de spreiding van de reizigers beter zijn, en zal het kantelpunt pas later worden bereikt. Hierbij geldt dan natuurlijk wel dat de treinlengte voldoende moet zijn.



Figuur 25: Overzicht perron spoor 1 van station Rotterdam Alexander met de oppervlaktes per perron segment (let op, deze plattegrond is gespiegeld ten opzichte van de plattegrond in figuur 25)

Smal eilandperron (Raalte spoor 1/2)

Station Raalte (figuur 27) bestaat uit een enkel smal eilandperron met een kopopgang, een totale breedte van +-3,90 meter met twee grote obstakels op het midden van het perron in de vorm vanabri's en een kleiner obstakel. Figuur 27 geeft de plattegrond van het perron weer.



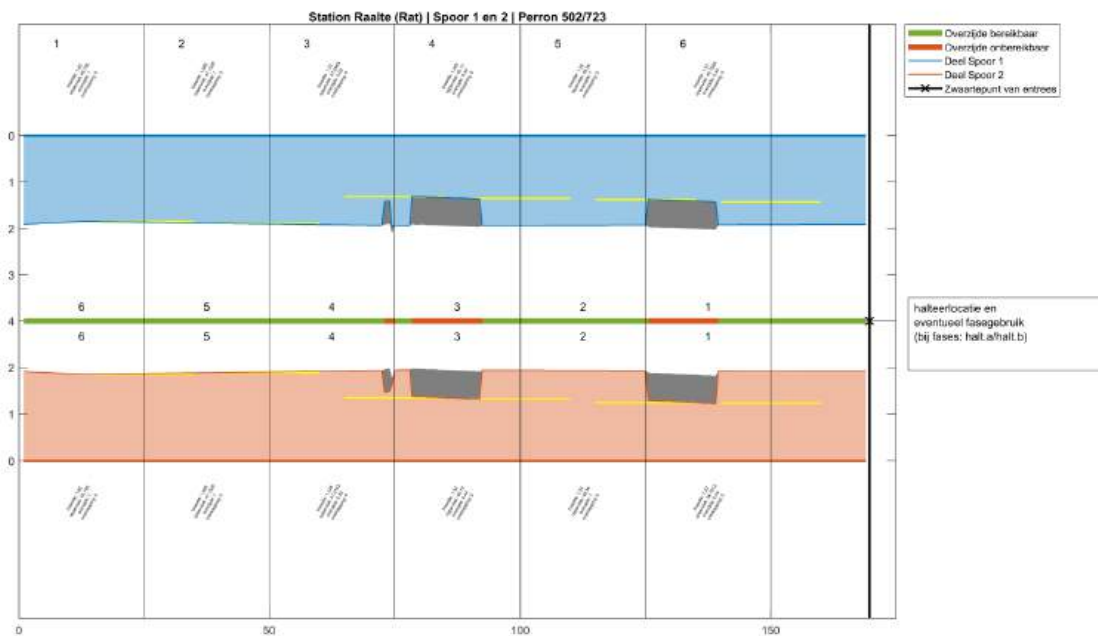
Figuur 26: Plattegrond van station Raalte

Binnen de huidige dienstregeling (2024) stoppen hier de FLIRT sprinters van Keolis die afhankelijk van een het aantal bakken uit 3, 4 of 6 delen bestaan. Voor dit rekenvoorbeeld worden twee scenario's uitgewerkt, namelijk een scenario met twee treinen van gelijke lengte die halteren en een scenario waarbij de lengtes ongelijk zijn. Ook hier is gekozen om een correctiefactor gelijk aan 1 te gebruiken.

