

TNO Technische Menskunde

TNO-rapport

TM-04-C005

Capaciteitsmeting Roltrappen Rokin

TNO Technische Menskunde
Kampweg 5
Postbus 23
3769 ZG SOESTERBERG

www.tno.nl

T 0346 356 211
F 0346 353 977

Datum	30 januari 2004
Auteurs	L C Boer en N.P.M. Scholten *
Exemplaarnummer	
Oplage	50
Aantal pagina's	
Aantal bijlagen	twee
Opdrachtgever	gemeente Amsterdam, dienst Infrastructuur Verkeer en Vervoer
Projectnaam	Capaciteit Trappen
Projectnummer	73215

* TNO Bouw

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor onderzoeksopdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst. Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2004 TNO

INHOUD	Blz.
SAMENVATTING SUMMARY	
1 INLEIDING	5
2 PROEFOPZET	7
3 MEETMETHODE	
3.1 Proefpersonen	7
3.2 Locatie en Trappen	8
3.3 Supervisie, Noodstop en Ethiek	11
3.4 Camera's	11
3.5 Procedure	11
4 RESULTATEN	
4.1 Gedragsobservaties	12
4.2 Afvoercapaciteit	13
5 DISCUSSIE	15
6 CONCLUSIES	17
REFERENTIES	18
BIJLAGE A: Gezondheidsverklaring	19
BIJLAGE B: Proefpersoonverklaring	20

Capaciteitsmeting Roltrappen Rokin

L.C. Boer en N.P.M. Scholten

SAMENVATTING

Vraagstelling: Is veilige ontruiming van metrostation Rokin mogelijk als de roltrappen stilstaan? In opdracht van de gemeente Amsterdam, dienst Infrastructuur Verkeer en Vervoer deed TNO een meting van afvoercapaciteit van een stilstaande roltrap in relatie tot de afvoercapaciteit van een vergelijkbare vaste trap. Achterliggende vraag was of een 1-m brede roltrap (op voetniveau) in een uitvoering als voorzien te Amsterdam vergelijkbare uitkomsten oplevert als een trap met een breedte van 1,1 m als bedoeld in het Bouwbesluit 2003.

Werkwijze: Aangezien er geen onderzoeksgegevens bestaan voor deze specifieke vraagstelling voerden we een grootschalige gedragsproef uit. We lieten een groep van 120 proefpersonen de stilstaande roltrap van een bestaand metrostation tweemaal beklimmen, 2 x 12 m hoog; en vervolgens nogmaals 2 x 12 m klimmen over vaste trappen van ongeveer gelijke breedte. Voor de zuiverheid van de vergelijking beklom een tweede groep van 120 proefpersonen eerst de vaste trappen en daarna de roltrap. Op video werd de finish vastgelegd en achteraf werd op de seconde nauwkeurig bepaald op welk moment de individuele proefpersoon bovenkwam. De capaciteit werd bepaald als het aantal personen gedeeld door de tijd tussen laatste en de eerste persoon die bovenkwam. Andere gedragsobservaties betroffen inhalen, struikelen en lichaamshouding.

Resultaten: We constateerden dat de stilstaande roltrap van het "Rokintype" meer afvoercapaciteit had dan de vaste trap met vergelijkbare breedte; dat er op de roltrap wat sneller en gemakkelijker ingehaald werd; dat er op de roltrap aanleiding tot struikelen was door de geleidelijke overgang tussen stijgend en horizontaal; en dat krap naast elkaar lopende proefpersonen de buitenste arm boven de leuning hielden bij zowel roltrap als vaste trap.

Conclusies: Met grote zekerheid is aangetoond dat de roltrappen, zoals voorzien op metrostation Rokin en in stilstaande toestand, een afvoercapaciteit zullen hebben van ten minste 95% van die van een vaste trap, kolom B, met een vrije breedte van 1 m tussen de leuningen. Vergeleken met genoemde vaste trap is er 83% kans dat de stilstaande roltrap met tredevlakken van 1 m lengte en een breedte tussen de afscheidingen van 1007 mm (zoals in station Rokin) een grotere doorstroomcapaciteit heeft. Het is derhalve alleszins verantwoord om de doorstroomcapaciteit van de voorziene roltrap te bepalen met de eenvoudige rekenregels van het Bouwbesluit 2003, uitgaande van de smalste trap, kolom B, die het Bouwbesluit 2003 kent.

Measuring Capacity of the Escalators at Rokin

L.C. Boer and N.P.M. Scholten

SUMMARY

Purpose: Safe and timely evacuation of metro station Rokin, Amsterdam--is that possible using the escalators in case of a power loss? Commissioned by the municipality of Amsterdam, service Infrastructure Traffic and Transportation, TNO measured the actual evacuation capacity of a stationary escalator in relation to the evacuation capacity of the normal stairwell. A background question was whether escalators 1-m wide at foot height (as foreseen at Rokin) will have a capacity comparable to the capacity of a normal stairwell 1.1-m wide--the minimum required by the Dutch Building Decree (2003).

Methods: Wanting actual data with regard to the specific question, we did a large-scale behavioural test. We let a group of 120 test participants climb over a stationary escalator 12 m high in an existing metro station twice in succession; thereafter, they climbed, again two times 12 m, normal stairwells of comparable dimension. For pureness of comparison, a second group of 120 test participants climbed normal stairwells first; then the stationary escalator. Cameras recorded the finish for subsequent scoring of the moment the individual test participant came upstairs. Evacuation capacity was determined as the number of people divided by the interval between the last and the first person coming upstairs. Other behavioural observations regarded overtaking, stumbling, and body posture.

Results: We observed higher evacuation capacity for the stationary escalator "Rokin type" relative to normal stairwells; that overtaking was easier on the escalator but that the stationary escalator "invited" stumbling at the gradual transition between horizontal and rising part; and that test participants moving tightly abreast held their outside arm above the banister while climbing over the escalator as well as the normal stairwells.

Conclusions: With high confidence it was shown that the escalators as foreseen at metro station Rokin, under stationary conditions, will have an evacuation capacity of at least 95% of the capacity of normal stairwells, type B, with 1-m clear width between the handrails. Relative to such normal stairwells there is a 83% probability that the stationary escalator with a clear width at foot height of 1007 mm (as in Rokin station) has greater capacity. It is therefore very sound to calculate the capacity of the stationary escalator with the simple rules of the Building Decree 2003, assuming the required minimum width of a B-type of stair.