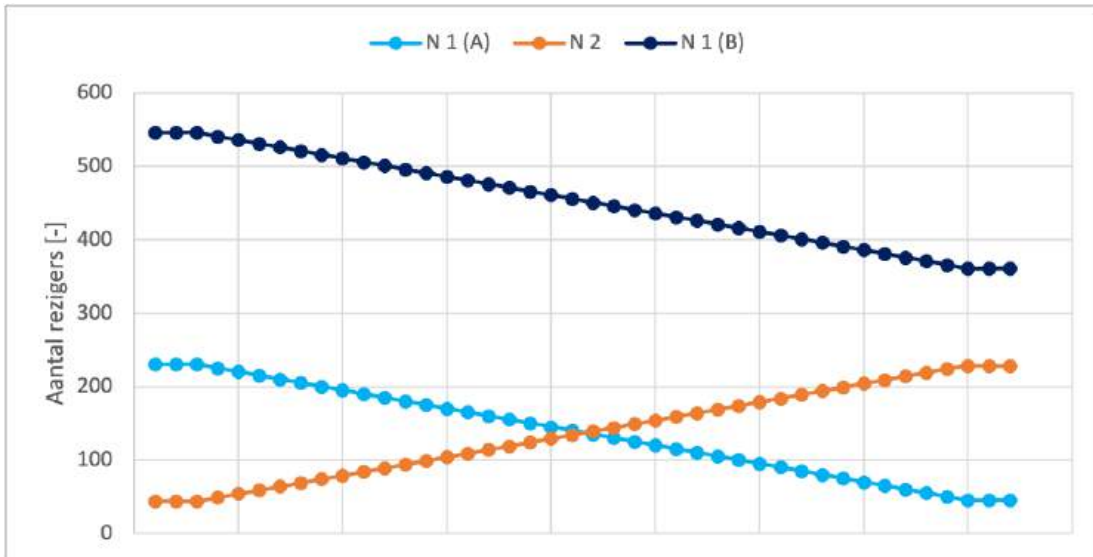
Tabel 8 Effectieve oppervlakten Raalte

	Treinlengte [# delen]		Effectieve oppervlakte [m²]		
	Spoor 1	Spoor 2	Spoor 1	Spoor 2	Gedeeld
A	3	3	22,9	21,8	91,8
B	6	3	181,0	21,8	91,8

In tegenstelling tot het vorige voorbeeld, is het bij een eilandperron, waar aan beide kanten treinen halteren, het geval dat er meerdere combinaties van het aantal reizigers voor spoor 1 en 2 mogelijk zijn. Dit vanwege de gedeelde ruimte. In figuur 29 zijn drie lijnen te zien. De lichtblauwe lijn (N 1 (A)) geeft het maximaal aantal reizigers voor spoor 1 weer dat op het perron past in scenario A. Dit is gegeven het maximaal aantal reizigers voor spoor 2 dat op het perron passen (de oranje lijn (N 2)). Voor scenario B geeft de combinatie van de donkerblauwe lijn (N 1(B)) en de oranje lijn weer hoeveel reizigers per spoor zich maximaal op het perron kunnen bevinden.



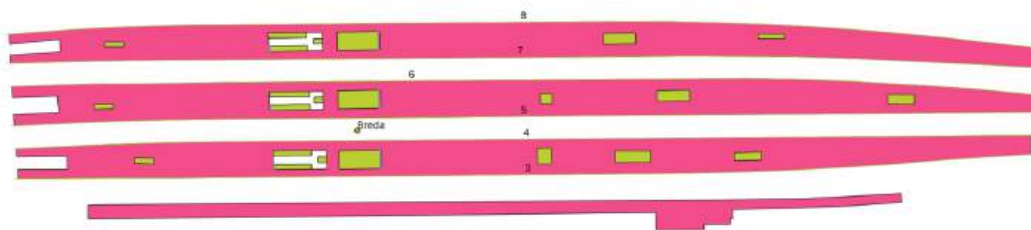
Figuur 27: Overzicht perron spoor 1&2 van station Raalte met de oppervlaktes per spoor en perron segment. (hier wordt oppervlakte van de gevarenzone dus nog afgetrokken)



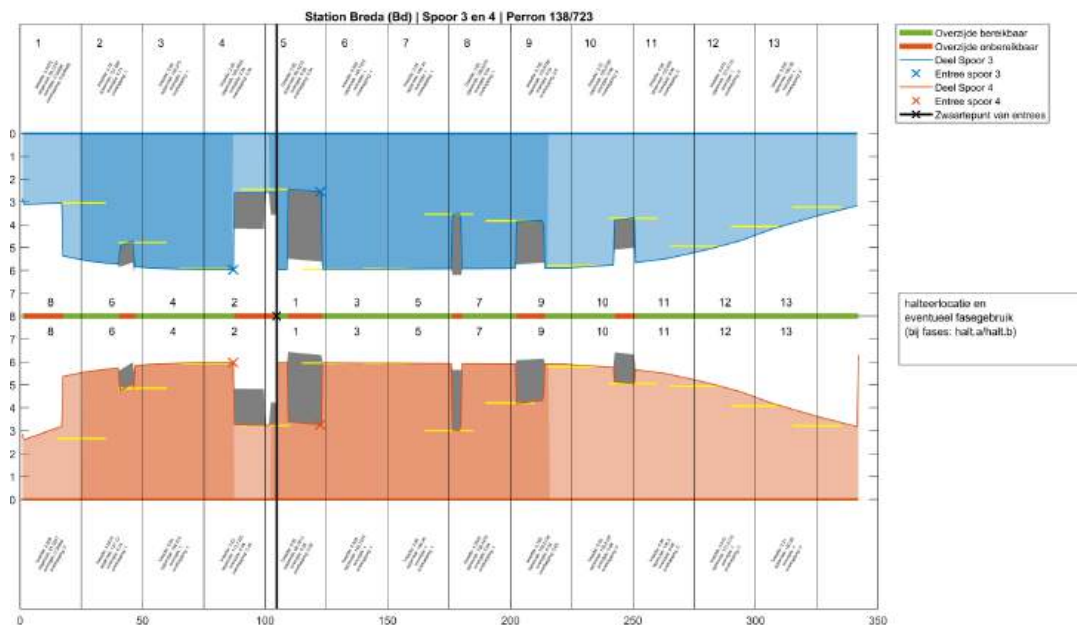
Figuur 28: De combinatie van het maximaal aantal reizigers voor spoor 1 (N 1) en 2 (N 2) dat op het perron van station Raalte past voordat het kantelpunt optreedt per scenario. De x-as representeert hier de mix tussen wachtters voor spoor 1 en 2; helemaal links wachten alle reizigers voor de trein op spoor 1; helemaal rechts iedereen voor spoor 2; in het midden is het 50-50.

Breed eilandperron (Breda spoor 3/4)

Voor station Breda is gekozen om het perron voor spoor 3&4 te gebruiken al rekenvoorbeeld. Dit is een breed eilandperron met een opgang vanuit een tunnel, een totale breedte van +/-12 meter met meerdere obstakels op het midden van het perron. Figuur 30 geeft de plattegrond van het perron weer.



Figuur 29: Plattegrond van station Breda



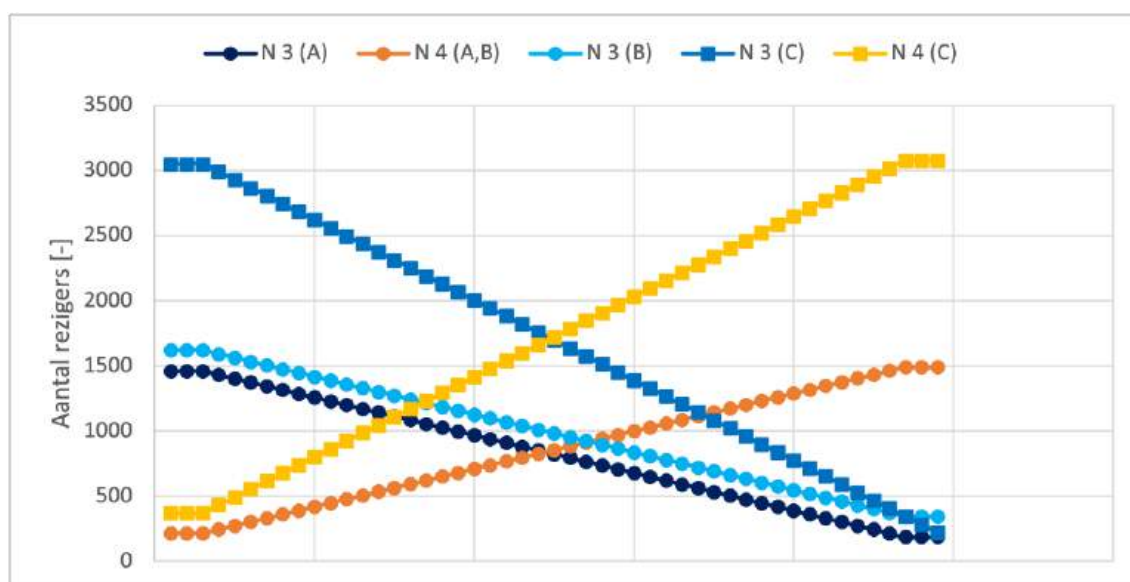
Figuur 30: Overzicht perron spoor 3&4 van station Breda met de oppervlaktes per spoor en perron segment (wederom inclusief gevarenszone, die nog wordt afgetrokken)

Voor dit rekenvoorbeeld worden drie scenario's uitgewerkt, namelijk een scenario met twee treinen van gelijke lengte die halteren en twee scenario's waarbij de lengtes ongelijk zijn. Hieronder zijn deze drie scenario's te vinden inclusief de effectieve oppervlakte zonder correctie end de gecorrigeerde effectieve oppervlakte waarbij rekening is gehouden met een maximale lengte van 200 meter. Ook hier wordt een correctiefactor van 1 gebruikt.