1 INLEIDING

In het kader van de ontruiming van het metrostation Rokin, onderdeel van de nieuwe Noord-Zuidlijn van het Amsterdamse openbaar vervoer, is de afvoercapaciteit van een stilstaande roltrap met een tredelengte van 1 m in discussie.

Volgens de rekenregels van het Bouwbesluit bedraagt de afvoercapaciteit 45 personen per minuut voor elke meter trapbreedte, mits de trap voldoet aan kolom B van tabel 2.28.a van afdeling 2.5 van het Bouwbesluit 2003. Het Bouwbesluit 2003 eist dan een trapbreedte van tenminste 1.1 m, hetgeen rekening houdend met normale afmetingen van een trapboom resulteert in een lengte van de trede van ca 1.03 m, boven welke afmeting zich wel de leuning mag bevinden. De voorziene roltrap voorziet op het niveau van het tredevlak in een afmeting van 1.007 m. Zo'n trap is in strikte zin geen trap, kolom B, meer. De roltrap "devalueert" dan naar de letter tot een trap, kolom A, ook wel bekend als een spiltrap, waarvoor de breedte-eis 0,8 m bedraagt. Voor dergelijke smalle trappen stelt het Bouwbesluit de capaciteit op 25 personen/minuut. En met zo'n capaciteit is tijdige ontruiming van het metrostation Rokin niet haalbaar.

De President van de arrondissementsrechtbank te Amsterdam oordeelde naar aanleiding van het beroepsschrift van de Vereniging de Bovengrondse tegen de verleende bouwvergunning voor het station Rokin dat de roltrap moet worden beoordeeld met de kentallen van een trap, kolom A. De kernvraag van het huidige rapport luidt "is de capaciteit van de stilstaande roltrap in werkelijkheid wel zo minimaal"?

In de eerste plaats is daar vanuit de bouwregelgeving iets op te zeggen. Het begrip *trapbreedte* is gecompliceerd en leent zich voor misverstanden. Scholten (2004) zet de zaken nog eens op een rij en laat zien dat bij zorgvuldige beschouwing van alle relevante regelgeving duidelijk is dat de op station Rokin voorziene roltrappen, onder toepassing van het gelijkwaardigheidsbeginsel, wel degelijk mogen worden beoordeeld met de methode die geldt voor een trap, kolom B.

Ten tweede is daar ook vanuit menskunde iets op te zeggen. Mensen zijn geen rechtopstaande rechthoeken, maar eerder trapezia met de grootste breedte op schouderhoogte, 449 mm, of heuphoogte, 401 mm (Daanen & Robinette, 2001). En als de arm nog vrij naast de heup gezwaaid wordt is de grootste heupbreedte 448 mm (Peebles & Norris, 1998). Draagt men--zoals te doen gebruikelijk--kleding, dan neemt de breedte nog eens met centimeters toe. Bij winterkleding zelfs met 2 cm aan weerszijden (schattingen Tan, 2004). Mensen plaatsen bij het gaan en staan hun voeten niet recht onder de desbetreffende buitenkant van heup of schouder maar meer naar binnen. Bovendien zwaaien mensen bij het lopen ook in lichte mate opzij, de *body sway*, en houden ze daarom ruimte vrij tussen wand en lichaam. De Internationale Maritieme Organisatie rekent met een *clear width* van 15 cm vanaf de wand (MSC Circular 909, 1999). Welnu, een roltrap volgt deze trapeziumvorm beter dan een vaste trap. De vrije breedte van een roltrap neemt van beneden af toe met bijvoorbeeld 25 cm extra vanaf enkel- en kuithoogte en nog eens met zeker 25 cm boven de leuning--zie ook Figuur 4. Een vaste trap is vaak rechthoekig, terwijl de leuning meestal naar binnen steken, waardoor de doorgang op zijn smalst is, waar de mens op zijn breedst is.

Er is derhalve een gereede kans dat een roltrap een grotere capaciteit heeft dan op grond van eenvoudige rekenregels gerelateerd aan de breedte op voetniveau, te verwachten is.

Anderzijds zijn roltrappen primair ontworpen voor gebruik in rollende toestand waarbij mensen zich passief laten transporteren en slechts incidenteel op eigen kracht klimmen of dalen. Meestal is de optrede van een roltrap (de hoogte per trede) ook groter dan de optrede van vaste trappen. Omdat NEN-EN 115 de klimhoek van roltrappen beperkt tot maximaal 30 graden, liggen roltrappen nogal plat; de aantreden zijn in vergelijking met een vaste trap groter. Omdat het bij station Rokin om roltrappen gaat die in stilstand voor vluchten worden gebruikt, mag de optrede niet groter zijn dan 21 cm (NEN-EN 115, onderdeel 8.1.1). Dat is gelijk aan de maximum optrede van een vaste trap volgens het Bouwbesluit 2003. De luie klimhoek en de verhouding optrede-aantrede maken het lopen op een roltrap moeizamer dan op een standaard vaste trap. Op grond van deze argumentatie zou de "onhandige" roltrap weer wat minder capaciteit kunnen hebben dan een standaard trap. Zeker bij paniek zou dat kunnen tellen.

Om te weten hoe de zaken nu in werkelijkheid zijn deden we--in opdracht van de gemeente Amsterdam, dienst Infrastructuur Verkeer en Vervoer--een meting van de afvoercapaciteit van een stilstaande roltrap én een meting van de afvoercapaciteit van een vaste trap, uitgevoerd als smalle B-trap. Eerder deden we dergelijke metingen bijvoorbeeld voor het ontruimen van treinen (Boer, Noren & Winer, 2004). We lieten dit keer een groep van 120 proefpersonen een stilstaande roltrap beklimmen én lieten ze daarna hetzelfde hoogteverschil nog eens via een stelsel van vaste trappen overbruggen. Een tweede groep lieten we ter vergelijking eerst het stelsel van vaste trappen beklimmen en daarna de roltrap. Op deze manier kunnen we de gemeten afvoercapaciteit van de roltrap relateren aan de gemeten afvoercapaciteit van een vaste trap. En de uitspraak doen "een stilstaande roltrap heeft maar x% van de capaciteit van een vaste trap".