Tabel 9 Effectieve oppervlakten Breda

	Treinlengte [# delen]		Effectieve oppervlakte [m ²]			Gecorrigeerde effectieve oppervlakte [m ²]		
	Spoor 3	Spoor 4	Gedeeld	Spoor 3	Spoor 4	Gedeeld	Spoor 3	Spoor 4
A	4	4	637,7	92,9	107,8	637,7	92,9	107,8
B	4	9	637,7	219,6	107,8	637,7	171,8	107,8
C	8	9	1353,3	219,6	184,8	1353,3	171,8	184,8

Wederom is het kantelpunt per scenario niet uit te drukken in een enkel getal maar in een tweetal lijnen die samen het maximaal aantal reizigers per spoor op het perron weergeven. In figuur 32 zijn deze lijnen te vinden per scenario.



Figuur 31: De combinatie van het maximaal aantal reizigers voor spoor 3 (N 3) en 4 (N 4) dat op het perron van station Breda past voordat het kantelpunt optreedt per scenario (A-C). De x-as representeert hier de mix tussen wachtters voor spoor 3 en 4; helemaal links wachten alle reizigers voor de trein op spoor 3; helemaal rechts iedereen voor spoor 4; in het midden is het 50-50.

Bijlage 6: Relatie tot de huidige normen en richtlijnen

ProRail heeft een aantal beleidsdocumenten waarin normen en richtlijnen zijn opgenomen wat betreft de veiligheid van reizigers op perrons in relatie tot de drukte. De vraag is, hoe relateren deze normen en richtlijnen zich tot de definitie van het kantelpunt?

We behandelen een drietal documenten:

- Richtlijn Functionele Kwaliteit en Maatvoering Transfer (**RLN00135**) [review versie 230602]
- Beleidsdocument Structurele drukte (**BSD**) [Versie 0.99 230325]
- Toetsing en aanscherping methodiek NPI Transferdrukke (**NPI**) [060822]

In de rest van dit stuk worden de afkortingen, hierboven dikgedrukt, gebruikt om naar deze documenten te verwijzen.

De RLN00135 heeft als doelstelling om handvatten te bieden bij het ontwerp van nieuwe transferinfrastructuur in een station en het toetsen van de bestaande infrastructuur. Hierbij wordt breder gekeken dan naar alleen het perron maar ook naar bijvoorbeeld horizontale en verticale loopverbindingen. Binnen dit rapport zal alleen worden gekeken naar de aspecten in de richtlijn die een directe relatie hebben tot de veiligheid op een perron in relatie tot de drukte.

Het BSD beschrijft een beslismodel, signaalwaarden en mogelijke maatregelen die tezamen handvatten geven in het beslissen of de situatie op een perron onveilig is door drukte en wat hier aan maatregelen kunnen worden genomen. Dit document focust op de situaties die voorkomen tijdens de reguliere dienstregeling op perrons en het uitloopgebied van stijpunten op perrons.

Het NPI-rapport toetst de werkhypothese van ProRail dat zekere serviceniveaus, op basis van het Level-of-Service concept van Fruin, geschikt zijn voor het identificeren van comfort- en capaciteitsknelpunten. Verder kijkt het rapport ook naar de vraag of deze serviceniveaus gebruikt kunnen worden voor het identificeren van veiligheidsknelpunten. Binnen dit rapport zal alleen worden gekeken naar dit laatste aspecten dan alleen in relatie tot het perron en niet in relatie tot de andere delen van de transferinfrastructuur.