Typerend voor Rokin is de grote diepte, ruim 20 m. Het perron ligt 20.46 m onder straatniveau; de Noordelijke en Zuidelijke verdeelhal liggen -4.51 m en -5.96 m diep. Bovendien is het maaiveld aan Noordelijke zijde 0.60 m verhoogd. De totale opvoerhoogte voor Noord en Zuid komt daarmee op respectievelijk 21.06 en 20.46 m. De roltrappen van perron naar hal zijn lang; ze overbruggen voor Noord en Zuid een hoogte van 15.95 m respectievelijk 14.50 m. Aan de Zuidzijde is de hal royaal bemeten en passagiers kunnen de resterende hoogte naar het maaiveld (5.96 m) overbruggen via, naar keuze, brede vaste trappen of roltrappen. Deze brede opzet vergemakkelijkt het vluchten. Aan de Noordzijde is er minder keuze aan vluchtroutes. De hal is krapper bemeten en de resterende klim naar het maaiveld (nog 4.51 m) is alleen met roltrappen te doen. Er treedt echter geen vernauwing op en de totale breedte aan trappen is niet kleiner dan de breedte aan trappen van perron naar hal. Hier moet men dus vanaf het perron eerst 14.50 m stijgen naar de hal, dan een stukje lopen en tenslotte weer (5.960+0.600) 6.560 m stijgen, beide keren per roltrap. Het hoogteverschil in de proef benaderde deze hoogteverschillen. De eenvoudige rekenregels van het Bouwbesluit 2003 houden geen rekening met het aantal trappen dat na elkaar beklommen of afgedaald worden.

De forse te overbruggen hoogte heeft invloed op de doorstroomcapaciteit. Immers, hoe hoger men klimt, hoe vermoeider men raakt. Dit zou wel eens sterker kunnen spelen op de

"onhandige" roltrappen waardoor mensen sneller moe worden dan bij het klimmen per vaste trap. De loopsnelheid op de trap zal in elk geval geleidelijk afnemen. We kozen daarom voor een proef met een lange roltrap, opvoerhoogte 12.08 m, en lieten proefpersonen deze trap 2x achter elkaar klimmen, totale te overbruggen hoogteverschil: 24.16 m. Ook de vaste trappen lieten we tweemaal achtereen beklimmen--eveneens met het te overbruggen hoogteverschil van 24.16 m. De doorstroomcapaciteit van dergelijke lange beklimmingen is een benadering van de capaciteit van de "Rokintrappen"; in onze meting wordt *meer* geklommen, maar tegelijk hebben de proefpersonen tussen de testruns door enkele minuten rust.

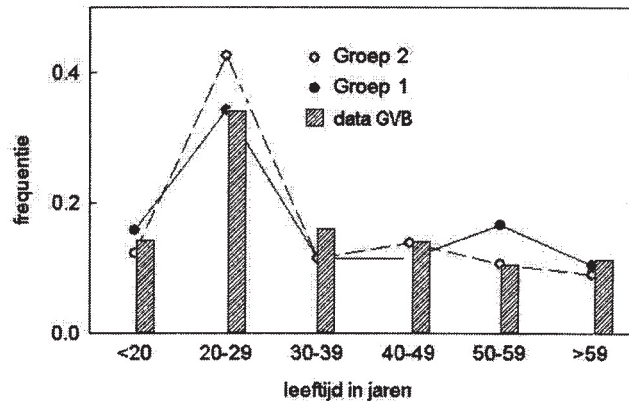
2 PROEFOPZET

Meting van zowel de capaciteit van een stilstaande roltrap als van de capaciteit van een vaste trap zijn nodig om de gewenste uitspraak te kunnen doen "een stilstaande roltrap heeft maar x% van de capaciteit van een vaste trap". De stilstaande roltrap moet daarbij qua afmetingen overeenkomen met de Rokintrappen. De vaste trap moet daar qua afmetingen bij aansluiten, maar zonder conflict met de richtlijnen van de publieke B-trap. De vaste trap moet zeer ondubbelzinnig een B-trap zijn! Daarom kozen we voor een vrije doorgang tussen de leuning van 1 m en met bijbehorende nadere uitwerking. Daarmee is een situatie ontstaan die voldoet aan Tabel 7 van de oude Bouwverordening ongeacht dat deze thans is opgevolgd door het Bouwbesluit. Formeel zou daarom met een iets kleinere maatvoering nog steeds sprake zijn van een B-trap. Zelfs met de oude Bouwverordening in de hand voldoet de hier gebruikte trap aan de eisen.

3 MEETMETHODE

3.1 Proefpersonen.

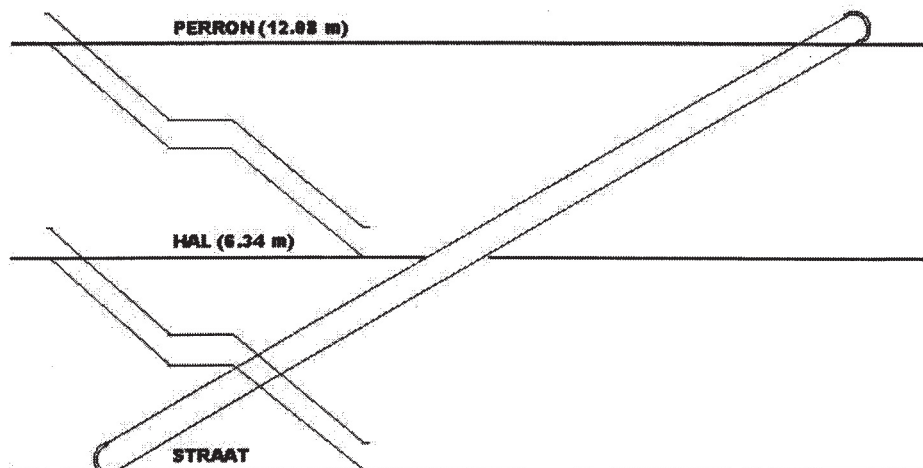
Twee groepen van 120 proefpersonen werden besteld op de avond van dinsdag 13 januari 2004 om kwart voor acht, Groep 1, en kwart over negen, Groep 2. Van tevoren hadden ze een gezondheidsverklaring gekregen (Bijlage A) en de vragen daarvan positief beantwoord. Andere eisen waren er niet. Uiteindelijk meldden zich 115 personen als Groep 1 en 123 als Groep 2. De jongste twee waren 11 jaar oud; de oudste twee 76 jaar. De leeftijdsverdeling staat in Figuur 1, tieners t/m 60-plussers. In verband met het weer kwamen de proefpersonen in winterkleding; de temperatuur was ongeveer 5 graden met een stevige Zuidwestelijke wind en af en toe een felle regenbui.