De drie documenten behandelen verschillende elementen die een relatie hebben tot het voorgestelde kantelpunt waarbij sommige elementen door meerdere documenten

behandeld worden. Daarom worden in de rest van dit stuk de elementen in drie categorieën verdeeld en wordt elk van deze categorieën in detail behandeld. Deze drie categorieën zijn:

- Zelfredzaamheid en dichtheidsnormen/signaalwaarden in relatie tot natuurlijke dichtheid, absorptievermogen en het kantelpunt
- Perronontwerp en infrastructuur en de spreiding van reizigers over het perron in relatie tot de bepaling van de effectieve perronoppervlakte.
- Roltrappen en hun uitloopgebieden

Zelfredzaamheid en dichtheidsnormen/signaalwaarden in relatie tot natuurlijke dichtheid, absorptievermogen en het kantelpunt

Het in dit rapport voorgestelde kantelpunt stelt dat wanneer het aantal mensen, maal de correctiefactor, op het perron groter is dan 2 maal de effectieve oppervlakte, het risico op perronveiligheidsincidenten significant en niet lineair gaat toenemen. De twee belangrijkste mechanismes die voor de significante en niet lineaire stijging zorgen zijn het snel oplopen van lokale dichtheden tot ver boven de 2 personen per vierkante meter (vanaf nu aangeduid voor p/m^2) en het snel afnemen van het absorptievermogen bij deze hogere lokale dichtheden.

In zowel de RLN00135 als de BSD wordt het concept van zelfredzaamheid van reizigers gebruikt bij het bepalen van de veiligheid op een perron in relatie tot de drukte. Volgens de RLN00135 betekent zelfredzaamheid "dat reizigers hun eigen gedrag – bijvoorbeeld voor hun looproute via een perron of hun wachtplek op het perron – zelfstandig kunnen aanpassen aan de transfersituatie waarmee zij worden geconfronteerd". Er wordt gesteld dat reizigers niet langer zelfredzaam zijn wanneer zij onvrijwillig gebruik moeten maken van de gevarezone om te wachten of om naar een geschikte wachtplek te lopen. De transfernorm wordt dan overschreden.

Binnen het BSD wordt gesteld dat vanaf een oppervlakte per persoon van 1 m² of minder de zelfredzaamheidsgrens regelmatig wordt overschreden en vanaf 0,9 m² per persoon of minder de zelfredzaamheidsgrens vaak wordt overschreden. Hierbij wordt de waarde van 0,9 m² per persoon, 1,11 p/m^2 , als grens gezien waarbij, bij dichtheden boven de 1,11 p/m^2 , de veiligheid structureel in het geding is. De definitie van kantelpunt stelt echter dat er pas bij dichtheden van meer dan 2 p/m^2 (> 0,5 m²/persoon) er een significante en niet lineaire stijging is van het risico op perronveiligheidsincidenten.

Er twee verklaringen voor het verschil tussen de gehanteerde grenswaarde van 1,11 p/m^2 en het kantelpunt van 2 p/m^2 . Ten eerste heeft dit te maken met de definitie van het kantelpunt en het risico dat de grenswaarde beschrijft. De definitie van het kantelpunt stelt namelijk dat het, vrijwillig of onvrijwillig, wachten of lopen in de gevarezone op zichzelf enig risico met zich meebrengt maar op zichzelf geen kantelpunt is. Deze situatie op zichzelf wordt gezien als onderdeel van risicodomein II.

Dat wil zeggen het risico neemt lineair toe met de drukte en nog niet meer dan lineair. Pas wanneer de dichtheid dermate groot wordt dat het absorptievermogen te beperkt wordt om een domino-effect op te vangen en er mensen zich in de gevarenzone bevinden wordt er gesproken van een kantelpunt. Kortom, de signaalwaarden uit het BSD beschrijven de ontwikkeling van het risico op perronveiligheidsincidenten (specifiek de val in de spoorbak) in risicodomein II en beschrijven dus geen kantelpunt.

Ten tweede heeft dit voor een deel te maken met hoe de waarden berekend worden. Beide waarden worden berekend op basis van de beschikbare oppervlakte in de loopzone, stawachtzone en objectenzone. Voor de grenswaarde uit het BSD is dit voor een bepaald meetgebied, voor het kantelpunt is dit het gehele effectieve bruikbare gedeelte van het perron. In het BSD (Beleidsdocument Structurele Drukke) is de waarde ook de daadwerkelijk de gemeten dichtheid in het meetgebied en worden personen buiten het meetgebied, bijvoorbeeld mensen die zich in de gevarenzone bevinden niet meegerekend. Voor het kantelpunt wordt iedereen die op het perron bevindt meegerekend, ongeacht waar ze zich op het perron bevinden. Bij het bereiken van het kantelpunt zal de daadwerkelijke globale dichtheid in de loopzone, stawachtzone en objectenzone dan ook iets lager liggen dan de 2 p/m^2 .