Figuur 1. Verdeling van de proefpersonen qua leeftijd (lijnen) en de verwachte leeftijdsverdeling van metropassagiers conform opgave GVB-Amsterdam (staafdiagrammen).

3.2 Locatie en Trappen

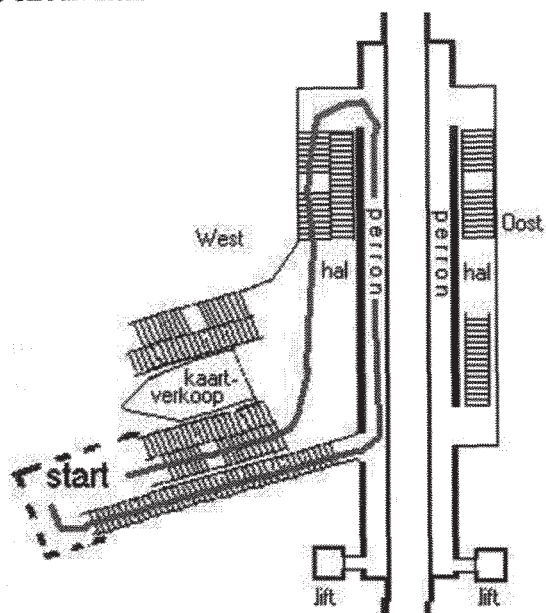
De proef werd gehouden op het station Maashaven van de Rotterdamse metro. De metro rijdt hier bovengronds met het perron 12.08 m boven de straat. Een lange roltrap overbrugt dit hoogteverschil in één keer. Station Maashaven heeft vaste trappen tussen straat en hal (6.34 m hoog) en tussen hal en perron (5.74 m)--zie het schema in Figuur 2.



Figuur 2. Schematisch zijaanzicht van metrostation Maashaven: vaste trappen links, roltrap van links onder naar rechtsboven.

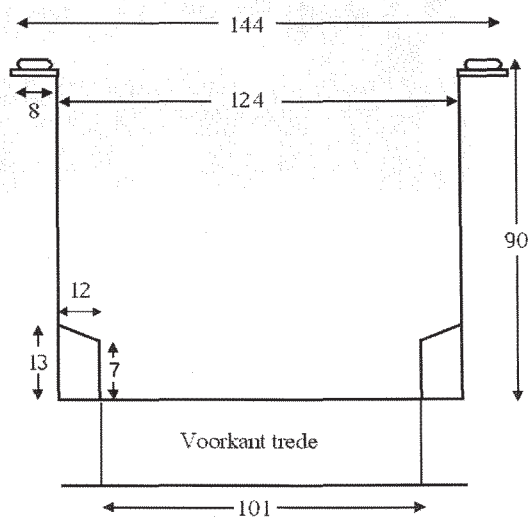
Op dit station richtten we een circuit in van roltrapklim en vaste trappen. Het circuit begon op straatniveau. Na beklimming van de stilstaande roltrap liep men het perron af om ongeveer 50 m verder af te dalen naar de hal. Zo'n 30 m verder in de hal leidde een tweede trap naar de straat. We zetten het circuit ook andersom uit: klimmen via de twee vaste trappen, via perron terug naar de roltrap en daar afdalen. Bij dit tweede circuit werd om

veiligheidsredenen de roltrap weer in werking gesteld en draaide hij naar beneden. Figuur 3 laat het circuit zien.



Figuur 3. Het circuit in een schematisch bovenaanzicht van metrostation Maashaven. De start was op straat, de lange roltrap eindigde op het 12.08 m hoger gelegen perron; de proefpersonen daalden via een vaste trap af naar de hal—op 6.34 m hoogte—en daarna naar de straat. Proefpersonen liepen ook in omgekeerde richting.

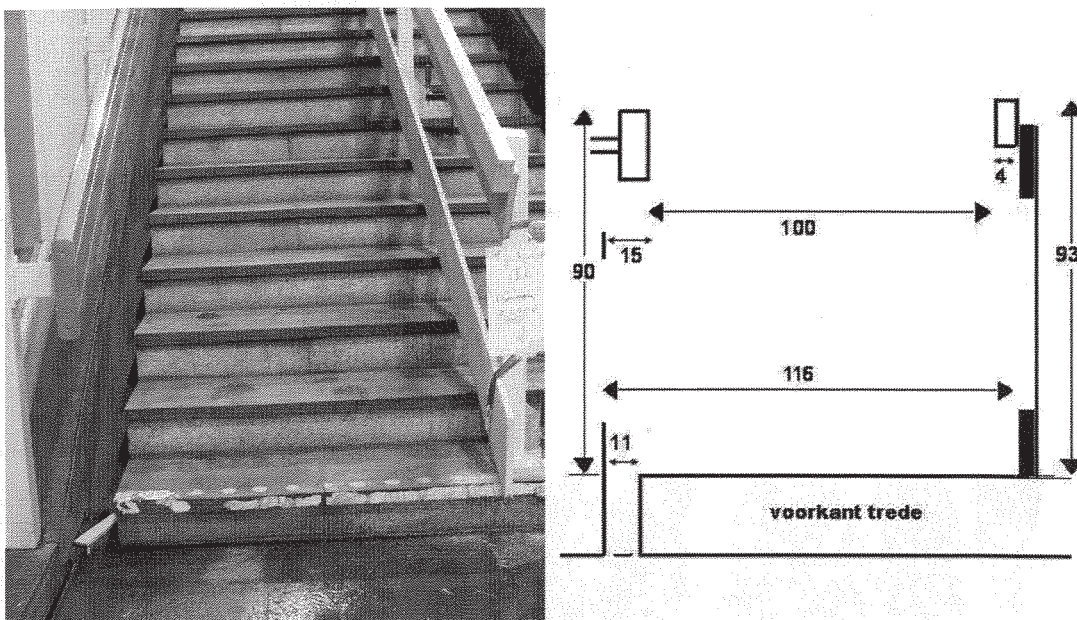
De roltrap had een hellingshoek van 30 graden hetgeen conform is aan NEN-EN 115. De optrede (hoogte per trede) was 20.6 cm conform onderdeel 8.1.1 van NEN-EN 115 dat een optrede van 21 cm of minder bepaalt bij roltrappen die in stilstand voor vluchten worden gebruikt. De aantrede was 39.5 cm. De breedte van de roltrap was op voetniveau 100 cm of, de 3½ mm speling ter weerszijden meegeteld, 1007 mm; en liep op tot 124 cm vanaf enkel- en kuitniveau. Figuur 4 laat de roltrap zien.



Figuur 4. De lange roltrap van straat naar perron, 12.08 m opvoerhoogte (maten rechts in centimeters; op- en aantrede resp. 20.6 en 39.5 cm).

De twee VASTE TRAPPEN hadden opvoerhoogtes van 6.34 en 5.74 m (resp. onderste en bovenste trap). Beide hadden halverwege een bordes met een diepte van resp. 113 cm en 140 cm. De klimhoek was ongeveer 36 graden. De tredevlakken liepen niet over de volle breedte door; langs de bestaande buitenwand hadden beide trappen een afvoergoot van 11 cm. In de praktijk komen de voeten nooit zo dicht bij de zijkant. Aan de andere zijde was op aanwijzing van TNO een tijdelijk afscheiding met leuning aangebracht en wel zodanig dat de minimum afmetingen van een trap, kolom B, werden benaderd, maar dan op royale wijze. We sloten aan bij de eis uit het 23^e supplement van de Model-bouwverordening, zoals deze gold voor de inwerkingtreding van het Bouwbesluit door een vrije doorgang tussen de leuningen aan te houden van 1 m.

De optrede van de onderste trap was 17.5 cm, de aantrede 34 cm; die optrede van de bovenste trap was 17 cm, de aantrede 32.5 cm. De leuningen lieten de z.g. *pinch grip* toe (Templer, 1992, blz. 124). Figuur 5 laat de bovenste vaste trap zien. De onderste trap is daaraan, zij het spiegelbeeldig, redelijk gelijk.



Figuur 5. Vaste trap van hal naar perron, ter linkerkant voor de proef versmald tot minimale B-trap. (Maten in centimeters; op- en aantrede resp. 17.3 en 34 cm.)

Op halniveau liep het circuit 30 m horizontaal van de ene naar de andere trap. Het circuit was gemarkeerd met 1 m hoog hekwerk; de proefpersonen liepen in een corridor. Omdat het circuit op halniveau de normale passagiersstromen kruiste was een opening van 3 m gelaten waar passagiers doorheen konden. Tijdens de proef was het perron dat de proefpersonen gebruikten afgeschermd, zodat normale passagiers er geen gebruik van konden maken. Hetzelfde gold voor de trappen die de proefpersonen gebruikten.

3.3 Supervisie, Noodstop en Ethiek

Supervisie werd uitgeoefend om de proefpersonen vlot en correct door het circuit te loodsen en om de veiligheid te garanderen. Op halniveau waar het circuit de normale passagiersstromen kruiste stonden vier supervisors. Ze gaven de proefpersonen voorrang. Verder was er op alle trappen toezicht, zowel uitgeoefend door TNO als door een EHBO-team. De mogelijkheid was aanwezig een noodstop uit te voeren. Een supervisor die een gevaarlijke situatie signaleerde moest dan tweemaal op een conducteursfluit blazen. Dit signaal moesten alle andere supervisors overnemen en de proefpersonen wisten, middels een proefpersoonverklaring, dat de conducteursfluit betekende "pas op de plaats", dus niet meer klimmen, lopen of afdalen.

TNO Technische Menskunde legt alle onderzoek voor aan een interne *toetsingscommissie ethiek proefpersoonexperimenten* en in tweede instantie aan de *medisch-ethische toetsingscommissie*; dit alles in het kader van de wet op het medisch wetenschappelijk onderzoek. Het huidige onderzoek werd daarom met de volgende veiligheidsmaatregelen uitgevoerd. (a) Proefpersonen moesten lichamelijk goed gezond zijn hetgeen werd vastgesteld aan de hand van de vragenlijst--zie Bijlage A. (b) Tijdens de proef was EHBO en een arts aanwezig. (c) Er was uitgebreide supervisie en een procedure voor een noodstop. (d) De proefpersonen waren gewaarschuwd tegen struikelen en vallen, moesten "eigen tempo" lopen en zich niet laten opjagen door anderen. Bovendien gaf de instructie aan dat men elk moment kon stoppen--zie Bijlage B. (e) Het afdalen *moest* rustig geschieden en, bij afdaling met de roltrap, zelfs passief.

3.4 Camera's

We observeerden de opgaande trappen van het circuit met twee camera's. Camera 1 bracht het bovineind van de opgaande vaste trap in beeld; Camera 2 bracht een over een hoogte van 3.25 m stijgend gebied van de trap in beeld (dat is 26-27% van de totale opvoerhoogte). De camera's werden verplaatst voordat de proefpersonen het circuit in omgekeerde volgorde liepen. De camera's werden verplaatst voordat de proefpersonen het circuit in omgekeerde volgorde liepen. Groep 1 klonk de laatste twee runs via de vaste trappen en daalde af via de roltrap; Groep 2, klonk de laatste twee runs via de stilstaande roltrap en daalde af via de vaste trappen. Tabel 1 laat de runs zien voor de twee groepen.

Tabel 1. Volgorde van de testruns bij de twee groepen.