In de NPI-studie wordt gesteld dat mensen dichtheden van 4 p/m^2 voor langere periodes (ten minste 6 minuten) kunnen volhouden zonder dat er een gevaarlijke situatie ontstaat. Er wordt echter ook geadviseerd om de normering strenger te kiezen en deze op 2 p/m^2 te zetten. Dit om mogelijke gevaarlijke situaties tijdig te signaleren en maatregelen te kunnen nemen voordat er daadwerkelijk gevaarlijke situaties optreden. De geadviseerde norm, 2 p/m^2 , is gelijk aan de voorgestelde waarde van het kantelpunt. Er moet wel opgemerkt worden dat de waarde uit de NPI-studie zich niet tot het risico van een val in de bak verhoudt maar tot het risico op verdrukking.

In het BSD worden de duur van de overschrijding van de zelfredzaamheidsgrens en de frequentie ervan meegenomen in de beoordeling van het gevaar dat uitgaat van de drukte. Binnen de kantelpuntdefinitie worden deze twee elementen niet expliciet meegenomen. Hier wordt het principe gebruikt dat het overschrijden van het kantelpunt direct als zeer risicovol wordt beschouwd ongeacht de duur of frequentie. De duur en frequentie zullen echter wel mee moeten worden genomen in de beslissing en keuze van de te nemen maatregelen en de proportionaliteit hiervan.

Het laatste element wat zowel voorkomt in een van de documenten als in de definitie van het kantelpunt is de fysieke ruimte die een voetganger inneemt en hoe bagage hierop van invloed is. In het BSD wordt gesteld dat de ruimte die een voetganger inneemt wordt benaderd door een ellips met een breedte van 65 en een diepte van 35 centimeter. Verder wordt gesteld dat een voetganger met een reiskoffer op wielen ongeveer 1,5 keer zo groot is.

Bij de berekening van het kantelpunt wordt gewerkt met type bagages, middelgrote bagage zoals grotere rugzakken en kleine koffers en grote bagage zoals grote koffers en

kinderwagens. Hierbij wordt aangenomen dat een voetganger met middelgrote bagage ongeveer 1,5 keer zoveel ruimte inneemt en een voetganger met grote bagage 2 keer zoveel ruimte inneemt. Hierin verschillen de kantelpunt definitie en de BSD dus.

De belangrijkste verklaring voor die verschil in de aangenomen afmetingen van de ellips. Binnen de kantelpunt definitie wordt uitgegaan van een ellips van 54 centimeter breed en 36 centimeter diep. Dit maten komen overeen met de p90 waarde van de breedte en diepte van een volwassen Nederlander volgende de DINEN2004²⁴. Er is gekozen om de p90 waarde aan te houden in plaats van het gemiddelde om rekening te houden met eventuele dikkere kleding, kleine bagage en verschillen in de populatie per perron. Op basis van deze waarden voor de ellips volgen de twee factoren voor de voetgangers met middelgrote en grote bagage.

Perronontwerp en infrastructuur en de spreiding van reizigers over het perron in relatie tot de bepaling van de effectieve perronoppervlakte.

In de RLN00135 wordt een perron verdeeld in drie soorten zones:

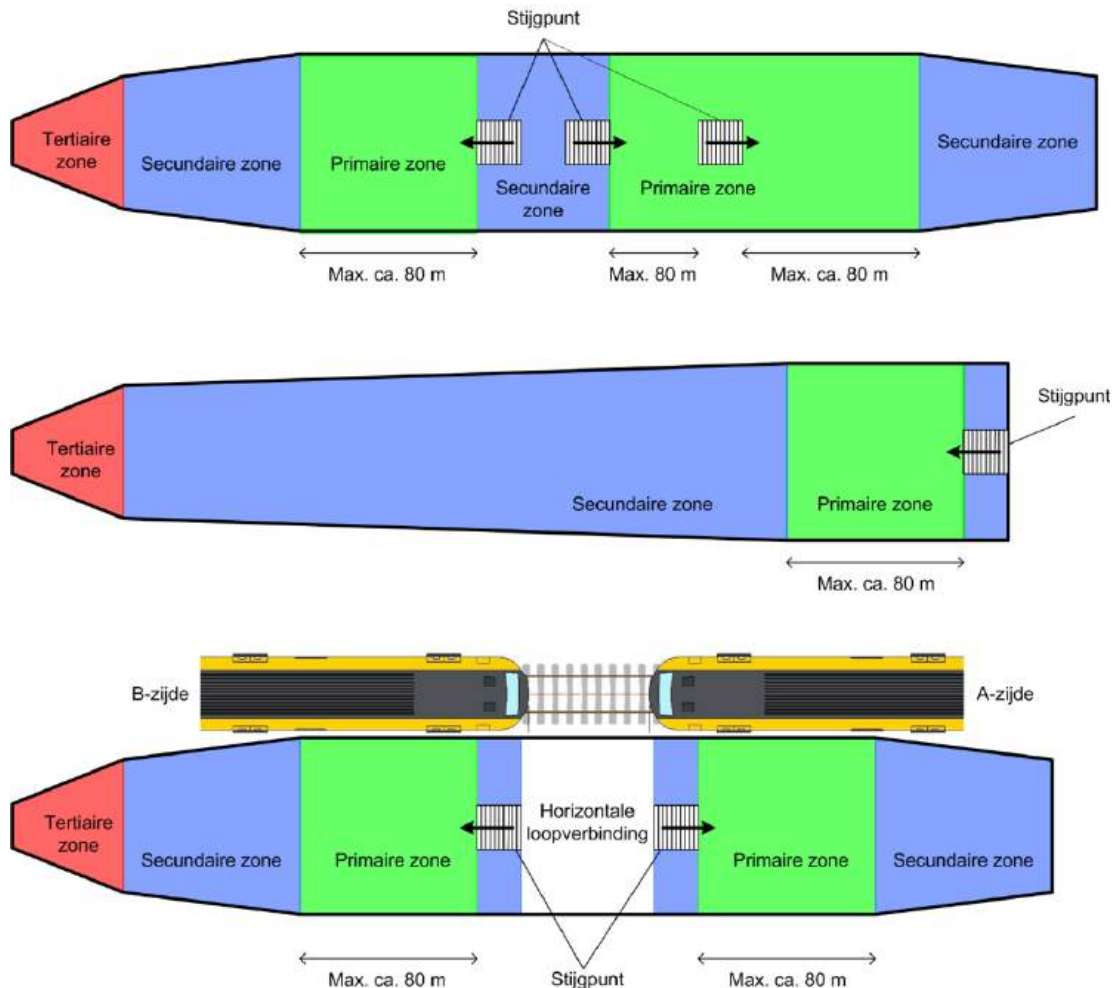
- > "De primaire zone is de zone waar het merendeel van de reizigers (80-100%) wacht. Deze zone ligt in de directe omgeving van de hoofdtoegang(en) tot het perron. Als vuistregel geldt dat de lengte van de primaire zone wordt bepaald als de afstand die binnen 1 minuut lopen kan worden bereikt vanaf een toegang tot het perron. Die delen van het perron die reizigers alleen kunnen bereiken door een draai van 180 graden te maken, worden in het algemeen niet gerekend tot de primaire zone. De primaire zone omvat alle hoofdtoegangen tot het perron."
- > "Aansluitend op de primaire zone, verder weg van de primaire toegang, bevindt zich de secundaire zone. Het aandeel wachtende reizigers in de secundaire zone wordt beïnvloed door de lengte langs de secundaire zone van de halterende maatgevende trein en zal naar verwachting niet meer dan 20% van de instappers zijn. Een neventoegang tot het perron zou zich eventueel in deze zone kunnen bevinden, wanneer deze toegang door niet meer dan 10% van de reizigers gebruikt wordt."
- > "Een eventuele tertiaire zone bevindt zich aan het uiteinde van het perron en heeft een beperkte lengte. In de tertiaire zone worden, vanwege de loopafstand vanaf de toegang, geen wachtende instappers verwacht."

Figuur 33 geeft deze zones schematisch weer voor verschillende soorten perrons.

Deze categorisatie van perronzones heeft een relatie tot de effectieve bruikbare perronoppervlakte van het kantelpunt. Beide stellen dat reizigers zich, ongeacht de lengte van de halterende trein, zich niet per definitie gelijkmatig over het gehele perron zullen spreiden. De definitie van het kantelpunt stelt echter wel dat reizigers zich binnen het effectief bruikbare perronoppervlakte zich gelijkmatig verspreiden. Dit effectief bruikbare perronoppervlakte omvat altijd de primaire zone en een eventuele secundaire zone die tussen de stijpunten inligt zoals in de bovenste situatie figuur 33. Kortom, de

²⁴ <https://www.dined.nl/en/ellipse/introduction>

definitie van het kantelpunt neemt niet aan dat reizigers, bij grote drukte, minder gebruik zullen maken van gebieden waarvoor zij een draai van 180 graden moeten maken.