Run	Groep 1	Groep 2
1	roltrapklim 1	vaste trapklim 1
2	roltrapklim 2	vaste trapklim 2
3	vaste trapklim 1	roltrapklim 1
4	vaste trapklim 2	roltrapklim 2

3.5 Procedure

De proefpersonen meldden zich in de hal en kregen, op overhandiging van hun gezondheidsverklaring, een exemplaar van de proefpersoonverklaring met instructies (Bijlage

B). Na ondertekening van de verklaring liepen ze de trap af naar het startvak waar een assistent de instructie nog eens mondeling herhaalde en eventuele vragen beantwoordde. Indien ze over de vaste trap naar boven moesten en afdalen via de roltrap werd gezegd dat ze de afdaling staande op de roltrap moesten maken, dus niet lopend. De roltrap draaide naar beneden.

Ongeveer 25 minuten na de meldtijd was alles in gereedheid en ging de eerste run van start. De proefpersonen klommen en daalden, en keerden terug in het startvak. Daar konden ze enkele minuten (staande) rusten. Run 2 startte zo'n 4 minuten na de start van Run 1. Na Run 2 was de rust wat langer omdat het circuit eerst omgezet moest worden. Run 3 ging pas van start als de camera's de nieuwe positie ingenomen hadden, als de roltrap was losgemaakt (of, ten behoeve van Groep 2, juist was vastgezet) en als het hele circuit vrij was van proefpersonen--dus iedereen terug in het startvak. Run 3 startte 9½ minuut na de start van Run 2. De instructie werd kort herhaald "het gaat om de klim naar boven; doe naar beneden rustig aan" (of bij afdaling per roltrap "blijf staan op de roltrap"). Run 4 startte 4 minuten na de start van Run 3. Daarna ontving eenieder op overhandiging van de proefpersoonverklaring 25 Euro voor deelname.

4 RESULTATEN

4.1 Gedragsobservaties

Tijdens de proef vielen vijf personen uit vanwege lichamelijke overbelasting, dat is 2% van het totaal. In Groep 1 viel iemand uit na Run 2 en een ander na Run 3. In Groep 2 vielen 3 personen uit, allen na Run 2. Tekenen van lichamelijke overbelasting waren achteraan komen, achter adem zijn, tijdens de pauzes steun zoeken tegen de muur en/of ander opvallend gedrag. De supervisors spraken de persoon aan en haalden betrokkene uit de proef, soms onder diens protest. Eén persoon verwondde zijn linkerhand aan de ruwhouten plank aan de buitenzijde van de provisorische leuning. Na de desbetreffende testrun ontsmette de EHBO de schrammen en plakte een pleister. De proefpersoon voltooide de proef; hijzelf noch EHBO vonden verdere deelname aan de proef bezwaarlijk.

We zagen de proefpersonen met de arm boven de leuning lopen. Dat betrof de arm aan leuningzijde en dat gebeurde vrijwel altijd als men "krap" liep, twee naast elkaar. Dat gebeurde zowel op de roltrap als op de vaste trap.

We zagen dat de proefpersonen op de roltrap niet aarzelden om in te halen. Ook op de vaste trap haalden ze in maar dat leek wat moeizamer te verlopen: op de vaste trap was dat bijna onmogelijk zonder lichamelijk contact en het draaien van de schouders in zogeheten "Egyptische lopen". De proefpersonen leken dan ook minder geneigd in te halen op de vaste trap dan op de roltrap.

We zagen enkele personen de balans verliezen en meteen weer hervinden door een extra pas te maken of door af te steunen aan de leuning. Slechts één (jong) persoon kwam ten val op de roltrap. Hij stond onmiddellijk op, geholpen door een vriend. Ze gingen lachend verder. Tabel 2 laat het aantal struikelingen zien.

Tabel 2. Aantal struikelingen op de verschillende trappen. (Met bijna 120 proefpersonen is het totaal aantal beklimmingen van de roltrap ruim 465, evenals het totaal aantal beklimmingen van de vaste trap.)

	Groep 1	Groep 2	totaal
roltrapklim 1	4	2	roltrapklim: 6
roltrapklim 2	0	0	
vaste trapklim 1	1	0	vaste trapklim: 2
vaste trapklim 2	0	1	

Bij de roltrap vonden 4 van de 6 struikelingen plaats op het einde van de roltrap waar de optrede al bijna verdwenen is maar nog voldoende aanwezig om er met de voet achter te kunnen blijven haken. Het langzaam verglijden van de optrede lijkt een uitnodiging tot struikelen. Bij de vaste trap vond 1 van de 2 struikelingen eveneens plaats bovenaan waar de trap eindigt. Een *test for difference between proportions* (4/465 tegenover 1/465) typeerde het verschil tussen roltrap en vaste trap qua struikelingen bovenaan de trap als niet significant; $p < 0.18$ (zie Voetnoot 1¹).

Beperken we ons tot het struikelen tijdens de constante klim dan staan roltrap en vaste trap gelijk met 2 struikelingen elk. Aangenomen dat in gelijke mate over de hele opvoerhoogte gestruikeld werd, dan kunnen we het totaal aantal struikelingen schatten (alsof de camera's 100% observatie hadden i.p.v. 26-27%) op 7.3 voor de roltrap en 7.6 voor de vaste trap. Op het totaal aantal beklimmingen (ruim 465) is dat nog geen 2%.

Groep 2 maakte een enthousiastere indruk dan Groep 1. Behalve dat mensen nu eenmaal verschillend zijn kan de wat minder voorzichtigere mondelinge instructie aan Groep 2 een rol gespeeld hebben. Waar eerst de nadruk viel op "eigen tempo" en "wees voorzichtig" viel later wat meer nadruk op "snel bovenkomen". Het gaat hier overigens om accentverschillen en niet om een wezenlijk andere instructie. Daarnaast kan de gestegen stemming onder de supervisors een rol gespeeld hebben. Groep 1 was vlot, met succes en zonder narigheid afgehandeld en dat gaf de supervisors een wat zorgelozer en meer ontspannen houding bij Groep 2. En tenslotte was Groep 2 wat jonger dan Groep 1 (zie Figuur 1).

4.2 Afvoercapaciteit

We bepaalden de afvoercapaciteit van de trappen als volgt. Vanaf het moment dat de eerste proefpersoon boven arriveerde telden we steeds per 10 s het aantal passanten. Dat bleven we doen totdat de laatste proefpersoon boven was². Basis voor de scoring waren de camerabeelden bovenaan de trappen. Bij Groep 1 waren er twee laatkomers; één persoon bij de tweede roltrapklim; de andere bij de eerste klim over de vaste trap. Deze personen kwamen op 19 s en 22 s achter de rest aan en werden later uit de proef genomen. We tellen ze in het vervolg niet mee. Bij Groep 2 ontbraken dergelijke laatkomers en telden we iedereen mee. Vervolgens telden we het aantal opgeklommen personen op en deelden door het absolute tijdsverschil

¹ De statistische toets geeft de waarschijnlijkheid of probabiliteitswaarde (p-waarde) aan van een bepaald meetresultaat indien dat verkregen werd door louter toevallige fluctuatie of meetruis. In het huidige geval is de p kleiner dan 18%; er is dus gerede kans dat het verschil tussen de twee soorten trappen uit louter meetruis is geboren. De conventies van de statistiek zijn dat de p kleiner dan 5% moet zijn willen we het resultaat beteknisvol of *significant* noemen; of iets soepeler, dat de p kleiner dan 10% moet zijn.

² De laatste periode was meestal kleiner dan 10 s, bijvoorbeeld 5 s. Aannemende dat de capaciteit over die 5 s maatgevend was voor de gehele periode, corrigeerden we door het resultaat te vermenigvuldigen met 10 / 5.

tussen de eerste en de laatste persoon die boven was gekomen. Tabel 3 laat de aldus bepaalde capaciteit zien.

Tabel 3. Capaciteit van de verschillende trappen in aantal personen per minuut. (Groep 1 nam de trappen in de hier aangegeven volgorde; Groep 2 in de volgorde vaste trap, roltrap.)

	Groep 1	Groep 2	gemiddeld
roltrapklim 1	54.8	69.8	roltrapklim: 61.1
roltrapklim 2	55.6	64.2	
vaste trapklim 1	42.5	67.1	vaste trapklim: 54.8
vaste trapklim 2	49.5	60.0	

Deze uitkomsten werden getoetst tegen toevalligheden in de metingen. We gebruikten een variantieanalyse (*3-way, fixed effects*) met als kleinste eenheid de capaciteit over een opeenvolgende periode van 10 s en als factoren *Groep*, *Soort Trap* en *Eerste of Tweede Klim* over die trap ($2 \times 2 \times 2$). De factor *Groep* was significant, de tweede groep presteerde beter dan de eerste groep ($F(1,88)=10.4$; $p<0.01$)--zie voetnoot 2³. Bij de factor *Trap* was sprake van een zeer zwakke "trend" $F(1,88)=1.9$; $p<0.18$. De factor *Klim* was niet significant, evenmin als de interacties tussen de factoren (alle p -waarden > 0.20).

We gaan nader in op de factor *Trap*. Gemiddeld had de stilstaande roltrap een capaciteit van 61 personen per minuut; de vaste trap een capaciteit van 55 personen per minuut. Het verschil bedraagt 6.3 personen/min. Vanwege de meetruis had dit resultaat ook anders kunnen uitvallen. Vanuit de geconstateerde meetruis is vaststelling mogelijk van de zekerheidsmarge; gebruikelijk is aan te geven binnen welk gebied het resultaat had kunnen liggen met een kans van 0.95. Voor de factor *Trap* lag de werkelijke waarde van het verschil dan ergens tussen de -2.7 en 15.4 personen per minuut (normaalverdeling). De roltrap heeft dus een capaciteit ergens tussen de 95% en de 128% van de capaciteit van de vaste trap.

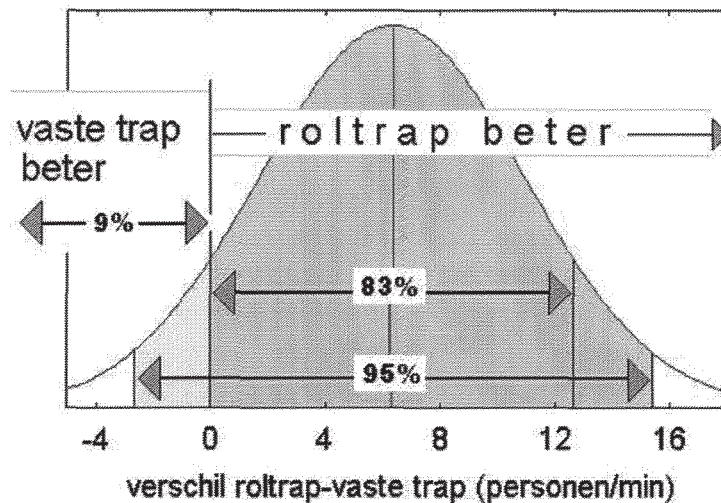
Waarschijnlijk heeft de roltrap meer capaciteit dan de vaste trap. Deze uitspraak houdt in dat het gebied waarbinnen het gemeten verschil had kunnen liggen zich in een strakkere zone bevindt tussen 0 en een nog onbekende positieve waarde. Doorrekenend met de geconstateerde meetruis blijkt dat gebied te liggen tussen 0 en 12.6 personen/min. De kans dat het werkelijke capaciteitsverschil zich in dit gebied bevindt (waarbij dus de roltrap een hogere capaciteit heeft) is 0.83.

Met dezelfde gegevens kan ook de kans geschat worden dat het werkelijke capaciteitsverschil negatief is, en dat dus de roltrap in werkelijkheid minder capaciteit zou hebben dan de vaste trap. De kans op een werkelijk capaciteitsverschil ten gunste van de vaste trap heeft een p -waarde van 0.09.

Samenvattend: de uitspraak "de roltrap heeft *minder* afvoercapaciteit dan de vaste trap" is juist met een kanswaarde van 0.09; de uitspraak "de roltrap heeft *meer* afvoercapaciteit dan de vaste trap" is juist met een kanswaarde van 0.83; de uitspraak "de roltrap heeft een afvoercapaciteit van minstens 95% van die van de vaste trap" is juist met een kanswaarde van 0.95. Figuur 6 illustreert het een en ander.