Figuur 32: Schematische zonering perron in lengterichting bij resp. middenontsluiting, kopse ontsluiting en 2-fasen perron [figuur 28 uit de RLN00135]

De definitie van het kantelpunt gebruikt ook de vuistregel dat de effectief bruikbare perronoppervlakte tot maximaal 100 meter van een centraal gelegen stijgpunt loopt. Gegeven dat dit 100m vanaf het centrum van een stijgpunt is in plaats van het opgangspunt, komt dit goed overeen met de vuistregel uit de RLN00135. Voor een perron met een kopse ontsluiting of een asymmetrisch gelegen midden ontsluiting geeft de definitie van het kantelpunt geen vuistregel waar de RLN00135 stelt dat de primaire zone waar de meeste reizigers wachten maar tot maximaal 80 meter van de opgang strekt.

Er moet opgemerkt worden dat er in beide gevallen is er sprake van onzekerheid over hoe reizigers zich exact over een perron spreiden en hoe dit afhangt van de drukte, de lengte en halteringlocatie van de trein en de inrichting, waaronder de locatie van de

stijpunten, van het perron. Verder onderzoek zou moeten uitwijzen wat het spreidingsgedrag van reizigers precies is gegeven de bovengenoemde factoren.

De zonering vanuit de RLN00135 beschrijft alleen de verdeling van reizigers over de lengterichting van het perron. De RLN00135 beschrijft ook opbouw van een perron in de breedterichting. Een drietal elementen uit deze beschrijving hebben een relatie tot de bepaling van de effectief bruikbare perronoppervlakte, namelijk:

- > "Aangezien beide zijden van een eilandperron afzonderlijk van elkaar moeten kunnen functioneren, wordt een eilandperron rekenkundig als twee afzonderlijke zijperrons beschouwd. In een ontwerpproces dienen beide zijden van het eilandperron daarom afzonderlijk te worden berekend."
- > "Indien er voldoende uitwisseling kan zijn tussen beide zijden van het eilandperron (geen grote onderbrekingen in de lengterichting door objecten, gebouwen of vides), kunnen beide stuwachzones gesommeerd worden"
- > "Een perron in middenligging waar slechts aan één zijde treinen halteren en, aan de zijde waar geen treinen halteren, niet is voorzien van een hekwerk moet worden beschouwd als een eilandperron."

Deze elementen komen in grote mate overeen met hoe de effectief bruikbare perronoppervlakte, van vooral eilandperrons, bepaald wordt. Namelijk, wanneer er voldoende uitwisseling tussen perronhelften kan plaatsvinden ontstaat er een gedeeld oppervlakte.

Maar ook hier moet opgemerkt worden dat in beide gevallen er sprake is van onzekerheid over hoe reizigers zich exact over een perron spreiden. In dit geval gaat het voornamelijk om de vraag in hoeverre gedeelde oppervlaktes benut worden en hoe dit van de drukte, het perronontwerp en de halteringslocatie van de trein afhangt. Ook hier zou verder onderzoek moeten uitwijzen wat het gedrag van reizigers is.

Roltrappen en hun uitloopgebieden

Het BSD behandelt ook de risico's die voortkomen uit de drukte in het uitloopgebied van roltrappen. Hier wordt gesteld dat (lokale) drukte op het perron een opstopping kan veroorzaken in het uitloopgebied van een roltrap en dat dit kan leiden tot de val van 1 of meer mensen die niet meer goed van de roltrap kunnen afstappen. Wanneer de dichtheid in het uitloopgebied groter is dan $1,11 \text{ p/m}^2$ ($<0,9 \text{ m}^2/\text{persoon}$) wordt de situatie als onveilig beschouwd.

Binnen de definitie van het kantelpunt is er geen specifiek kantelpunt voor risico val in uitloopgebied bewegend stijgpunt. Er wordt gesteld dat de risico's zich voornamelijk in domein II bevinden en dat er geen apart kantelpunt is voor dit risico. Kortom, de signaalwaarde van het BSD zijn een goede indicatie voor de risico's in domein II maar niet voor een kantelpunt.