³ De p is kleiner dan 1%; het is dus uiterst *onwaarschijnlijk* dat het verschil tussen de twee groepen uit meetruis is geboren; we concluderen dat hier sprake is van een significant effect. Bij de factor *Trap* is de p 17%; dat is weer niet significant.

De statistische kracht van deze en dergelijke schattingen (*statistical power*), het oplossend vermogen van de metingen, is dusdanig dat capaciteitsverschillen van 9 of meer personen/minuut als significant ontdekt worden. Kleinere capaciteitsverschillen zullen niet ontdekt worden.



Figuur 6. Het gemeten verschil tussen roltrap en vaste trap (6.3 personen/min) en de kansverdeling van mogelijke andere uitkomsten.

5 DISCUSSIE

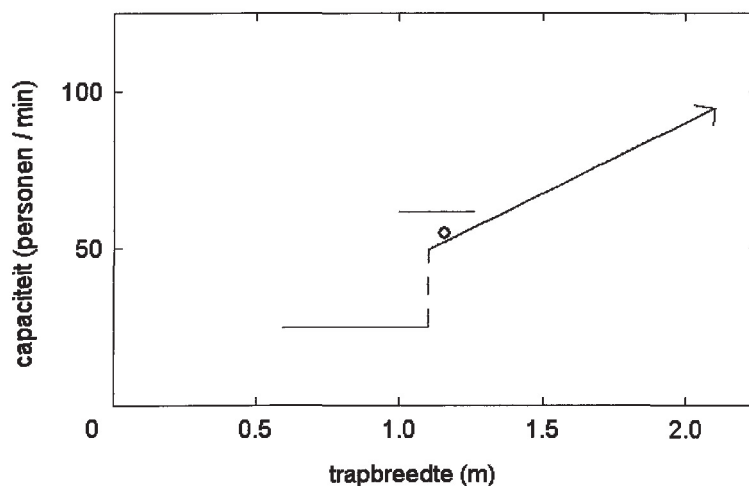
Vanuit de metingen mag met grote stelligheid geconcludeerd worden dat de stilstaande roltrap een afvoercapaciteit heeft van tenminste 95% van die van een smalle vaste B-trap. De kans dat de roltrap zelfs meer capaciteit heeft dan de vaste trap is groot.

We schrijven dit toe aan de vorm van de roltrap die in dwarsdoorsnede het trapezevormige profiel van de mens volgt terwijl de vaste trap op zijn smalst is waar de mens bijna op zijn breedst is.

Het idee dat de roltrap moeilijker beloopbaar is dan de vaste trap werd niet bevestigd in de vorm van een extra daling van capaciteit door toenemende vermoeidheid en langzamer klimmen op de roltrap of meer struikelingen op de roltrap. De indruk was integendeel dat men op de roltrap gemakkelijker inhaalt dan op de smalle vaste B-trap.

Vergelijkenderwijs heeft de roltrap een capaciteit van zeker 95% van die van een vaste trap met afmetingen die zonder meer voldoen aan een trap, kolom B, van het Bouwbesluit 2003. Een vraag van geheel andere orde is of de huidige metingen in absolute zin valide zijn. Hoe verhouden ze zich bijvoorbeeld tot de afvoercapaciteit volgens de rekenregels van het Bouwbesluit 2003?

Figuur 7 geeft daarvan een indruk. We zien dat onze vaste trap wat meer capaciteit heeft dan zou moeten volgens het Bouwbesluit; en we zien dat de capaciteit van de roltrap boven het niveau ligt van een 110 cm brede B-trap.



Figuur 7. Capaciteit als functie van trapbreedte volgens het Bouwbesluit (getrokken lijn) en volgens de metingen van de huidige proef (rondje, streefje). Het rondje is de gemeten capaciteit van een vaste trap met een breedte van 116 cm; het kleine horizontale streefje de gemeten capaciteit van een roltrap met een breedte van 100 cm (voetzool) of 126 cm (vanaf enkel- of kuithoogte).

Vanuit deze vergelijking kunnen we, de rekenregels van het Bouwbesluit 2003 volgend, een zekere breedte toekennen aan onze trappen. In de figuur is de vaste trap op een breedte van 116 cm gesteld. Dat is de breedte op voetniveau. Volgens het Bouwbesluit moeten de trapbomen nog meegeteld worden en zou de officiële trapbreedte zeker 120 cm bedragen waarmee de gemeten capaciteit van de vaste trap vrijwel gelijk is aan de schatting van de rekenregels Bouwbesluit. De breedte van de roltrap is gesteld op 100,7 cm, gemeten op het niveau van het tredevlak; de vrije breedte is 126 cm vanaf enkel- en kuithoogte. Qua capaciteit komt hij overeen met een vaste trap van gemiddeld 136 cm breed, afgaande op de rekenregels die de toelichting op artikel 3.1 van de Regeling Bouwbesluit 2003 kent. Het lijkt erop dat de breedte vanaf heuphoogte meer bepalend is voor de trapcapaciteit dan de breedte op voetniveau.

De betere resultaten voor de roltrap laten zich verklaren uit het profiel van de roltrap dat het profiel van de mens beter volgt dan de vaste trap. Bij de vaste trap is de afstand tussen de leuning (vrije breedte) 1 m. Bij de roltrap is die afmeting 1,26 m. Dit zou een resultaat doen vermoeden dat van $1,26/1$ maal beter was, maar we meten slechts een resultaat dat $61,1/54,8 = 1,11$ maal beter is. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de moeilijker beloopbaarheid van de rol trap ten opzichte van de vaste trap.

Nogmaals: zijn de huidige metingen in absolute zin redelijk? Daarbij mag ook de gevolgde methode kritisch bekeken worden. Enkele punten zijn daarbij op te merken. In de eerste plaats waren de huidige proefpersonen lichamelijk fitter dan het algemene publiek. Bovendien namen we nog eens enkele proefpersonen met lichamelijke problemen uit de proef. De proefgroep loopt dus beter dan het algemene publiek dat, volgens het centraal bureau voor de statistiek zich voor 5% "ernstig beperkt" acht bij het oplopen van een paar trappen terwijl 16% zich "een